Maestría en Ingeniería Civil

Aplicación del ensayo Mini-CBR en la caracterización de los suelos de subrasante de consistencia blanda.

Juan Sebastián Ruiz Hernández

Bogotá, D.C., 31 de mayo de 2021

Escuela Colombiana de Ingeniería
Julio Garavito

Aplicación del ensayo Mini-CBR en la caracterización de los suelos de subrasante de consistencia blanda.

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en geotecnia

Sandra Ximena Campagnoli Martínez

Director

Bogotá, D.C., 31 de mayo de 2021

Escuela Colombiana de Ingeniería
Julio Garavito

La tesis de maestría titulada “Aplicación del Ensayo Mini-CBR en la caracterización de los suelos de subrasante de consistencia blanda”, presentada por Juan Sebastián Ruiz Hernández, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en geotecnia.

Sandra Ximena Campagnoli Martínez

Director de la tesis

Fernando Estrada Sánchez

Jurado

Óscar Reyes Ortiz

Jurado

Bogotá, D.C., 31 de mayo de 2020 (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

La familia siempre será lo primero y lo más importante.

A mi madre por inculcarme que con disciplina, esfuerzo y vocación todo se puede lograr en la vida.

A mi padre por enseñarme el valor del trabajo y demostrarme que no existen cosas imposibles si se hacen con amor.

A mi hermano por ser siempre el ejemplo a seguir, el mejor consejero y el primer apoyo.

Ustedes son lo más importante en mi vida y el motivo por el que cada día lucho por ser mejor persona y profesional, este logro es de todos.

Agradecimientos

Son muchas las personas e instituciones que contribuyeron para lograr este estudio:

A la empresa LFO Ingenieros de Suelos S.A.S y todos sus colaboradores, de manera especial a los Ingenieros Luis Fernando Orozco y Marcela Salcedo, quienes me apoyaron desde el primer día y ofrecieron todo su conocimiento, recursos y disposición para lograr el objetivo.

Al fantasmita que siempre estuvo a mi lado, en las buenas y aún más importante, en las malas. Siempre con una sonrisa y una palabra de aliento para motivarme a seguir adelante y demostrarme de lo que soy capaz.

A la Ingeniera Sandra Campagnoli, por su compromiso, apoyo, paciencia y conocimiento, los cuales fueron indispensables para poder desarrollar este trabajo.

A la Ingeniera Carolina Bojacá, quien, con su amistad, trabajo y conocimiento fue un pilar fundamental para el desarrollo de este proyecto.

A los laboratoristas Marco Contreras y Osmar Tolosa, por su apoyo y disposición para la exploración de campo y la ejecución de los ensayos de laboratorio.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por formarme como profesional y como persona, por enseñarme a honrar la profesión y por ser mi segundo hogar.

Resumen

La capacidad de soporte de la subrasante tiene una gran influencia sobre el espesor final de las diferentes capas de la estructura del pavimento, por tal motivo, es imprescindible realizar ensayos que permitan determinar este parámetro de una manera eficiente y confiable.

El suelo de subrasante es un material con gran variabilidad, propenso a sufrir cambios en diferentes ambientes, (Reddy & Moorthy, 2005). Los métodos de diseño de pavimentos utilizan como parámetro mecánico para caracterizar la subrasante el módulo resiliente (Mr). Sin embargo, los equipos para pruebas dinámicas no están disponibles en todos los laboratorios y es un ensayo costoso. El Mr se estima en muchas ocasiones, a partir de correlaciones con el CBR (Indian Roads Congress, 2012). La metodología basada en el CBR es ampliamente empleada a nivel mundial para el diseño de pavimentos (Reddy & Moorthy, 2005) y actualmente es el ensayo más utilizado para evaluar la resistencia del suelo de subrasante y la calidad de los materiales empleados en la estructura de pavimento (Mendoza & Caicedo, 2019).

Una de las muchas objeciones al uso del CBR en la evaluación de suelos es la gran cantidad de material y el tiempo requerido para preparar los especímenes de 6 pulgadas de diámetro por 5 pulgadas de altura. (Chu & Davidson, 1955), como respuesta a esta problemática iniciaron las investigaciones para optimizar el ensayo, una de estas (mini-CBR) consistió en realizar el ensayo a una muestra de tamaño reducido manteniendo las proporciones con el ensayo tradicional.

El ensayo mini-CBR fue desarrollado originalmente en la Universidad del Estado de Iowa bajo el nombre de Mini Bearing test (Lafleur et al., 1956) y posteriormente retomado por Nogami (1972). Este ensayo sigue los mismos principios que el tradicional, pero se realiza sobre una muestra mucho más pequeña de 5.0 cm de diámetro por 5.0 cm de altura.

Para el ensayo miniatura se requiere únicamente el 14% de la muestra de suelo y el 94% del tiempo de ensayo comparado con el tradicional. Adicionalmente, existe una reducción considerable de tiempo y energía en la extracción de la muestra (Requiz, 2018). Assali, Fortes, & Cymrot, (2003) demostraron que el ensayo mini-CBR genera una reducción aproximada del 45% del costo total del ensayo CBR y los resultados obtenidos para diferentes muestras evidenciaron una menor incertidumbre en los ensayos miniatura.

Ante las ventajas que presenta esta nueva metodología de caracterización, el mini-CBR se postula como una alternativa para determinar la resistencia de los suelos de subrasante de una forma práctica y sencilla (manteniendo su origen empírico). Dentro de este documento se evalúa la aplicabilidad de este ensayo para los suelos blandos lacustres de la ciudad de Bogotá y sus correlaciones frente a los ensayos de Mr y CBR.

Para el presente estudio se realizó una delimitación de la zona de trabajo en la que se tuvieron en cuenta 4 factores: valores de CBR existentes, zonificación geotécnica, sísmica y geológica; Posteriormente, se extrajeron muestras inalteradas en tubos de pared delgada tipo shelby y en moldes CBR, junto a cada extracción se realizó un ensayo de penetración dinámica con cono (PDC). Finalmente, se realizaron ensayos de laboratorio para la caracterización física (contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, granulometría, gravedad específica, peso unitario y clasificación) y mecánica (mini-CBR, Módulo resiliente, CBR) de cada una de las muestras para concluir con el análisis de los resultados obtenidos.

Las muestras ensayadas en este estudio corresponden al estrato de suelo natural que se encuentra bajo los rellenos y/o la capa vegetal, a profundidades que varían entre 0.3 m y 0.8 m. El estrato analizado corresponde a limos arcillosos de alta compresibilidad (MH) o a arcillas de alta compresibilidad (CH), que son típicamente los suelos de subrasante de los pavimentos de la zona lacustre de la ciudad de Bogotá.

En general se obtuvieron muestras en 2 sitios principalmente: 10 muestras en la Escuela Colombiana de Ingeniería (CH), 6 muestras en un lote de San José de Bavaria (MH), las otras muestras (MH) fueron repartidas en 3 sitios dentro de la zona delimitada. Todos los análisis se realizaron evaluando los suelos agrupados como: (1) Todas las muestras extraídas (CH y MH), (2) muestras de San José de Bavaria (MH), (3) limos de alta compresibilidad (MH) y (4) Muestras de la Escuela Colombiana de Ingeniería (CH).

Se evaluaron las relaciones entre cada uno de los parámetros físicos considerados (humedad, relación de vacíos, plasticidad, peso unitario) de los suelos con los valores de CBR, Número Dinámico (ND), Resistencia al corte no drenada o con el Módulo Resiliente (Mr), al igual que relaciones multivariable. Estas correlaciones solo obtuvieron valores satisfactorios al analizar las muestras de la ECI. Adicionalmente, se evaluaron posibles correlaciones entre el ensayo Mini-CBR con las propiedades físicas, los valores de CBR, Número Dinámico (ND), Resistencia al corte no drenada y el Módulo Resiliente (Mr),

obteniendo nuevamente resultados aceptables al emplear únicamente las arcillas de alta plasticidad de la Escuela Colombiana de Ingeniería (CH). Se logró identificar que la penetración de 1.25 mm en el ensayo Mini-CBR es la más representativa a la hora de correlacionar el valor de CBR.

Teniendo en cuenta que la mayor parte de las investigaciones existentes sobre el Mini-CBR se desarrollan sobre suelos lateríticos, valdría la pena realizar un estudio similar al actual pero sobre este tipo de materiales en el país. Adicionalmente, se podría considerar un estudio multivariable entre el CBR y el Mr con las propiedades físicas con un número de datos considerablemente mayor a los empleados en el presente trabajo.

Palabras clave: Mini-CBR, CBR, módulo resiliente, subrasante, suelos blandos.

Contenido

Resumen 6

Contenido 9

Índice de tablas 13

Índice de figuras 17

Índice de anexos 24

1.0 Introducción 25

1.1 Objetivos 26

1.1.1. Objetivo general. 27

1.1.2. Objetivos específicos. 27

1.2 Organización del Trabajo 27

1.3 Referencias 29

2.0 Situación actual y Revisión Bibliográfica 37

2.1 Situación actual 37

2.2 Revisión bibliográfica 40

2.2.1. Clasificación MCT (“miniatura, compactado e tropical”) 41

2.2.2. Ensayo Mini-CBR 50

2.2.3. Ensayo de módulo resiliente 71

2.2.4. Ensayo PDC (Penetración dinámica con cono) 76

2.3 CBR (California Bearing Ratio) 81

2.3.1. Metodología de ensayo: 82

2.4 Referencias 85

3.0 Ensayo Mini-CBR 93

3.1 Consideraciones generales 93

3.2 Técnica de la prueba Mini-CBR 96

3.2.1. Extracción de muestras 96

3.2.2. Equipo de Ensayo para el Mini-CBR 97
3.2.3. Procedimiento del ensayo para el Mini-CBR 105
3.3 Referencias 111
4.0 Metodología y Caracterización de Muestras 119
4.1 Metodología de la investigación 119
4.1.1. Etapa 1: Identificación y diagnóstico de la zona de estudio 119
4.1.2. Etapa 2: Extracción de muestras y ensayos de resistencia in-situ 136
4.1.3. Etapa 3: Caracterización física, mecánica y clasificación 140
4.1.4. Etapa 4: Análisis de resultados y determinación de correlaciones 144
4.2 Clasificación y caracterización de los materiales 145
4.3 Referencias 148
5.0 Resultados experimentales y análisis 156
5.1 Resultados de los ensayos tradicionales de resistencia al corte. 156
5.2 Correlaciones entre los ensayos tradicionales de resistencia al corte 159
5.2.1. Relación entre el CBR a humedad natural y el DN 160
5.2.2. Relación entre CBR a humedad natural y la resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$) 162
5.2.3. Relación entre DN y resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$) 163
5.3 Correlaciones entre los ensayos tradicionales de resistencia al corte y las propiedades físicas. 163
5.3.1. Relación entre el CBR con las propiedades físicas. 164
5.3.2. Relación entre el ND (Número dinámico del ensayo PDC) con las propiedades físicas. 167
5.3.3. Relación entre resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$) con las propiedades físicas. 170
5.4 Resultados del ensayo de Módulo Resiliente (Mr) 172
5.4.1. Ecuaciones constitutivas 173

5.4.2. Determinación del módulo resiliente (Mr) para un estado de esfuerzos. ... 194
5.4.3. Relación entre el Mr con las propiedades físicas. ... 206
5.4.4. Relación del Mr con el CBR y el ND. ... 209
5.5 Análisis estadístico de los ensayos de resistencia y rigidez con las propiedades físicas. ... 212
5.5.1. Regresión lineal multivariable entre el CBR y las propiedades físicas ... 218
5.5.1. Regresión lineal multivariable entre el Mr y las propiedades físicas ... 224
5.6 Resultados ensayo Mini-CBR ... 232
5.6.1. Determinación del CBR mediante el ensayo Mini-CBR a partir de la literatura. 240
5.6.2. Determinación de una correlación particular del CBR mediante el ensayo Mini-CBR. 260
5.6.3. Resumen de las correlaciones encontradas ... 268
5.6.4. Determinación del Mr a partir del ensayo Mini-CBR ... 268
5.7 Análisis de costos del ensayo Mini-CBR ... 269
5.7.1. Rendimiento horas-hombre ... 269
5.7.2. Equipos y Herramientas ... 271
5.7.3. Tarifa horaria ... 271
5.7.4. Determinación de los costos ... 275
5.7.5. Costos de ejecución del ensayo ... 276
5.8 Referencias ... 278
6.0 Conclusiones y recomendaciones ... 286
6.1 Conclusiones ... 286
6.1.1. Caracterización física y mecánica ... 286
6.1.2. Influencia del esfuerzo desviador y el cortante octaédrico en el módulo resiliente. ... 287
6.1.3. Correlaciones entre propiedades físicas, CBR, ND y Mr ... 288

6.1.4. Empleabilidad del ensayo Mini-CBR para determinar el CBR o el Mr de los suelos de subrasante 289

6.2 Recomendaciones 290

Índice de tablas

Tabla 2-1: Equivalencia sistemas de clasificación MCT, AASHTO y UCSC. 49

Tabla 2-2: Propiedades suelos analizados por Marson, (2004)..... 60

Tabla 2-3: Resumen de los coeficientes de correlación para los ensayos de CBR y Mini-CBR. 65

Tabla 2-4: Caracterización de materiales estudiados en Uberlandia. 67

Tabla 2-5: Continuación. Caracterización de materiales estudiados en Uberlandia. 67

Tabla 2-6: Coeficientes de correlación entre CBR y Mini-CBR. 69

Tabla 2-7: Comparativo valores CBR proyecto Caminos Madre de Dios - Perú..... 70

Tabla 2-8: Correlaciones entre el PDC y el CBR. 77

Tabla 2-9: Correlaciones entre el PDC y el módulo de elasticidad. 80

Tabla 2-10: Correlaciones entre el PDC y el Mr. 80

Tabla 2-11: Correlaciones CBR y Propiedades índice. 83

Tabla 2-12: Correlaciones CBR y Mr. 84

Tabla 3-1: Características de los ensayos CBR y Mini-CBR. 94

Tabla 4-1: Resumen propiedades físicas y CBR, proyectos base de datos LFO..... 121

Tabla 4-2: Resumen valores CBR proyectos LFO Ingenieros de Suelos. 122

Tabla 4-3: Descripción zonas geotécnicas. 123

Tabla 4-4: Descripción de las zonas de respuesta sísmica. 125

Tabla 4-5: Resumen valores CBR proyectos dentro de la zona de estudio. 130

Tabla 4-6: Resumen ensayos de caracterización física dentro de la zona de estudio. ... 131

Tabla 4-7: Análisis de las muestras de la base de datos dentro de la zona de estudio. . 132

Tabla 4-8: Ubicación de las exploraciones realizadas. 139

Tabla 4-9. Propiedades físicas y caracterización de las muestras. 145

Tabla 5-1: Resultados caracterización física y ensayos de resistencia al corte de las muestras analizadas 157

Tabla 5-2: Consistencia de los suelos en función de la compresión inconfinada..... 159

Tabla 5-3: Ajuste de parámetros estadísticos 159

Tabla 5-4: Mr (MPa) para diferentes estados de esfuerzos..... 173

Tabla 5-5: Resultados de las constantes experimentales para el modelo k-$\sigma_{d.}$ 179

Tabla 5-6: Resultados de las constantes experimentales para el modelo universal 189

Tabla 5-7: Comparación Mr con 95% de confiabilidad para los dos modelos..... 205

Tabla 5-8: Resultados ensayos de resistencia, rigidez y caracterización física muestras de la ECI..... 214

Tabla 5-9: Resumen P-value para cada una de las variables independientes 217

Tabla 5-10: Resumen modelo multivariable entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, todas las muestras..... 218

Tabla 5-11: Tabla ANOVA entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, todas las muestras..... 219

Tabla 5-12: Resumen modelo multivariable entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI. 220

Tabla 5-13: Tabla ANOVA entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI. 221

Tabla 5-14: Tabla de coeficientes entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI..... 222

Tabla 5-15: Intervalo de confianza para un 95% de confiabilidad modelo entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI..... 223

Tabla 5-16: Resumen modelo multivariable entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, todas las muestras..... 224

Tabla 5-17: Tabla ANOVA entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, Todas las muestras..... 225

Tabla 5-18: Tabla de coeficientes entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, todas las muestras..... 226

Tabla 5-19: Intervalo de confianza para un 95% de confiabilidad modelo entre MR y propiedades físicas seleccionadas, todas las muestras. 228

Tabla 5-20: Resumen modelo multivariable entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI. 229

Tabla 5-21: Tabla ANOVA entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, Muestras de la ECI. 230

Tabla 5-22: Tabla de coeficientes entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI. 230

Tabla 5-23: Intervalo de confianza para un 95% de confiabilidad modelo entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI. 232

Tabla 5-24: Cargas (kg) obtenidas durante el ensayo Mini-CBR en condición natural. .. 233

Tabla 5-25: Cargas (kg) obtenidas durante el ensayo Mini-CBR luego de inmersión. 237

Tabla 5-26: Valores de CBR obtenidos a partir del ensayo Mini-CBR para diferentes autores. 241

Tabla 5-27: Coeficientes de correlación para las ecuaciones existentes del CBR natural a partir del Mini-CBR 251

Tabla 5-28: Valores de CBR obtenidos a partir del ensayo Mini-CBR para diferentes autores. 252

Tabla 5-29: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y el CBR, muestras de la ECI en condición natural. 261

Tabla 5-30: Coeficientes de correlación (R^2) entre el logaritmo de la carga del ensayo Mini-CBR y el CBR, muestras de la ECI en condición natural 262

Tabla 5-31: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y el logaritmo del CBR, muestras de la ECI en condición natural. 262

Tabla 5-32: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y el CBR, muestras de la ECI luego de inmersión. 263

Tabla 5-33: Coeficientes de correlación (R^2) entre el logaritmo de la carga del ensayo Mini-CBR y el CBR, muestras de la ECI luego de inmersión 263

Tabla 5-34: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y el logaritmo del CBR, muestras de la ECI luego de inmersión. 264

Tabla 5-35: Coeficientes de correlación (R^2) entre el logaritmo de la carga del ensayo Mini-CBR y el CBR, muestras de S.J.B luego de inmersión 264

Tabla 5-36: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y la carga necesaria para alcanzar una penetración de 2.54 y 5.08mm en el ensayo CBR, muestras de la ECI en condición natural. 266

Tabla 5-37: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y la carga necesaria para alcanzar una penetración de 2.54 y 5.08mm en el ensayo CBR, muestras de San José de Bavaria luego de inmersión. 267

Tabla 5-38: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y la carga necesaria para alcanzar una penetración de 2.54 y 5.08mm en el ensayo CBR, muestras de la ECI luego de inmersión. 267

Tabla 5-39: Tiempo requerido para ejecutar los ensayos Mini-CBR..... 270

Tabla 5-40: Costos comerciales equipos y herramientas para el ensayo Mini-CBR..... 271

Tabla 5-41: Determinación del factor prestacional 273

Tabla 5-42: Cálculo costos de propiedad de los equipos y herramientas para la ejecución del ensayo Mini-CBR. 275

Tabla 5-43: Cálculo costos de operación de los equipos y herramientas para la ejecución del ensayo Mini-CBR. 276

Tabla 5-44: Cálculo tarifa horaria de los equipos y herramientas para la ejecución del ensayo Mini-CBR. 276

Tabla 5-45: Cálculo costos total de ejecución del ensayo Mini-CBR. 277

Índice de figuras

Figura 2-1: Relación CBR – Índice de grupo para muestras de la vía Bandeirantes. 42

Figura 2-2: Comparación propiedades muestra laterítica y saprolítica que clasifican en el mismo grupo según AASHO (A-7-5) y USCS (ML). 43

Figura 2-3: continuación Comparación propiedades muestra laterítica y saprolítica que clasifican en el mismo grupo según AASHO (A-4) y USCS (CL)..... 44

Figura 2-4: Flujograma grupos de ensayos metodología MCT. 46

Figura 2-5: Ábaco de la clasificación MCT. 49

Figura 2-6 Equipo para realizar el ensayo mini-CBR. (a) Montaje para inmersión. (b) Montaje para ensayo. 51

Figura 2-7: Cargas típicas de CBR e IBV contra curvas de penetración para una “Sandy loam” de Iowa. Fuente: (Lafleur et al., 1956)..... 52

Figura 2-8: Relación entre CBR y cargas del ensayo IBV. 53

Figura 2-9: Valores de CBR vs cargas en el ensayo Mini-CBR. 55

Figura 2-10: Correlación entre los valores de CBR y Mini-CBR, para humedad óptima. .. 55

Figura 2-11: Relación Mini-CBR vs CBR (Energía normal), sin inmersión, según clasificación MCT. Fuente: tomado de (Barros, 2003)..... 58

Figura 2-12: Relación Mini-CBR vs CBR (Energía intermedia), sin inmersión, según clasificación MCT. Fuente: tomado de (Barros, 2003)..... 58

Figura 2-13: Relación Mini-CBR vs CBR (Energía normal), con inmersión, según clasificación MCT. Fuente: tomado de (Barros, 2003)..... 59

Figura 2-14: Relación Mini-CBR vs CBR (Energía intermedia), con inmersión, según clasificación MCT. Fuente: tomado de (Barros, 2003)..... 59

Figura 2-15: Comparación entre las presiones para una penetración de 1.5 mm en ensayos con y sin inmersión (con y sin sobrecarga). 61

Figura 2-16: Comparación entre las presiones para una penetración de 1.5 mm en ensayos con y sin sobrecarga (con y sin inmersión). 62

Figura 2-17: Comparación entre las presiones para una penetración de 2.0 mm en ensayos con y sin inmersión (con y sin sobrecarga). 62

Figura 2-18: Correlación CBR (EN, energía normal) x presión Mini-CBR (10 golpes) para la muestra 1..... 63

Figura 2-19: Correlación CBR (EN, energía normal) x presión Mini-CBR (10 golpes) para la muestra 2..... 63

Figura 2-20: Correlación CBR (EN, energía normal) x presión Mini-CBR (10 golpes) para la muestra 3..... 64

Figura 2-21: Comparación CBR vs Mini-CBR (Sin inmersión y sin sobrecarga)..... 68

Figura 2-22: Comparación CBR vs Mini-CBR (con inmersión y con sobrecarga)..... 68

Figura 2-23: Comparación estructura final por el método AASHTO 93 de acuerdo al valor de CBR empleado. 70

Figura 3-1 Tubo Shelby para la obtención de muestras inalteradas in-situ 96

Figura 3-2 Molde Para el ensayo del Mini-CBR 96

Figura 3-3: Base y tapa dispositivo miniatura para la inmersión de muestras; (a) esquema en la norma y (b) piezas usadas en la investigación 99

Figura 3-4: Placa perforada para sobrecarga dispositivo miniatura para la inmersión de muestras: (a) esquema en la norma y (b) pieza usada en la investigación 100

Figura 3-5: Montaje esquemático dispositivo miniatura para la inmersión de muestras: (a) esquema en la norma y (b) montaje real..... 100

Figura 3-6: Placa de soporte y de apoyo del extensómetro para la inmersión de muestras: (a) esquema en la norma y (b) montaje empleado en la investigación..... 101

Figura 3-7: Sobrecarga anular para inmersión de 490g: (a) esquema en la norma y (b) pieza usada en la investigación..... 102

Figura 3-8: Molde Mini-CBR: (a) esquema en la norma y (b) pieza usada en la investigación 102

Figura 3-9: Pistón de penetración: (a) esquema en la norma y (b) pieza usada en la investigación..... 103

Figura 3-10: Sobrecarga anular para ensayo de penetración: (a) esquema en la norma y (b) pieza usada en la investigación. 103

Figura 3-11: Dispositivo de acople del extensómetro: (a) esquema en la norma y (b) piezas usadas en la investigación. 104

Figura 3-12: Montaje ensayo mini-CBR: (a) esquema en la norma y (b) montaje real en la investigación. 105

Figura 3-13: Procedimiento ensayo Mini-CBR: (a) Tallar la muestra, (b) Colocar la sobrecarga anular y empezar la penetración midiendo deformaciones, (c) Armar el molde de inmersión y dejar saturando la muestra midiendo expansión, (d) Escurrir el molde y realizar el ensayo con la sobrecarga y (e) muestra final luego del ensayo. 107

Figura 3-14: Corrección curva de mini-CBR por punto de inflexión cerca al origen. 109

Figura 3-15: Corrección curva de mini-CBR por comportamiento decreciente (cizallamiento). 110

Figura 4-1: Localización proyectos analizados de la firma LFO Ingenieros de Suelos S.A.S. 120

Figura 4-2: Microzonificación geotécnica de Bogotá. (a) Lacustre A, (b) Lacustre B, ... 123

Figura 4-3: Zonificación geotécnica final para el proyecto. 124

Figura 4-4: Microzonificación sísmica de Bogotá. (a): Lacustre 200, (b): Lacustre 300. . 125

Figura 4-5: Zonificación sísmica final. 126

Figura 4-6: Microzonificación geológica final, ... 127

Figura 4-7: Zona de estudio. 128

Figura 4-8: Ubicación proyectos de referencia en zona de estudio. 129

Figura 4-9: Estado de consistencia para las muestras CH de la base de datos en la zona delimitada. 133

Figura 4-10: Estado de consistencia para las muestras MH de la base de datos en la zona delimitada. 134

Figura 4-11. Extracción de muestras y ensayo de PDC. 137

Figura 4-12. Almacenamiento de muestras de tubo Shelby y moldes de CBR. 138

Figura 4-13. Localización de las exploraciones realizadas. 140

Figura 4-14. Procedimiento ensayo Mr: (a) tallado de la muestra para cumplir relación h/D, (b) colocación de los papeles de filtro en la muestra, (c) colocación geomembrana y tapa sobre la muestra e inserción del armado en la cámara y (d) ejecución del ensayo. 142

Figura 4-15. Procedimiento ensayo CBR: (a) inmersión del molde CBR, (b): colocación de las sobrecargas, (c) montaje del molde en la prensa y (d) muestra ensayada. 143

Figura 4-16. Ensayo Mini – CBR: (a) muestra en inmersión, (b) muestra tallada a las dimensiones del ensayo y (c) montaje con sobrecarga para realizar el ensayo. 144

Figura 4-17: Carta de Casagrande comparando las muestras analizadas. 146

Figura 5-1. Fallas generadas en el ensayo rápido de corte. 158

Figura 5-2: Correlaciones CBR a humedad natural y DN. (a) Lote San José de Bavaria, (b) Muestras MH, (c) Todas las muestras y (d) ECI. 160

Figura 5-3 Comparación entre las correlaciones existentes entre CBR y DN con la investigación actual. (a): Gráfica completa, (b): Zona con CBR menor a 5.0% 161

Figura 5-4: Correlaciones entre el CBR a humedad natural y $\Delta\sigma_f$. (a) Lote San José Bavaria y (b) suelos tipo MH. 162

Figura 5-5: Correlaciones entre el DN y $\Delta\sigma_f$. (a) Lote San José Bavaria y (b) suelos tipo MH. 163

Figura 5-6: Correlaciones CBR a humedad natural y humedad natural. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI. 164

Figura 5-7: Correlaciones CBR a humedad natural y límite líquido. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI. 165

Figura 5-8: Correlaciones CBR a humedad natural y el índice de plasticidad. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI. 166

Figura 5-9: Correlaciones ND y la humedad natural. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI. 167

Figura 5-10: Correlaciones ND y el límite líquido. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI. 168

Figura 5-11: Correlaciones ND y el índice de plasticidad. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI. 169

Figura 5-12: Correlaciones $\Delta\sigma_f$ y la humedad natural. (a) Muestras MH, (b) Lote San José de Bavaria. 170

Figura 5-13: Correlaciones $\Delta\sigma_f$ y el límite líquido. (a) Muestras MH, (b) Lote San José de Bavaria. 171

Figura 5-14: Correlaciones $\Delta\sigma_f$ y el índice de plasticidad. (a) Muestras MH, (b) Lote San José de Bavaria. 172

Figura 5-15: Verificación Dependencia del MR con el σ_d 178

Figura 5-16: Comparación Mr obtenido en laboratorio Vs. Mr calculado por el modelo k-σ_d 183

Figura 5-17: Resultados Mr Vs σ_d. (a) todos los puntos, (b) muestras MH y (c) muestras CH. 184

Figura 5-18: Verificación Dependencia del MR con el τ_{oct} 188

Figura 5-19: Comparación Mr obtenido en laboratorio Vs. Mr calculado por el modelo universal 193

Figura 5-20: Resultados Mr Vs τ_{oct}. (a) todos los puntos, (b) muestras MH y (c) muestras CH. 194

Figura 5-21: Determinación del Mr al 95% de confiabilidad mediante el modelo k-σ_d 199

Figura 5-22: Determinación del Mr al 95% de confiabilidad mediante el modelo universal 204

Figura 5-23: Correlaciones Mr (ambos modelos) y la humedad natural. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI. 206

Figura 5-24: Correlaciones Mr (ambos modelos) y el límite líquido. 207

Figura 5-25: Correlaciones Mr (ambos modelos) y el índice de plasticidad. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI. 208

Figura 5-26: Correlaciones Mr (ambos modelos) y el peso unitario..... 209

Figura 5-27: Correlaciones Mr (ambos modelos) y el CBR. 210

Figura 5-28: Correlaciones Mr (ambos modelos) y el ND..... 211

Figura 5-29: Localización muestras analizadas en la ECI Fuente: Elaboración propia complementada con los datos de Bojacá Torres (2019) 213

Figura 5-30: Resultados análisis ANOVA entre CBR y cada uno de los parámetros físicos, para todas las muestras..... 215

Figura 5-31: Resultados análisis ANOVA entre CBR y cada uno de los parámetros físicos, para las muestras de la ECI..... 215

Figura 5-32: Resultados análisis ANOVA entre Mr y cada uno de los parámetros físicos, para todas las muestras..... 216

Figura 5-33: Resultados análisis ANOVA entre Mr y cada uno de los parámetros físicos, para las muestras de la ECI..... 217

Figura 5-34: Variación del P-value frente al nivel de significancia. 217

Figura 5-35: Gráfica esfuerzo vs deformación ensayos Mini-CBR y CBR hasta una deformación de 5.0 mm. 236

Figura 5-36: Gráfica esfuerzo vs deformación ensayos Mini-CBRinm y CBRinm hasta una deformación de 5.0 mm. 240

Figura 5-37: Variación de los resultados de $CBR_{0.1"}$ natural obtenidos a partir de las correlaciones existentes del Mini-CBR..... 242

Figura 5-38: Variación de los resultados de $CBR_{0.2"}$ natural obtenidos a partir de las correlaciones existentes del Mini-CBR..... 242

Figura 5-39: Correlaciones CBR (Lafleur, 1960) y el CBR 0.1" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 243

Figura 5-40 Correlaciones CBR (Lafleur, 1960) y el CBR 0.2" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 244

Figura 5-41: Correlaciones CBR (Nogami, 1972) y el CBR 0.1" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 246

Figura 5-42: Correlaciones CBR (Nogami, 1972) y el CBR 0.2" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 247

Figura 5-43: Correlaciones CBR (Ferreira, 1986) y el CBR 0.1" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 249

Figura 5-44: Correlaciones CBR (Ferreira, 1986) y el CBR 0.2” natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 250

Figura 5-45: Variación de los resultados de $CBR_{0.1”}$ con inmersión obtenidos a partir de las correlaciones existentes del Mini-CBR..... 253

Figura 5-46: Variación de los resultados de $CBR_{0.2”}$ con inmersión obtenidos a partir de las correlaciones existentes del Mini-CBR..... 253

Figura 5-47: Correlaciones CBR (Lafleur, 1960) y el CBR 0.1” con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 254

Figura 5-48: Correlaciones CBR (Lafleur, 1960) y el CBR 0.2” con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 255

Figura 5-49: Correlaciones CBR (Nogami, 1960) y el CBR 0.1” con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 256

Figura 5-50 Correlaciones CBR (Nogami, 1960) y el CBR 0.2” con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 257

Figura 5-51: Correlaciones CBR (Ferreira, 1986) y el CBR 0.1” con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 258

Figura 5-52: Correlaciones CBR (Ferreira, 1986) y el CBR 0.2” con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI. 259

Índice de anexos

Anexo 1. Base de datos con todos los proyectos (LFO Ingenieros de Suelos S.A.S)

Anexo 2. Base de datos con los proyectos dentro de la zona delimitada.

Anexo 3. Registro ensayos de laboratorio realizados.

Anexo 4. Relaciones entre el Mini-CBR con las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.

Anexo 5. Guía para el desarrollo del ensayo Mini-CBR.

1.0 Introducción

Un pavimento es una estructura compuesta por capas de materiales procesados superpuestas sobre la subrasante de suelo natural o de relleno, su función principal es la de distribuir las cargas aplicadas por el tránsito y garantizar que los esfuerzos transmitidos a la subrasante no excedan su capacidad de soporte ni generen deformaciones plásticas excesivas (Saurabh et al., 2013).

La capacidad de soporte de la subrasante tiene una gran influencia sobre el espesor final de las diferentes capas de la estructura de pavimento, el material granular requerido tiene una relación inversa con la capacidad de soporte de la subrasante (FHWA, 2006). Por tal motivo, es imprescindible realizar ensayos que permitan determinar este parámetro de una manera eficiente y confiable. Adicionalmente, la mayor cantidad de fallas relacionadas con los pavimentos asfálticos pueden ser evitadas realizando una adecuada caracterización y cuantificación de la resistencia de la subrasante.(Saxena, 1991).

El suelo de subrasante es un material con gran variabilidad, propenso a sufrir cambios en diferentes ambientes (Reddy & Moorthy, 2005), los métodos de diseño de pavimentos utilizan como parámetro mecánico para caracterizar la subrasante el módulo resiliente (Mr). En Colombia, este parámetro se obtiene en laboratorio empleando equipos triaxiales cíclicos sobre suelos inalterados o sobre materiales compactados, siguiendo los lineamientos especificados por el Instituto Nacional de Vías (Rondón Quintana et al., 2013), mediante el ensayo INV-E-156-13 “Módulo resiliente de suelos y agregados” (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2012b).

El Mr es una medida de la propiedad elástica del suelo, admitiendo ciertas características no lineales (AASHTO, 1993). Los equipos que se requieren para determinar este parámetro tienen un alto costo de adquisición, debido a la instrumentación de alta tecnología que poseen; razón por la cual en nuestro medio se realizan poco estos ensayos, además se debe tener en cuenta que muy pocas instituciones poseen estos equipos, por este motivo se sigue diseñando con métodos tradicionales o con correlaciones entre valores dinámicos y estáticos. (Narzary & Ahamad, 2018; Vidal & Osorio, 2002).

Al comienzo de la vida útil de una estructura de pavimento las deformaciones sufridas por el suelo de subrasante son permanentes. Sin embargo, a un número elevado de

repeticiones de carga, las deformaciones permanentes son prácticamente despreciables y la subrasante empieza a tener un comportamiento prácticamente elástico o resiliente.

El módulo resiliente es la medida del comportamiento elástico determinado por la deformación recuperable en los ensayos de laboratorio. Dado que los equipos para pruebas dinámicas no están disponibles en todos los laboratorios y es un ensayo costoso, el Mr se estima en muchas ocasiones, a partir de correlaciones con el CBR (Indian Roads Congress, 2012). Las diferentes correlaciones existentes, las cuales se detallarán más adelante, fueron realizadas para las condiciones particulares de los lugares donde se desarrollaron, por tal motivo, no pueden ser usadas en todo tipo de suelos.

Teniendo en cuenta las complicaciones en cuanto a equipos, capacitación para realizar el ensayo de Mr, la cantidad de muestra y tiempo empleado tanto en la toma de muestra como en la ejecución del ensayo CBR, el mini-CBR se presenta como una alternativa más eficiente para determinar el valor de la capacidad de soporte de un suelo de subrasante.

Actualmente el ensayo de CBR es el más utilizado para evaluar la resistencia del suelo de subrasante (Mendoza & Caicedo, 2019), por tal motivo, una optimización de dicho ensayo sería de gran utilidad en la fase de diseño de las estructuras de pavimento. Requiz (2018) cuantificó algunas ventajas del mini-CBR frente al tradicional: para el ensayo miniatura se requiere únicamente el 14% de la muestra de suelo y el 94% del tiempo de ensayo comparado con el tradicional.

Al revisar los beneficios en tiempo de toma de muestra y de ejecución de ensayo junto con la reducción de la cantidad de muestra a utilizar frente al ensayo tradicional, se observa que existe una gran oportunidad para optimizar el método tradicional sin necesidad de nuevos equipos ni capacitaciones adicionales al personal.

1.1 Objetivos

Este trabajo se lleva a cabo en la línea de pavimentos, específicamente en el área de la caracterización suelos de subrasante mediante el ensayo Mini – CBR. Actualmente esta prueba se encuentra estandarizada en Brasil y no se encontraron estándares en otros lugares. En Colombia no se han realizado investigaciones en campo sobre el tema.

1.1.1. Objetivo general.

Caracterizar suelos de subrasante de consistencia blanda de la zona lacustre de la ciudad de Bogotá mediante el ensayo de Mini-CBR y establecer posibles correlaciones con otros parámetros como el CBR, Módulo Resiliente y Número Dinámico.

1.1.2. Objetivos específicos.

- Implementar de manera detallada el ensayo de mini-CBR en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Realizar la caracterización y clasificación de los suelos de subrasante de consistencia blanda, correspondientes a la zona de estudio delimitada.
- Determinar la correlación entre el mini-CBR y el CBR para las muestras ensayadas.
- Determinar la correlación entre el mini-CBR y el módulo resiliente para las muestras ensayadas.
- Cuantificar de manera detallada la duración y el costo del proceso de extracción de muestra y ensayo para el Mini-CBR.

1.2 Organización del Trabajo

Este estudio está dividido en 6 capítulos más los anexos. A continuación, se presenta una breve descripción del contenido de cada capítulo:

Capítulo 1: Contiene la introducción, los objetivos y la organización del trabajo.

Capítulo 2: En este capítulo se presenta la situación actual de las carreteras a nivel mundial, en Colombia y particularmente en Bogotá. Se muestran los indicadores de cantidad y calidad de la infraestructura vial primaria, secundaria y terciaria en el país, enfatizando en la gran importancia que tiene una adecuada caracterización de la subrasante para el diseño de los pavimentos. Incluye una descripción de los diferentes métodos empleados en el país para determinar la resistencia al corte como insumo para el diseño de pavimentos, adicionalmente, contiene la recopilación

de las investigaciones y experiencias existentes sobre el ensayo de Mini-CBR presentadas en artículos técnicos y normativas (Brasil) para distintos tipos de suelos.

Capítulo 3: Este capítulo presenta la descripción de procedimiento, materiales y equipos para la realización del ensayo Mini-CBR.

Capítulo 4: Incluye la metodología seguida durante el desarrollo del trabajo (descripción de las diferentes etapas), caracterización física y clasificación de las muestras empleadas para los ensayos bajo la normativa actual en Colombia.

Capítulo 5: En este capítulo se presentan los resultados del ensayo Mini-CBR realizado bajo la normativa DNER 254/97 del *Departamento nacional de Estradas de Rodagem* en Brasil. Se presentan los valores del IBV (Iowa Bearing Value) y el índice Mini-CBR de acuerdo con las ecuaciones establecidas por los investigadores del ensayo y presentadas en los artículos técnicos.

Capítulo 6: Contiene el análisis de los resultados experimentales del ensayo de Mini-CBR y su relación con los ensayos tradicionales de resistencia (CBR, Mr) y con las propiedades físicas de las muestras.

Capítulo 7: Este capítulo consolida las conclusiones y recomendaciones relevantes de la investigación. En particular, se presentan las consideraciones sobre la aplicabilidad del ensayo Mini-CBR en la caracterización de los suelos lacustres. Finalmente, se presentan las recomendaciones para tener en cuenta en futuras investigaciones.

Anexos: Por último, se incluyen como anexos los formatos de los ensayos de laboratorios realizados sobre todas las muestras extraídas y el análisis de zonificación, en el que se presenta la tabla de ensayos de caracterización y CBR para todas las muestras incluidas en la base de datos analizada.

1.3 Referencias

AASHTO. (1993). *Guide for design pavement sturctures 1993*. American ASsociation of State Highway and Transportation Officials.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2020). Plan Distrital de Desarrollo 2020-2024 Un Nuevo Contrato Social y Ambiental para la Bogotá del Siglo XXI. *Página Institucional*, *2009*(366), 170. http://concejodebogota.gov.co/cbogota/site/edic/base/port/inicio.php

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2010). *Decreto 523 de 2010*.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2021). *Plan Operativo Anual de Inversiones*.

Andrei, D., Witczak, M., Schwartz, C., & Uzan, J. (2004). Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. *Journal of the Transportation Research Board*, *1874*, 29–37.

Assali, M. P., Fortes, R. M., & Cymrot, R. (2003). Comparação da incerteza de medição entre ensaios CBR e mini CBR. *34º Reunião Anual de Pavimentação*, 20.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). Colombia Estrategia de País del BID 2015–2018. In *Colombia*. http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=40089561

Banco Interamericano de Desarrollo. (2019). *Estrategia del Grupo BID con Colombia (2019-2022)*. https://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=EZSHARE-1474758834-2

Barros, C. O. de A. (2003). *Revisão da Correlação Mini CBR / CBR para solos do municipio de São Carlos – SP*. Universidade de São Paulo.

Barroso, S. H. de A. (2002). *Estudo dos solos da regiäo metropolitana de Fortaleza para aplicacao na engenharia rodoviária*. Universidade de Sâo Paulo.

Bojacá Torres, D. C. (2019). *Módulo resiliente de suelos blandos de subrasante de la zona lacustre de Bogotá a partir del ensayo CBR cíclico*.

Cabrera, A. (2012). *Evaluation of the laboratory resilient modulus test using a New Mexico subgrade soil Recommended Citation "Evaluation of the laboratory resilient modulus test using a New Mexico subgrade soil*. https://digitalrepository.unm.edu/ce_etds.%22

Cámara Colombiana de la Infraestructura. (2009). *Tarifas de arrendamiento para equipos de construcción*.

CEPAL. (2018). Transporte de carretera en América Latina : evolución de la infraestructura y de sus impactos entre 2007 y 2015. *FAL*, *367*(7), 1–15. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44440/1/S1801184_es.pdf

Chu, T. Y., & Davidson, D. T. (1955). Some laboratory test for the evaluation of stabilized soils. *Iowa State University Bulletin*, *21*.

Clavijo, S., Vera, A., & Vera, N. (2013). *La inversión en infraestructura en Colombia 2012-2020*. 7–14. http://www.cvc.com.ve/docs/2016219124559Inversion en infraestructura Colombia 2013-2020.pdf

Dai, S., & Zollars, J. (2002). Resilient Modulus of Minnesota Road Research Project Subgrade Soil. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1786*(1), 20–28. https://doi.org/10.3141/1786-03

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1997). DNER - ME 254 Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão. In *Norma rodoviária*. http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me254-97.pdf

Dione, A., Fall, M., Berthaud, Y., Benboudjema, F., & Michou, A. (2014). *Implementation of Resilient Modulus - CBR relationship in Mechanistic-Empirical (M . -E) Pavement Design Abstract :* *1*(2), 65–71. https://www.researchgate.net/publication/271829406_Implementation_of_Resilient_Modulus_-_CBR_relationship_in_Mechanistic-Empirical_M_-E_Pavement_Design

Escobar Toro, L. J. (2011). *CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS TROPICALES EN UN TALUD DE LA AUTOPISTA MEDELLÍN – BOGOTÁ EN EL TRAMO DE VÍA ENTRE MARINILLA Y SANTUARIO*. Universidad Nacional de Colombia.

Fernandes, E. (2006). *ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS APLICADAS AOS SOLOS TROPICAIS*. Universidade de São Paulo.

FHWA. (2006). Geotechnical aspects of pavements. In *FHWA NHI-05-037* (Issue 132040). http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geotechnical+Aspects+of+Pavements#1

Garnica, P. Pérez, N. Gómez, J. (2001). Módulos de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares. In *Publicación Técnica N. 142* (Issue 142).

George, K. P. (2004). *Prediction of Resilient Modulus From Soil Index Properties. Report No. FHWA/MS-DOT-RD-04-172*. *November*, 72.

Grupo Banco Mundial. (2018). *Índice de desempeño logístico*. https://datos.bancomundial.org/indicador/LP.LPI.INFR.XQ?end=2018&start=2007&view=chart&year_high_desc=true

Hveem, F. N., & Carmany, R. M. (1949). The faactors underlying the rational design of pavements. *Twenty-Eighth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C.*, *28*, 101–136. https://trid.trb.org/view/104547

Indian Roads Congress. (2012). Tentative Guidelines for the design of Flexible Pavements. In *Indian Road Congress* (p. 108). https://archive.org/details/govlawircy2012sp37_0/page/90

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2017). *Capítulo técnico Geotecnia y Pavimentos*.

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), & Universidad Nacional de Colombia. (2013). *Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.* http://www.umv.gov.co/sisgestion2017/Documentos/MISIONAL/PDV/PDV-DE-003-V1_Guia_diseno_de_pavimentos_para_bajos_volumenes_de_transito_y_vias_locales_para_bogota.pdf

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012a). *INV 148-13 CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO Y SOBRE MUESTRA INALTERADA*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012b). *INV E-156-13 Módulo resiliente de suelos y agregados*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012c). *INV E-172-13 MÉTODO DE ENSAYO NORMAL PARA EL USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO EN APLICACIONES DE PAVIMENTOS A POCA PROFUNDIDAD*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2018). *Estado De La Red Vial Criterio Tecnico Segundo Semestre 2018*.

Khasawneh, M. A., & Al-jamal, N. F. (2019). Modeling resilient modulus of fine-grained materials using different statistical techniques. *Transportation Geotechnics*, *21*(February), 100263. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100263

Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. K., & Gurland, J. (1956). Relationship between the California Bearing Ratio and The Iowa Bearing Value. *Methods for Testing Engineering Soils*, *59*(December), 257–293. http://publications.iowa.gov/22209/1/IADOT_IHRB_Bulletin_21_Methods_Testing_Engineering_Soils_1960.pdf

Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. K., & John, G. (1960). Relationship between the California Bearing Ratio and The Iowa Bearing Value. In D. T. Davidson (Ed.), *Methods for testing engineering soils* (Vol. 59, Issue December, pp. 257–293). Iowa State University of Science and Technology. http://publications.iowa.gov/22209/1/IADOT_IHRB_Bulletin_21_Methods_Testing_Engineering_Soils_1960.pdf

Malaver Soto, N. M. (2018). *Lineamientos básicos para la clasificación de suelos tropicales en Colombia orientado a pavimentos* [Universidad Católica de Colombia]. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22378/1/TESIS VFinal%2830-nov-2018%29 ENTREGADA.pdf

Marson, L. A. (2004). *Correlações entre ensaios CBR e Mini-CBR para solos lateríticos de textura fina*. Insitituto Tecnológico de Aeronáutica.

Martinez, J. O., Gerena, C., & Nicely, A. (2013). *Correlación PDC Con CBR Para Suelos En La Localidad De Suba*. http://unimilitar-dspace.metabiblioteca.org/handle/10654/3653

Mendoza, C., & Caicedo, B. (2019). Elastoplastic framework of relationships between CBR and Young's modulus for fine grained materials. *Transportation Geotechnics*, *21*(September), 100280. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100280

Mohammad, L. N., Herath, A., Abu-Farsakh, M. Y., Gaspard, K., & Gudishala, R. (2007). Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *19*(11), 986–

992. https://doi.org/10.1061/40776(155)2

Montaña, D., & Durán, J. E. (2013). *Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá*. 1.

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia.

Moossazadeh, J., & Witczak, M. (1981). Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior. *Transportation Research Record*, *810*, 9–17. http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1981/810/810-002.pdf

Moreno Rubio, J. (2005). *Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas* [Universidad Politecnica De Catalunya]. http://hdl.handle.net/2099.1/3252

Narzary, B. K., & Ahamad, K. U. (2018). Estimating elastic modulus of California bearing ratio test sample using finite element model. *Construction and Building Materials*, *175*, 601–609. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.228

Nogami, J. S. (1972). Determinação do índice de suporte Califórnia com equipamentos de dimensões reduzidas. *II Reunião Das Administrações Rodoviárias*.

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1979). Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, *19*(1), 196–199. https://doi.org/10.1007/BF02600475

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1981). UMA NOVA CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PARA FINALIDADES RODOVIÁRIAS. *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais Em Engenharia*, 13.

Office of Minnesota road research. (1996). *User guide to the Dinamic cone penetrometer*. http://www.dot.state.mn.us/materials/researchdocs/User_Guide.pdf

Orozco Rojas, L. F. (n.d.). Presentación SCI. *Asentamientos de Edificios Altos*, 29.

Paige-Green, P., & Plessis, L. Du. (2009). *THE USE AND INTERPRETATION OF THE DYNAMIC CONE PENETROMETER (DCP) TEST* (Issue September).

Palomino, A., Salazar Ferro, F., Orozco, L. F., & Salcedo, M. (2016). *Tilting of a Large Apartment Building in Bogota, Colombia, Due to Foundation Failure and the Recuperation of Its Verticality*. 17–28. https://doi.org/10.1061/9780784480076.003

Reddy, C. N. V. S., & Moorthy, N. V. R. (2005). Significance of bearing capacity of clayey subgrade in flexible pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, *6*(3), 183–189. https://doi.org/10.1080/10298430500137194

Rehman, Z. U., Khalid, U., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2017). Prediction of CBR value from index properties of different soils. *Technical Journal University of Engineering and Technology Taxila, Pakistan*, *22*(August), 17–26.

Requiz Cristóbal, J. O. (2018). *Aplicación de la metodología MCT en estudio de suelos tropicales con fines de pavimentación en la selva baja del Perú. Caso: caminos vecinales de madre de dios.* [Universidad Nacional Federico Villarreal]. http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2145

Rojas lópez, M. D., & Ramírez Muriel, A. F. (2018). Inversión en infraestructura vial y su impacto en el crecimiento económico : Aproximación de análisis al caso infraestructura en colombia (1993-2014). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *17*(32), 109–128. https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a6

Rondón Quintana, H., Fernández Gómez, W., & Hernández Noguera, J. (2013). Influencia de la rigidez de la subrasante y las capas granulares sobre la vida a fatiga de mezclas asfálticas. *Tecno Lógicas*, *31*, 53–72. http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n31/n31a04.pdf

Sánchez, F., & Campagnoli, S. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras: Guía práctica para lo estudios y diseños* (Escuela Colombiana de Ingeniería (ed.); 1ra ed.).

Saurabh, J., Joshi, Y. P., & Goliya, S. S. (2013). Design of Rigid and Flexible Pavements by Various Methods & Their Cost Analysis of Each Method. *International Journal of Engineering Research and Applications*, *3*(5), 119–123.

Saxena, R. K. (1991). Can failures be minimized and pavement performance improved by adequately designing and constructing road subgrades. *Indian Roads Congress*, *52*(2), 263–311.

Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). RESILIENCE CHARACTERISTICS OF SUBGRADE SOILS AND THEIR RELATION TO FATIGUE FAILURES IN ASPHALT PAVEMENTS. *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Supplement*, 77–113. https://trid.trb.org/view/716093

Seed, H. B., Chan, C. K., & Monismith, C. L. (1955). EFFECTS OF REPEATED LOADING ON THE STRENGTH AND DEFORMATION OF COMPACTED CLAY. *Thirty-Fourth Annual Meeting of the Highway Research Board*, *34*, 541–558. https://trid.trb.org/view/126583

Seed, H. B., Mitry, F. B., Monismith, C. L., & Chan, C. K. (1967). PREDICTION OF FLEXIBLE PAVEMENT DEFLECTIONS FROM LABORATORY REPEATED-LOAD TESTS. *Trasnportation Research Board*, *35*, 117. https://trid.trb.org/view/104508

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Mapa Geológico Colombiano 2017*.

Souza, R. A. De. (2007). *Estudo Comparativo dos Ensaios de CBR e Mini-CBR para Solso de Uberlândia-MG* [Universidad Federal de Uberlândia]. https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14236/1/RASouzaDISPRT.pdf

Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3 ed.). John Wiley & Sons.

The Asphalt Institute. (1989). *The Asphalt Handbook Manual Series No. 4*.

Vidal, J., & Osorio, R. (2002). Módulo resiliente de suelos finogranulares. *Revista Universidad Eafit*, *125*, 63–72.

Wonnacott, T., & Wonnacott, R. (1993). *Fundamentos de estadística para administración y economía* (1a ed). Limusa.

World Economic Forum. (2019). The Global Competitiveness Report 2019. In *World Economic Forum*. http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf

Wu, S., & Sargand, S. (2007). *USE OF DYNAMIC CONE PENETROMETER IN SUBGRADE AND BASE ACCEPTANCE* (Vol. 14817, Issue 14817).

Yau, A., & Quintus, H. L. Von. (2002). *Study of LTPP laboratory resilient modulus test data*

and response characteristics. *FHWA-RD-02-051*, 173. https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/reports/02051/02051.pdf

Zhou, C., Huang, B., Drumm, E., Shu, X., Dong, Q., & Udeh, S. (2015). Soil resilient modulus regressed from physical properties and influence of seasonal variation on asphalt pavement performance. *Journal of Transportation Engineering*, *141*(1), 1–9. https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000727

2.0 Situación actual y Revisión Bibliográfica

2.1 Situación actual

La inversión en infraestructura de transporte de carretera es clave para el desarrollo del sector y de la economía, dado que permite la conectividad de las personas y el acceso a los distintos servicios públicos y mercados. Los beneficios de la inversión en la infraestructura vial se reflejan en la competitividad, la eficiencia y los costos agregados de la economía (CEPAL, 2018).

En un país donde la mayor parte del transporte de carga se realiza por carretera (del orden del 72%) (Banco Interamericano de Desarrollo, 2015), el déficit en desarrollo de infraestructura vial se ubica como uno de los principales obstáculos para mejorar los indicadores productivos y competitivos, que impactan sobre el desarrollo económico del país (Rojas lópez & Ramírez Muriel, 2018).

De acuerdo con el reporte global de competitividad del World Economic Forum, (2019), Colombia se ubica en el puesto 81 de 141 países analizados a nivel mundial y sexto en Sur América, según la clasificación correspondiente al pilar de infraestructura: Calidad y conectividad de la infraestructura de transporte y la infraestructura para servicios públicos.

> En conectividad vial, Colombia se ubica en el puesto 97 con un puntaje de 65.4. En Sur América, Chile lidera esta clasificación con un puntaje de 95.8 y a nivel global, Estados Unidos obtuvo 100 puntos.
>
> En calidad de las vías, Colombia se ubica en el puesto 104 con un puntaje de 39.7. En Sur América, Chile lidera esta clasificación con un puntaje de 70.1 y a nivel global, Singapur tiene un puntaje de 90.9.

El Banco Mundial presenta bianualmente un informe sobre el índice de desempeño logístico donde, entre otros aspectos, se evalúa la calidad de la infraestructura relacionada con el comercio y el transporte. Para la calificación se tiene un rango de 1 a 5 en donde 5 es la calificación más alta. En el informe presentado para 2018, Colombia se ubicó en el puesto 71 con un puntaje de 2.67 (2.49 en 2016), una cifra muy por debajo de los países líderes en la clasificación como Alemania (4.37), Japón

(4.25) y Suecia (4.24). Para Sur América, Colombia se ubica quinta detrás de: Chile (3.21), Brasil (2.93), Argentina (2.77) y Ecuador (2.72) (Grupo Banco Mundial, 2018).

Teniendo en cuenta los dos reportes presentados por entidades globalmente reconocidas en cuanto a la infraestructura para el transporte, Colombia se ubica en el quinto lugar del continente. Lo anterior representa una necesidad de inversión e innovación para los estudios, diseños y construcción de infraestructura vial para situar al país en la vanguardia del continente.

De acuerdo con las estrategias del Grupo BID con Colombia (Banco Interamericano de Desarrollo, 2019) el país para el 2019 tenía una densidad de la red vial pavimentada baja con 530 km por millón de habitantes, menor que países como Brasil (1,066 km) y México (1,188 km) y mucho menor que Francia (15,945). De igual forma, el índice de calidad de carreteras de Colombia representa el 50 % del valor atribuido a Chile y clasifica 25% por debajo de la región. El país invirtió, en promedio, menos del 1% del PIB entre 2002 y 2008, entre 1.5% y 2.7% entre 2009 y 2014, se presentó un leve descenso entre 2015 y 2016 y se tiene una inversión del 1.3% para el periodo del 2017 al 2020 (Clavijo et al., 2013).

En el marco de las estrategias planteadas para mejorar la condición actual de la infraestructura vial se encuentran: aumento de la inversión pública en el sector transporte a un valor cercano al 3.5% del PIB anual, incluyendo la pavimentación de la totalidad de la red primaria y secundaria, la expansión de la red vial nacional primaria, la mejora de la totalidad de la red terciaria (80,000 km pavimentados nuevos) y el desarrollo de infraestructura resiliente para disminuir los impactos y costos del cambio climático, con diseños adaptados a las condiciones cambiantes de los terrenos, cursos de agua y clima (Banco Interamericano de Desarrollo, 2015, 2019).

En el informe “Estado *de la red vial criterio técnico*” del INVIAS, para el segundo semestre de 2018 se incluye el análisis, únicamente de la red vial primaria del país (7.019.56 Km), donde el 14.87% de la red se encontraba sin pavimentar. Adicionalmente, de la red vial pavimentada el 34.28% se encontraba en regular estado, el 17.68% en mal estado y el 0.86% en muy mal estado (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2018).

De acuerdo con el inventario y estado actual de la malla vial de la ciudad presentado en el geoportal del IDU, al 31 de diciembre del 2019, el 50% del total de la malla vial de Bogotá se encontraba en buen estado, el 34% en regular estado y el 16% en mal estado; para la malla vial urbana de la ciudad se tiene el 53% en buen estado, el 34% en regular estado y el 13% en mal estado; finalmente, la malla vial rural tiene un 13% en buen estado, un 40% en regular estado y un 47% en mal estado.

Dentro del Plan distrital de desarrollo 2020-2024 se espera construir 146 km (arterial, intermedia, regional y rural) junto con la conservación de 938 km existentes en la malla vial de la ciudad (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020).

Dentro del plan operativo anual de inversiones para el 2021, el instituto de desarrollo urbano (IDU) tiene un presupuesto de $ 1’807.641’159.000 para la movilidad segura, sostenible y accesible: Construcción y conservación de vías y ciclo infraestructura para la movilidad sostenible e infraestructura para el sistema integrado de transporte público sostenible (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2021).

Las cifras anteriormente presentadas ratifican el compromiso de las entidades distritales con el desarrollo de la infraestructura vial de la ciudad y representa una demanda importante de estudios técnicos para el diseño de las estructuras de pavimento. Teniendo en cuenta que la caracterización de la subrasante es un requisito indispensable para los diseños, la optimización de los ensayos requeridos juega un papel fundamental en pro de ahorrar recursos y tiempo siempre y cuando se realice de una forma técnica y con altos grados de confiabilidad.

En este aspecto, surge la inquietud de si el ensayo Mini-CBR puede ser una alternativa a los ensayos tradicionales que determinan el módulo resiliente de la subrasante de forma directa (ensayo Mr) o indirecta (ensayos estáticos) como insumo para el diseño de pavimentos.

El Mini-CBR fue desarrollado en la Universidad del Estado de Iowa bajo el nombre de Mini Bearing test (Lafleur et al., 1956) y posteriormente retomado por Nogami (1972). Fue adoptado en Brasil en el año 1997 mediante la normativa técnica DNER-ME 254/97 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997) para el cálculo del índice mini-CBR. Este procedimiento hace parte de los ensayos miniatura propuestos en la clasificación MCT (*Miniatura, Compacto e Tropical*) para los suelos

tropicales de la región (Nogami & Villibor, 1981), esta clasificación será abordada más adelante.

Es importante aclarar que todos los artículos e investigaciones existentes sobre este ensayo fueron realizados sobre suelos lateríticos, debido a que es un ensayo empleado para la clasificación MCT. El propósito de este trabajo es determinar la aplicabilidad del ensayo mini-CBR en suelos arcillosos blandos como los que se encuentran en la ciudad de Bogotá D.C.

En Colombia, las investigaciones sobre este ensayo son prácticamente nulas. La única referencia encontrada es un documento de Malaver Soto (2018) en donde se presentan los lineamientos básicos para la clasificación de suelos tropicales en Colombia orientado a pavimentos. En este se hace el primer acercamiento a la clasificación MCT y los ensayos miniatura para los suelos lateríticos de la Orinoquía y la Amazonía Colombianas. Sin embargo, el enfoque expuesto en este documento es netamente conceptual y no se llevó a la práctica.

2.2 Revisión bibliográfica

La finalidad de los ensayos estáticos es determinar la capacidad de soporte de la subrasante, expresada comúnmente en CBR para, posteriormente, determinar el módulo resiliente de acuerdo con las diversas correlaciones que existen en la literatura; por otro lado, los ensayos dinámicos permiten determinar el módulo resiliente de manera directa.

En la “Guía de diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.”, la cual es la norma vigente a la fecha para la ciudad de Bogotá, se especifica que para la caracterización de la subrasante es necesario realizar ensayos de clasificación de suelos y ensayos de resistencia portante. Dentro de estos últimos, se pueden realizar ensayos de placa, CBR, cono dinámico, triaxial y módulo de resiliencia (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) & Universidad Nacional de Colombia, 2013).

Para proyectos viales en la Ciudad de Bogotá, el IDU ha desarrollado diferentes anexos técnicos para la ejecución de los diseños. A pesar de que cada anexo técnico es particular para cada proyecto, las recomendaciones y requisitos de diseños se

mantienen constantes. En cuanto a la caracterización de la subrasante especifica que el módulo de la subrasante de diseño podrá ser obtenido en función de las características de resistencia mecánica del suelo (relación de soporte de California, CBR), (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2017).

El ensayo mini-CBR hace parte de los ensayos miniatura propuestos en la clasificación MCT (*Miniatura, Compacto e Tropical*) para los suelos lateríticos y tropicales de la región (Nogami & Villibor, 1981). Esta clasificación no se incluye dentro del alcance de esta investigación puesto que se requieren ensayos miniatura adicionales (mini—proctor, mini-mcv). Sin embargo, dado que hace parte del contexto del mini-CBR y que todas las investigaciones realizadas hasta la fecha hacen referencia a esta clasificación, se consideró conveniente realizar una aproximación al tema para contextualizar al lector.

2.2.1. Clasificación MCT (“miniatura, compactado e tropical”)

Los métodos tradicionales de diseño de pavimentos no han obtenido resultados satisfactorios, ya que, frecuentemente las recomendaciones de diseño no coinciden con el comportamiento real de los suelos tropicales. Adicionalmente, hay diferencias considerables entre las propiedades hidráulicas y mecánicas inferidas a partir de las clasificaciones tradicionales (AASHTO y USCS) y las determinadas directamente mediante ensayos (Nogami & Villibor, 1981).

En la Figura 2-1 se puede apreciar la relación entre el índice de grupo (AASHO M 145-49) y el CBR (humedad óptima, compactación estándar y 4 días de inmersión) para muestras de arcillas arenosas lateríticas (1), arcillas lateríticas (2) y suelos saprolíticos de gneis-granito y Filitas (3) de la vía Bandeirantes en Brasil. Adicionalmente, se muestran las correlaciones presentadas por Ruiz (1958) y AASHO (1962).

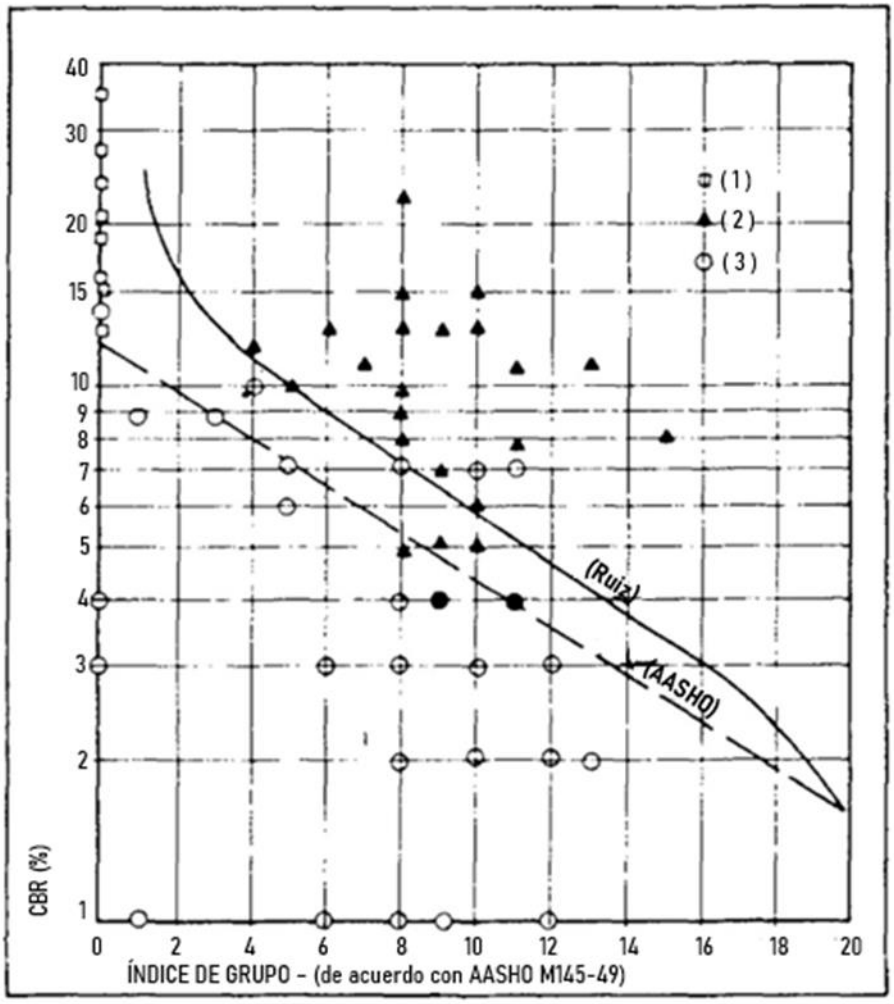


Figura 2-1: Relación CBR – Índice de grupo para muestras de la vía Bandeirantes.

Fuente: adaptado de (Nogami & Villibor, 1979)

Como se observa en la Figura 2-1, ninguna de las correlaciones establecidas para suelos no tropicales utilizadas para la época presentaba un aceptable ajuste. En los suelos lateríticos generalmente se obtienen valores superiores a los estimados mientras que en los saprolíticos los valores son inferiores.

Adicionalmente, Nogami & Villibor (1979) presentaron la variación de diferentes propiedades para dos muestras que se encuentran en la misma clasificación AASHO y USCS pero que una es saprolítica y la otra es laterítica. En la Figura 2-2 se presenta una muestra que clasifican como A-7-5 y ML y en la Figura 2-3 una muestra que clasifica como A-4 y CL.

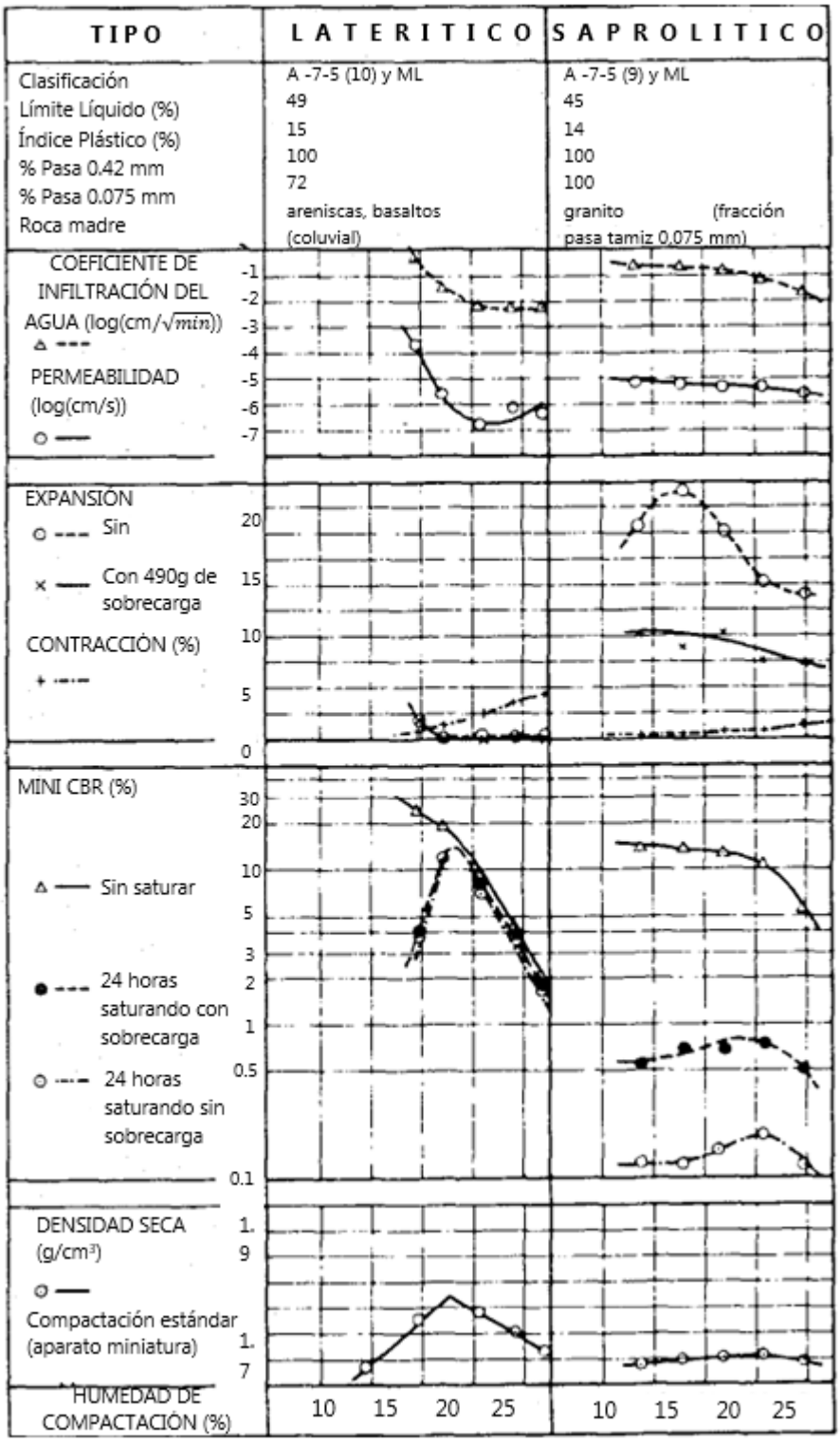


Figura 2-2: Comparación propiedades muestra laterítica y saprolítica que clasifican en el mismo grupo según AASHO (A-7-5) y USCS (ML).

Fuente: adaptado de Nogami & Villibor (1979)

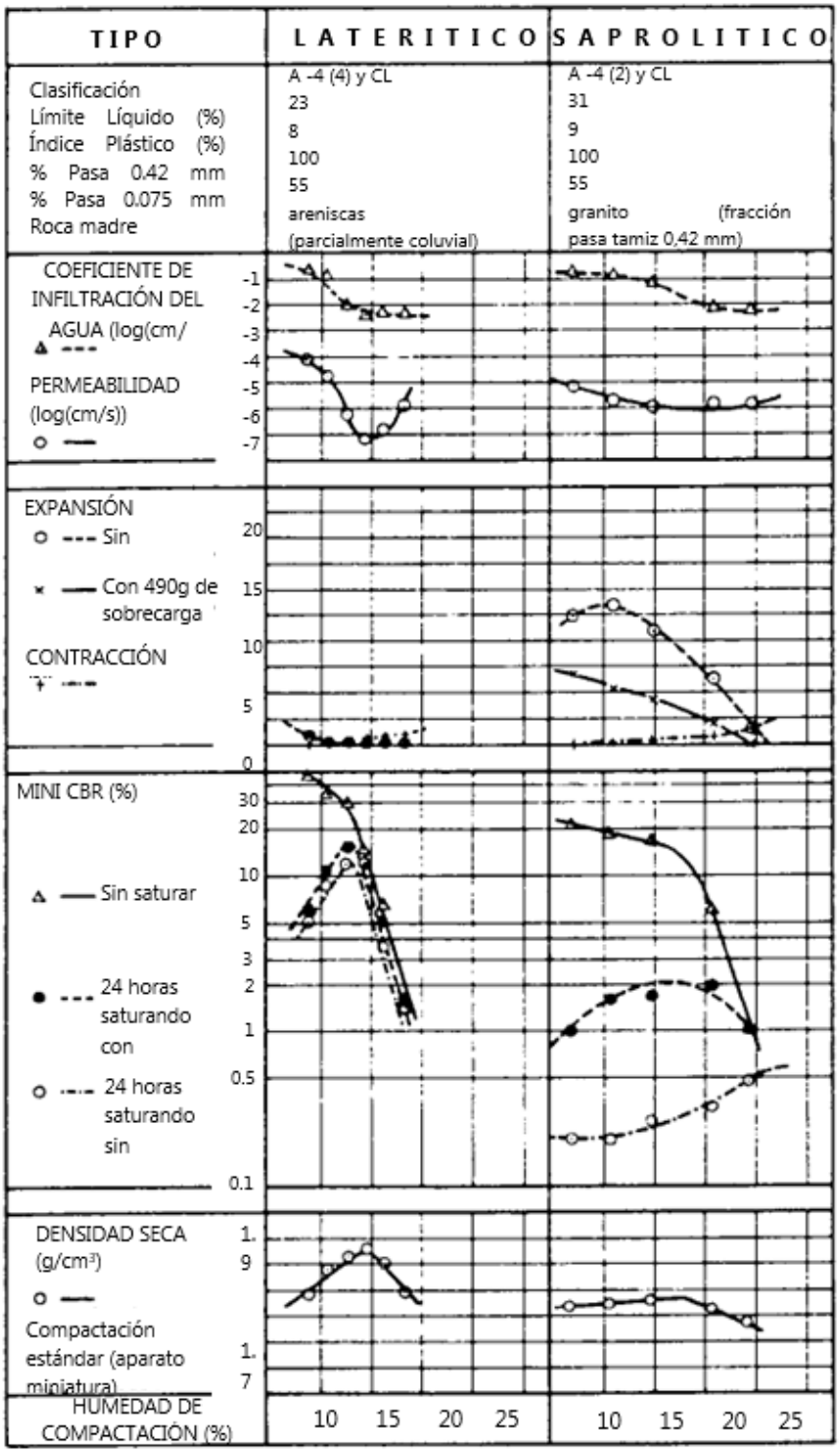


Figura 2-3: continuación Comparación propiedades muestra laterítica y saprolítica que clasifican en el mismo grupo según AASHO (A-4) y USCS (CL).

Fuente: adaptado de Nogami & Villibor (1979)

De acuerdo con la Figura 2-2 y Figura 2-3, se puede observar que existen mayores similitudes en las propiedades del suelo entre muestras con el mismo tipo genético de suelos que aquellas con el mismo grupo geotécnico tradicional. Con base en lo anterior, surgió la necesidad de realizar una nueva clasificación que permitiera mediante ensayos, determinar de una manera más precisa el comportamiento de los suelos tropicales.

Los suelos tropicales presentan una aplicación muy limitada en pavimentos de la clasificación de suelos basada en la granulometría, límites de Atterberg y ensayo de CBR tradicional. Teniendo en cuenta estas limitaciones, Nogami & Villibor (1979) presentaron un procedimiento que utiliza un equipo sencillo y muestras de prueba de dimensiones reducidas (50mm de diámetro) con el fin de determinar los parámetros necesarios para el diseño de pavimentos, sin embargo, esta metodología resultaba más compleja que la clasificación tradicional.

En 1981 los mismos autores presentaron una simplificación al introducir una adaptación miniatura del ensayo MCV ("*Moisture Condition Value*") desarrollado por Parsons en 1976, denominada Mini-MCV. La clasificación a partir de entonces se basa en ensayos de laboratorio de compactación y pérdida de masa por inmersión de cuerpos de prueba compactados y de dimensiones reducidas. Adicionalmente, se ejecuta el ensayo de Mini-CBR para la determinación de la capacidad de soporte, el cual está basado en el procedimiento establecido por la Universidad de Iowa (Lafleur et al. 1960) teniendo en cuenta algunas adaptaciones y complementos necesarios para la utilización de muestras reducidas. (Nogami & Villibor, 1981).

Con la adición de este ensayo, la clasificación MCT puede determinar entre otras cosas:

- Familia de curvas de compactación.
- Valor de humedad de compactación.
- Capacidad de soporte.
- Orden de magnitud de la permeabilidad.
- Características expansivas y cohesión.

En la Figura 2-4 se presenta un flujograma en el que se muestran los grupos de ensayos de laboratorio e in-situ comprendidos en la metodología MCT.

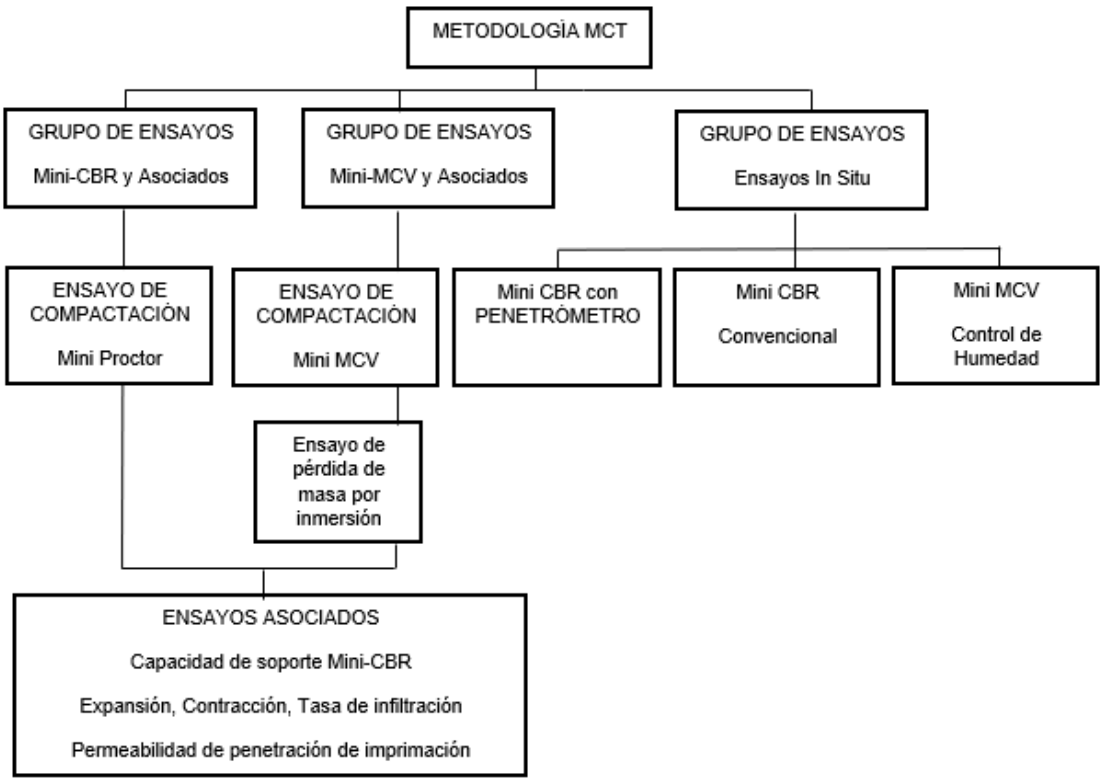


Figura 2-4: Flujograma grupos de ensayos metodología MCT.

Fuente: adaptado de (Fernandes, 2006)

Para poder aplicar la metodología de clasificación MCT es necesario que el 95 % de la muestra analizada pase el tamiz de 2.0 mm, lo anterior debido a las dimensiones reducidas del cilindro de compactación del ensayo Mini-MCV (Barroso, 2002).

En la clasificación MCT, las muestras analizadas se separan en 2 clases principales según su comportamiento: laterítico y no-laterítico (saprolíticos), de acuerdo con Marson (2004) se diferencian de la siguiente manera:

- *SUELOS LATERITICOS*: Son considerados suelos superficiales residuales maduros o transportados, que se forman a partir del proceso de laterización, meteorización tropical también llamada lixiviación, proceso que se da en condiciones bien drenadas, clima húmedo y tropical
- *SUELOS SAPROLITICOS*: son considerados suelos residuales que se forman de la disgregación y/o descomposición de las rocas in situ conservando sus características de origen los cuales pueden ser del tipo arenoso, limoso y/o arcilloso

Las muestras analizadas son clasificadas en 7 subgrupos (Nogami & Villibor 1995) de acuerdo con los resultados de los ensayos y su comportamiento laterítico, (Fernandes, 2006):

- *Arenas lateríticas (LA):* Arenas de comportamiento laterítico con bajo contenido de finos, típicas del horizonte B de los suelos pedológicamente conocidos como arenas cuarzosas.
- *Suelos arenosos lateríticos (LA'):* Suelos típicamente arenosos y constituyentes del horizonte B de los suelos conocidos pedológicamente en Brasil por lato suelos arenosos y suelos podzólicos o podzolizados arenosos de textura media.
- *Suelos arcillosos lateríticos (LG'):* Arcillas y arcillas arenosas, que constituyen el horizonte B de los suelos conocidos pedológicamente en Brasil por lato suelos, suelos podzólicos y tierra roja estructurada. Cuando presenta un porcentaje elevado de arena, tiene un comportamiento semejante a los suelos del grupo LA'.
- *Arenas no lateríticas (NA):* Arenas, limos y mezcla de arenas y limos, en los que los granos son constituidos principalmente por cuarzo y/o mica. Prácticamente no tiene finos arcillosos cohesivos sedimentarios caoliníticos.
- *Suelos arenosos no lateríticos (NA'):* Compuestos granulométricamente por mezclas de arenas cuarzosas (o minerales de propiedades similares) con finos que pasan el tamiz 0.075mm de comportamiento no laterítico. Genéticamente, los tipos más representativos son suelos saprolíticos originados de rocas ricas en cuarzo como granito, gneis, areniscas y cuarzos impuros.
- *Suelos arcillosos no lateríticos (NS'):* Suelos saprolíticos limo arenosos particulares, resultado del intemperismo tropical de las rocas ígneas y metamórficas, de constitución predominantemente feldespática, micácea y cuarzosa. Las variedades más ricas en arena cuarzosa pueden tener características mecánicas e hidráulicas que se aproximan a las de los suelos del grupo NA'.
- *Suelos arcillosos no lateríticos (NG'):* Comprende los suelos saprolíticos arcillosos, provenientes de rocas sedimentarias

arcillosas o cristalinas pobres en cuarzo y pobres en anfíbolitas, piroxenos y feldespatos cálcicos.

Para la clasificación de una muestra dentro de cada subgrupo (Figura 2-5) se necesita el coeficiente c' y el índice e', el primer parámetro está asociado al comportamiento arcilloso y el segundo al comportamiento laterítico del suelo. Para determinar sus valores es necesario realizar los ensayos de Mini-MCV y pérdida de masa por inmersión respectivamente.

El coeficiente c' corresponde a la pendiente de la curva de deformabilidad que tiende a un valor de Mini-MCV igual a 10; el coeficiente e' se calcula a partir de los parámetros d' (pendiente de la rama seca de la curva de compactación, correspondiente a 12 golpes del ensayo Mini-MCV) y a la pérdida de masa por inmersión P_i (porcentaje de la masa seca desprendida durante la inmersión respecto a una masa patrón)

$$P_i = 100 * \frac{P_s}{P_p} \qquad (2\text{-}1)$$

Donde,

P_s: Masa seca de la parte desprendida durante la inmersión.

P_p: Masa seca de 10 mm de la muestra, luego de su compactación.

Para el ensayo se coloca el molde del ensayo Mini-MCV de forma horizontal dentro de un recipiente con agua, la muestra debe quedar 1 cm por fuera del molde y dejar en inmersión por 12 horas. Si la porción de la masa que sale del molde tiene forma de un único cilindro plano (galleta), su masa seca debe ser multiplicada por 0.5.

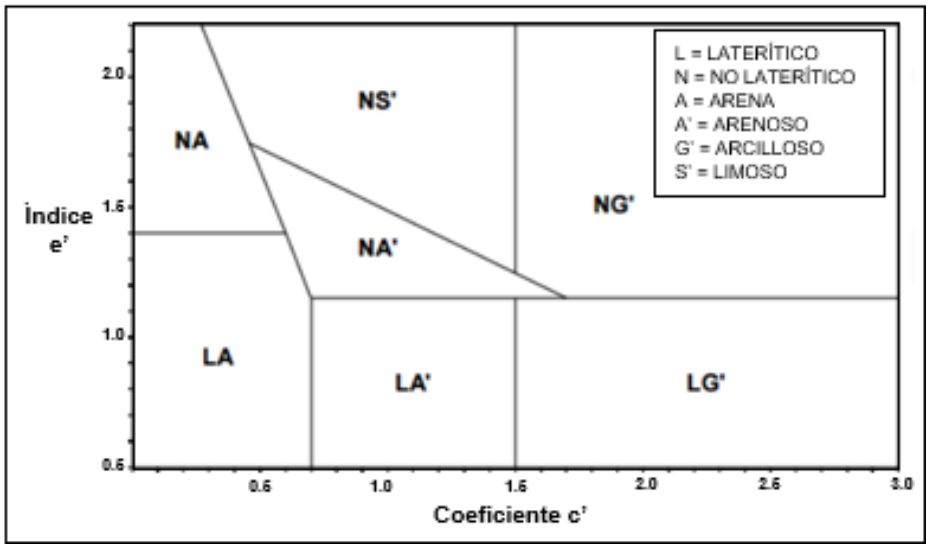


Figura 2-5: Ábaco de la clasificación MCT.

Fuente: (Nogami & Villibor, 1981)

Correlación Clasificaciones MCT, AASHTO y UCSC

De acuerdo a Nogami & Villibor (1995), los suelos caracterizados mediante MCT tienen las siguientes equivalencias con los sistemas de clasificación tradicionales (Escobar Toro, 2011):

Tabla 2-1: Equivalencia sistemas de clasificación MCT, AASHTO y UCSC.

Granulometría típica		Arcillas Limos	Arenas Limosas	Limos Limos Arenosos	Arcillas Arcillas arenosas Arcillas limosas Limos arcilloso	Arenas Limosas	Arenas Arcillosas	Arcillas Arcillas arenosas Arcillas limosas Limos Arcilloso
Comportamiento		N = No Lateríticos				L = Laterítico		
Grupo MCT		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Grupos tradicionalmente obtenidos de muestras clasificadas en grupos MCT discriminados en tipos de columnas	USCS	SP SM	SM SC ML	SM CL ML MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
	AASTHO	A-2	A-2 A-4 A-7	A-4 A-5 A-7-5	A-6 A-7-5	A-2	A-2 A-4	A-6 A-7-5

Fuente: Nogami & Villibor (1995) en (Escobar Toro, 2011)

De acuerdo con la Tabla 2-1 se puede observar que una muestra de suelo clasificada como un único tipo en las clasificaciones tradicionales puede tener diferentes comportamientos y propiedades para la clasificación MCT.

Por ejemplo, una muestra que clasifica como A-2 (AASHTO) tiene 4 posibilidades de clasificación según MCT (NA, NA', LA y LA'), de igual manera, una muestra que clasifica como MH (USCS) tiene 3 posibles clasificaciones según MCT (NS', NG' y LG'). Lo anterior demuestra la necesidad planteada por Nogami & Villibor (1981) de realizar una clasificación más detallada y precisa para los suelos tropicales existentes en Brasil.

2.2.2. Ensayo Mini-CBR

El mini-CBR se presenta como una alternativa para determinar el valor de la capacidad de soporte de un suelo de subrasante al reducir el tiempo y la cantidad de muestra necesaria para el ensayo frente a la metodología tradicional. Requiz (2018) cuantificó algunas de estas ventajas: para el ensayo miniatura se requiere únicamente el 14% de la muestra de suelo y el 94% del tiempo de ensayo comparado con el tradicional. Existe una reducción considerable de tiempo y energía en la extracción de muestra. Assali, Fortes, & Cymrot, (2003) demostraron que el ensayo miniatura genera una reducción aproximada del 45% del costo total del ensayo CBR y los resultados obtenidos para diferentes muestras evidenciaron una menor incertidumbre en los ensayos miniatura.

Finalmente, se tienen dos ventajas adicionales no cuantificables: mayor facilidad en la extracción de la muestra a ensayar y menor interferencia del operador a la hora de la compactación debido al tamaño del martillo respecto al molde. La primera ventaja corresponde al tamaño reducido de la muestra la cual puede ser extraída mediante un tubo shelby a cualquier profundidad, logrando atravesar espesores considerables de relleno como los que se encuentran en algunas zonas de la ciudad.

La segunda ventaja se debe a que el diámetro del martillo de compactación es el mismo diámetro interno del molde, por tal motivo, la superficie queda uniforme con cada golpe. Es importante aclarar que dentro del alcance de este trabajo únicamente se van a evaluar muestras inalteradas, por tal motivo, no es necesario compactarlas, sin embargo, es conveniente enunciar esta ventaja para investigaciones posteriores.

2.2.2.1 *Miniature Bearing Test – Iowa Bearing Value Test (Universidad Del Estado de Iowa)*

La primera aproximación a los ensayos de dimensiones reducidas se dio en la Universidad de Iowa en 1955. Una de las principales objeciones que se tiene con respecto al CBR al caracterizar suelos finos de subrasante es la gran cantidad de material necesario y el tiempo requerido para la preparación de la muestra y el ensayo. Para suelos limosos y arcillosos, especímenes de 2 pulgadas de diámetro por 2 pulgadas de altura se encontraron satisfactorios, es necesario el 5% de muestra y el 25% de tiempo respecto al ensayo tradicional (Chu & Davidson, 1955).

El ensayo puede ser realizado en muestras bajo condición natural o después de inmersión (Figura 2-6), adicionalmente, es posible colocar un anillo como sobrecarga (similar al del CBR). La muestra se deberá tener en inmersión para absorber tanta humedad como le sea posible en un periodo razonable de tiempo y antes de ser ensayada se dejará drenar por cinco minutos.

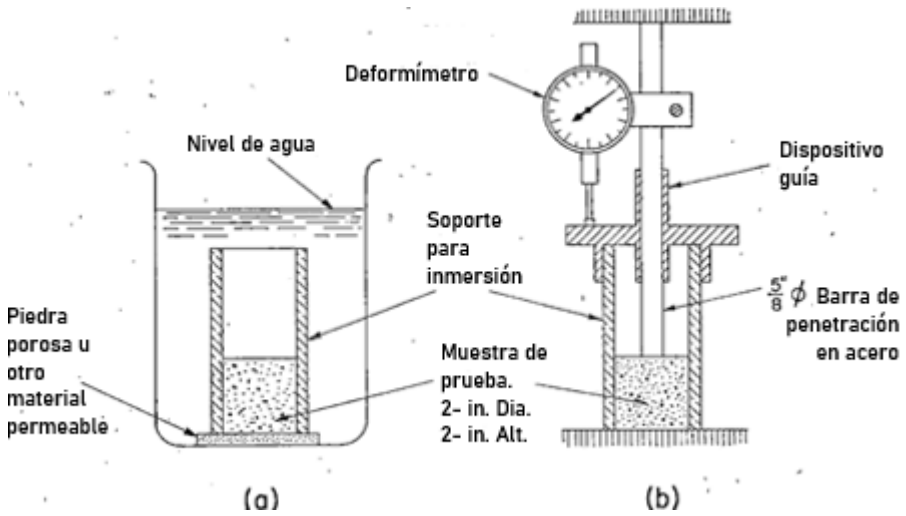


Figura 2-6 Equipo para realizar el ensayo mini-CBR. (a) Montaje para inmersión. (b) Montaje para ensayo.

Fuente: (Chu & Davidson, 1955)

El procedimiento de carga es realizado por un equipo tradicional, la tasa de penetración debe ser de 0.05 pulgadas por minuto y se reporta la carga que produce una penetración de 0.2 in, el resultado se reporta como IBV (*Iowa Bearing Value).* El valor del CBR puede ser determinado a partir del IBV tal como se indica

enseguida, por tal motivo, este último resulta más eficiente a la hora de realizar controles durante la construcción (Lafleur et al., 1956).

Lafleur et al., (1956) realizaron una investigación con el fin de determinar la correlación entre el IBV y el CBR, para esto usaron 9 tipos de suelos del estado de Iowa. Para la condición sin inmersión se prepararon 2 muestras para CBR y 3 para IBV, para la condición con inmersión se ensayaron 2 muestras de CBR (24 horas) y 9 para IBV (24, 48 y 72 horas). A continuación, se presenta una gráfica comparativa entre la carga de ensayo y la penetración para el CBR y el IBV.

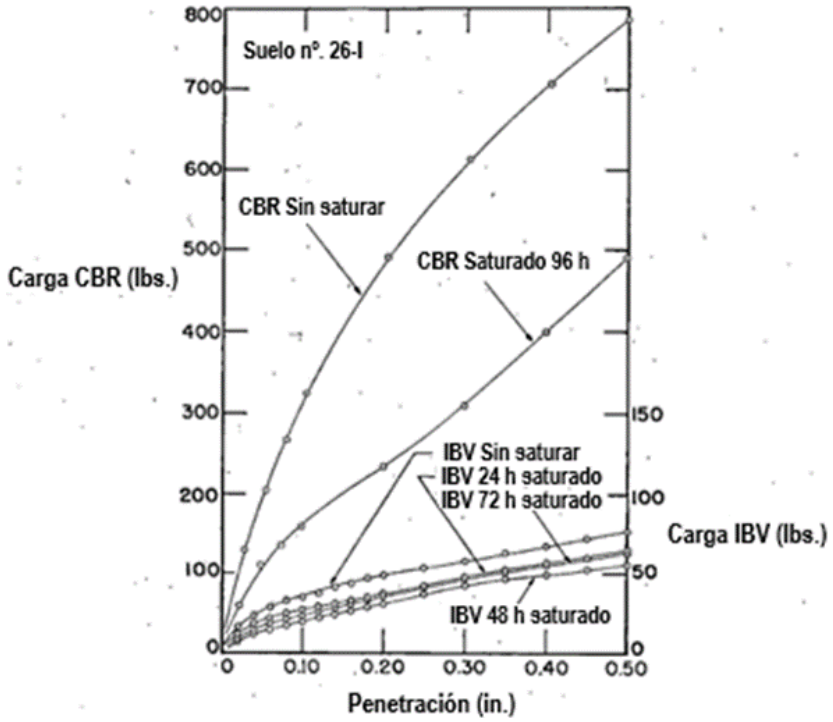


Figura 2-7: Cargas típicas de CBR e IBV contra curvas de penetración para una "Sandy loam" de Iowa. Fuente: (Lafleur et al., 1956)

Partiendo de la premisa que existe una relación lineal entre los logaritmos de las cargas obtenidas para el IBV y el valor de CBR (Figura 2-8) se determinaron las correlaciones entre los dos ensayos. Los resultados de la inmersión por 24 horas para el IBV correlacionan de una mejor manera con los resultados del ensayo de CBR con inmersión por 96 horas.

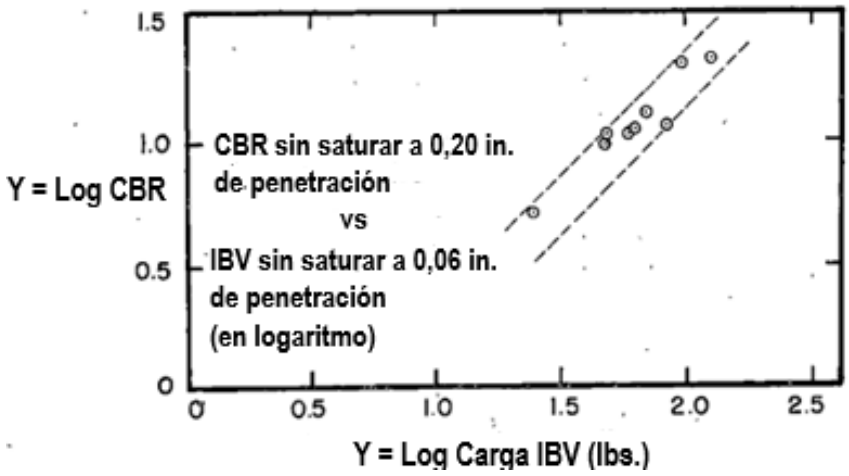


Figura 2-8: Relación entre CBR y cargas del ensayo IBV.

Fuente: (Lafleur et al., 1956)

- CBR a 0.1 in:
  - Sin inmersión: Emplear IBV sin inmersión a una penetración de 0.06 in.

$$Log(CBR) = 1.1035 * Log(IBV) - 0.9675 \qquad (2\text{-}2)$$

  - con inmersión: Emplear IBV con inmersión (24h) a una penetración de 0.08 in.

$$Log(CBR) = 0.9073 * Log(IBV) - 0.6287 \qquad (2\text{-}3)$$

- CBR a 0.2 in:
  - Sin inmersión: Emplear IBV sin inmersión a una penetración de 0.06 in.

$$Log(CBR) = 0.8780 * Log(IBV) - 0.5160 \qquad (2\text{-}4)$$

  - con inmersión: Emplear IBV con inmersión (24h) a una penetración de 0.10 in.

$$Log(CBR) = 1.1058 * Log(IBV) - 0.9739 \qquad (2\text{-}5)$$

La investigación presentada anteriormente es la única realizada para suelos blandos en la revisión bibliográfica presentada, a continuación, se exponen diversos trabajos en los cuales emplearon el ensayo Mini-CBR para suelos tropicales lateríticos.

2.2.2.2 *Mini-CBR (Sao Paulo)*

Nogami (1972) retomó el concepto del Miniatura Bearing Test analizando 13 suelos típicos del estado de Sao Paulo en Brasil. Los suelos analizados pasaban en su totalidad el tamiz #10 y fueron clasificados como: suelo residual de granito, suelo residual de gneis, suelo residual de arenisca, suelo transportado y suelo superficial (Latosol Lato-suelo y podzólico) (Marson, 2004).

En su investigación, desarrolló las siguientes correlaciones entre el Mini-CBR y el CBR empleando diferentes suelos típicos encontrados en el estado de Sao Paulo:

$$\log_{10}(Mini - CBR1) = -0.254 + \log_{10}(C1 * 0.896) \qquad (2\text{-}6)$$

$$\log_{10}(Mini - CBR2) = -0.356 + \log_{10}(C2 * 0.937) \qquad (2\text{-}7)$$

Donde,
Mini-CBR 1: valor de Mini-CBR para una penetración de 2.0 mm

Mini-CBR 2: valor de Mini-CBR para una penetración de 2.5 mm

C1: Carga (kg) correspondiente a una penetración de 2.0 mm

C2: Carga (kg) correspondiente a una penetración de 2.5 mm

El Mini-CBR 1 es equivalente al CBR correspondiente a una penetración de 2.5 mm mientras que el Mini-CBR 2 corresponde a una penetración de 5.0 mm.

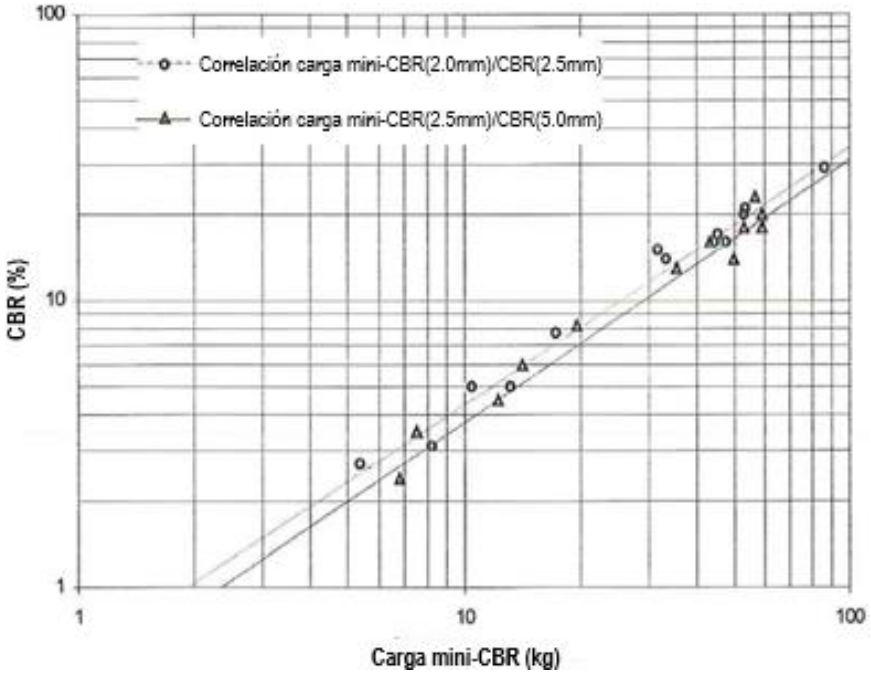


Figura 2-9: Valores de CBR vs cargas en el ensayo Mini-CBR.

Fuente: tomado de (Barros, 2003)

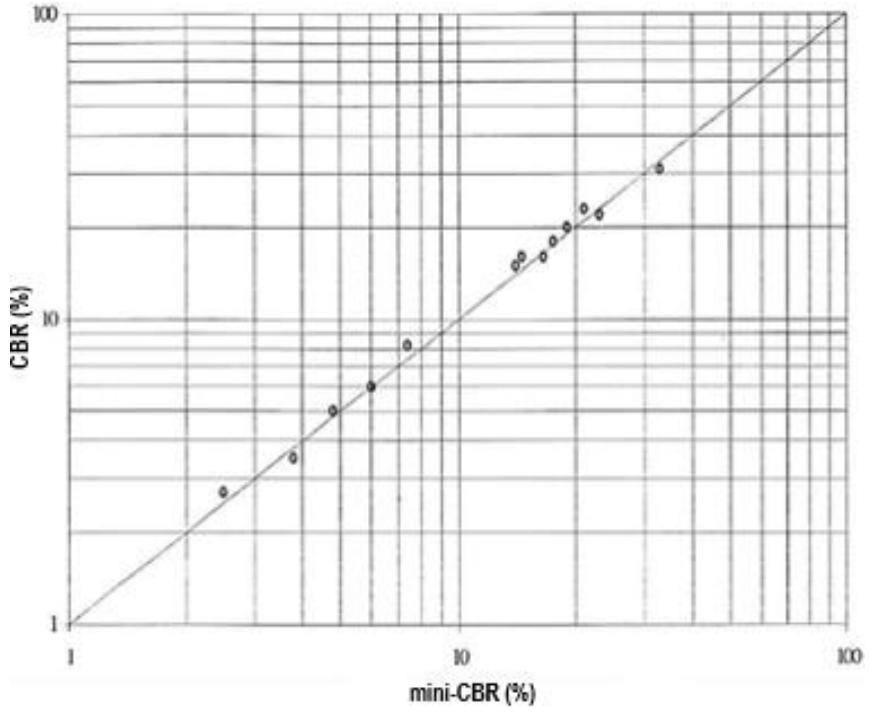


Figura 2-10: Correlación entre los valores de CBR y Mini-CBR, para humedad óptima.

Fuente: tomado de (Barros, 2003)

Con base en esta investigación realizada en los suelos de Sao Paulo, se estandarizó el ensayo Mini-CBR para los suelos tropicales existentes en gran parte de Brasil, a partir de ese momento, otros autores han realizado los ensayos para otras regiones tropicales para comprobar la eficiencia de las correlaciones propuestas. A continuación, se presenta en forma resumida las investigaciones posteriores más importantes.

2.2.2.3 *Investigaciones para correlacionar el Mini-CBR con el CBR.*

Las investigaciones realizadas sobre el ensayo Mini-CBR han sido desarrolladas principalmente en Brasil sobre suelos de tipo laterítico, algunos autores han obtenido buenas correlaciones entre las cargas del Mini-CBR y el CBR tradicional mientras que otros no han obtenido resultados satisfactorios sobre el mismo tipo de suelo. A continuación, se resumen las correlaciones existentes.

2.2.2.3.1 Brasil

Ferreira (1987) analizó 185 muestras de suelo para correlacionar los valores de CBR y Mini-CBR, determinando ecuaciones de correlación para algunos subgrupos de la clasificación MCT (ver Tabla 2-1 y Figura 2-5) y una ecuación general para todas las muestras de la siguiente forma (Marson, 2004; Souza, 2007) :
Para todas las muestras ensayadas (n=185):

$$CBR = 0.788 * Mini - CBR + 2.893 \ (R^2 = 0.515) \qquad (2\text{-}8)$$

Para suelos del grupo LG' (n=50):

$$CBR = 0.944 * Mini - CBR + 1.122 \ (R^2 = 0.597) \qquad (2\text{-}9)$$

Para suelos del grupo LA' (n=12):

$$CBR = 0.807 * Mini - CBR + 3.105 \ (R^2 = 0.37) \qquad (2\text{-}10)$$

Para suelos del grupo NG' (n=52):

$$CBR = 0.922 * Mini - CBR + 1.064 (R^2 = 0.653) \qquad (2\text{-}11)$$

Para suelos del grupo NA' (n=29):

$$CBR = 0.887 * Mini - CBR + 1.170 (R^2 = 0.555) \qquad (2\text{-}12)$$

Para suelos del grupo NS' (n=42):

$$CBR = 0.481 * Mini - CBR + 5.806 (R^2 = 0.132) \qquad (2\text{-}13)$$

Se observa que las ecuaciones planteadas no presentan una gran correlación entre los dos ensayos. De acuerdo con los autores, los valores de CBR obtenidos a partir del ensayo Mini-CBR son más conservativos frente a los obtenidos mediante el ensayo tradicional.

2.2.2.3.2 Sao Carlos – Brasil

(Barros, 2003) realizó la revisión de las relaciones existentes entre los ensayos de Mini-CBR y CBR y determinar alguna nueva relación con el fin de poder utilizar el mini-CBR para el dimensionamiento de pavimentos flexibles.

Para la investigación se analizaron 62 muestras representativas de los suelos del municipio de Sao Carlos, sin especificar sus propiedades ni clasificación, sobre cada muestra se realizaron ambos ensayos.

Al revisar los resultados obtenidos para condición con y sin inmersión y energías normal o intermedia, se obtuvo la nube de puntos que se muestra en la Figura 2-11, Figura 2-12, Figura 2-13 y Figura 2-14, de donde se puede concluir que independiente del tipo de suelo analizado (clasificación MCT) no se tiene una correlación adecuada entre el CBR y el Mini-CBR.

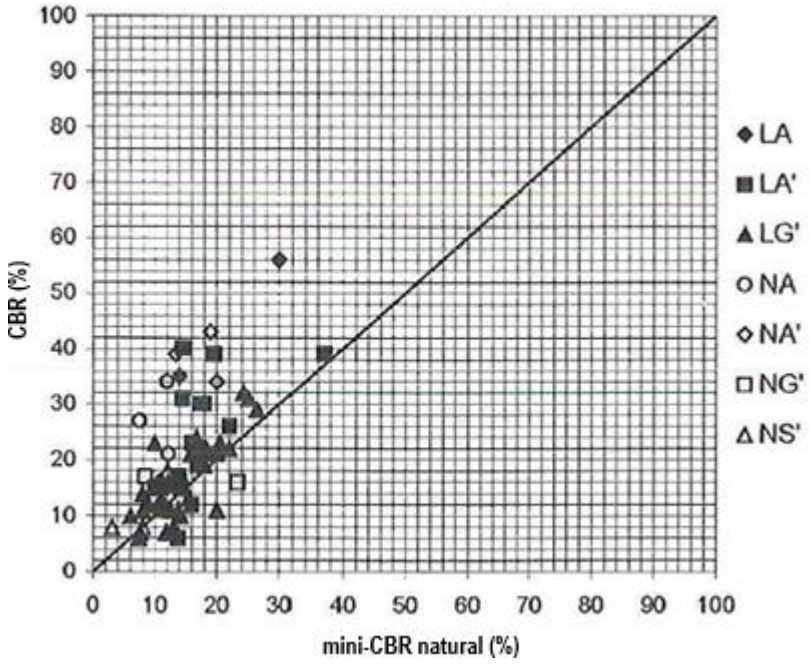


Figura 2-11: Relación Mini-CBR vs CBR (Energía normal), sin inmersión, según clasificación MCT. Fuente: tomado de (Barros, 2003)

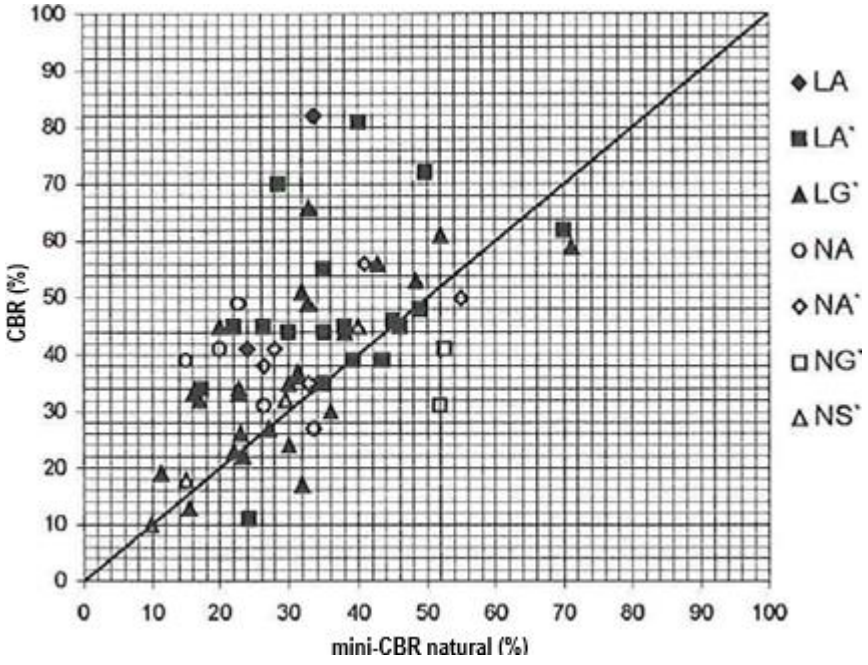


Figura 2-12: Relación Mini-CBR vs CBR (Energía intermedia), sin inmersión, según clasificación MCT. Fuente: tomado de (Barros, 2003)

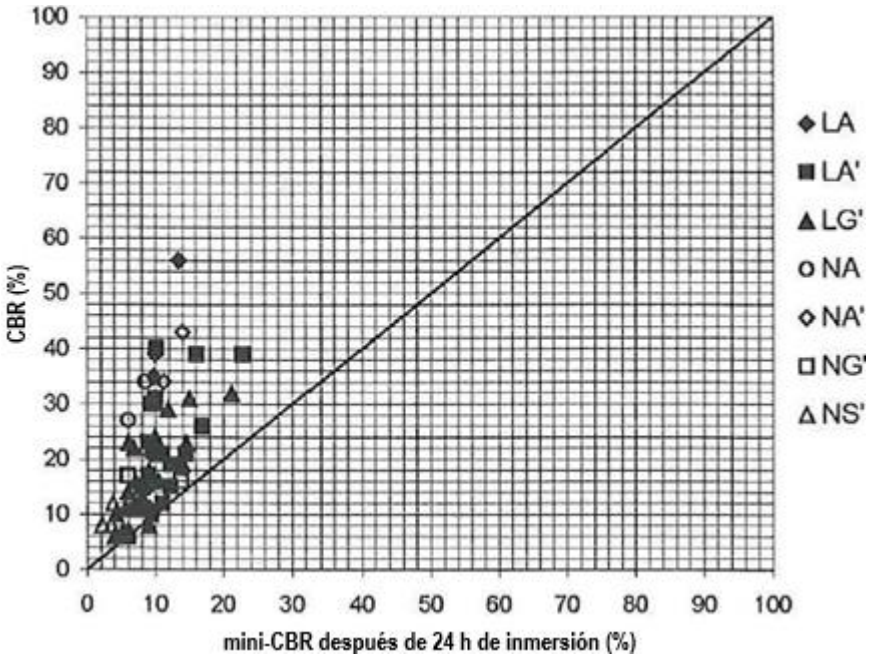


Figura 2-13: Relación Mini-CBR vs CBR (Energía normal), con inmersión, según clasificación MCT. Fuente: tomado de (Barros, 2003)

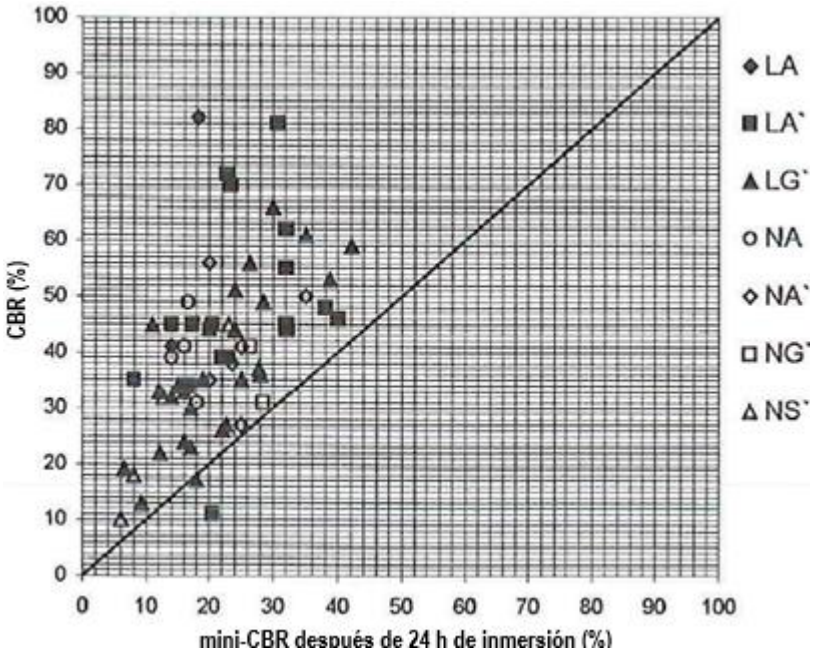


Figura 2-14: Relación Mini-CBR vs CBR (Energía intermedia), con inmersión, según clasificación MCT. Fuente: tomado de (Barros, 2003)

2.2.2.3.3 Maringá, Taubaté y São Carlos – Brasil

Marson, (2004) realizó una investigación con tres tipos de suelos tropicales, lateríticos de textura fina, con las siguientes características (Tabla 2-2):

- Muestra 1: Suelo arcilloso conocido como tierra roja, 83.3% pasa el tamiz #200, proveniente geológicamente del Basalto. (LG')
- Muestra 2: Suelo arcillo arenoso conocido como latosol amarillo, 54.6% pasa el tamiz #200, perteneciente al periodo terciario/cuaternario. (TG')
- Muestra 3: Suelo arenoso conocido como suelo arenoso fino laterítico, 21.8% pasa el tamiz #200, proveniente geológicamente de la arenisca de la formación Bauru (TA'-TA'G').

Tabla 2-2: Propiedades suelos analizados por Marson, (2004)

Muestra		**1**	**2**	**3**
Región		Maringá	Taubaté	Sao Carlos
Designación		Tierra roja	Lato suelo amarillo	Suelo arenoso fino laterítico
Granulometría	**Arena gruesa**	0	0	0
	Arena media	0.5	12.6	17.4
	Arena fina	16.2	32.8	60.8
	Limo	10.4	6.2	4
	Arcilla	72.9	48.4	17.8
Límite liquido		40	50	24
Índice plasticidad		17	20	10
Clasificación AASHTO		A7	A7	A2-4
Clasificación MCT		LG'	TG'	TA'/TA'G'
Clasificación USCS*		CL	CL	SM

* Esta clasificación no fue propuesta por el autor, fue añadida para este trabajo.

Fuente: adaptado de Marson, (2004)

Con los tres tipos de suelos especificados anteriormente, el autor planteó los siguientes análisis:

- Repetitividad del ensayo Mini-CBR: se prepararon 6 muestras del suelo número 3. Se obtuvo una desviación absoluta en la presión aplicada para una penetración de 2.0 mm de 1.69 kg/cm^2 (3.8%) y para una penetración de 1.5 mm de 1.574 kg/cm^2 (4.3%). Estos

resultados demuestran una variación mínima entre los diferentes ensayos, por tal motivo, se tendrá una mayor confiabilidad en los diseños.

- Influencia de la sobrecarga y la inmersión: Se prepararon 8 muestras de cada uno de los tres suelos. Para los suelos lateríticos analizados, la inmersión no representó un efecto significativo sobre la resistencia a la penetración (Variaciones de ± 10%) para los suelos 1 y 2; la muestra 3 presentó mayor resistencia luego de la inmersión por la pérdida de humedad en la cara superior de la muestra y el comportamiento arenoso de la misma.

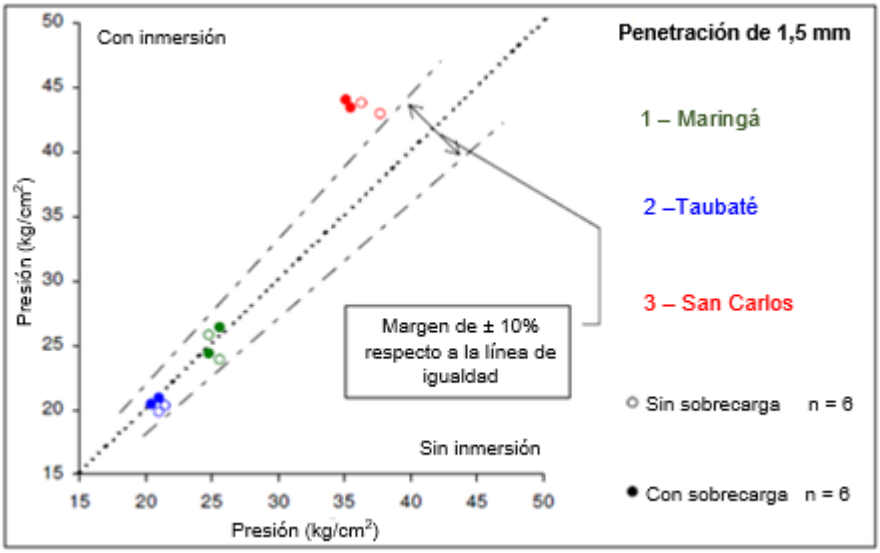


Figura 2-15: Comparación entre las presiones para una penetración de 1.5 mm en ensayos con y sin inmersión (con y sin sobrecarga).

Fuente: (Marson, 2004)

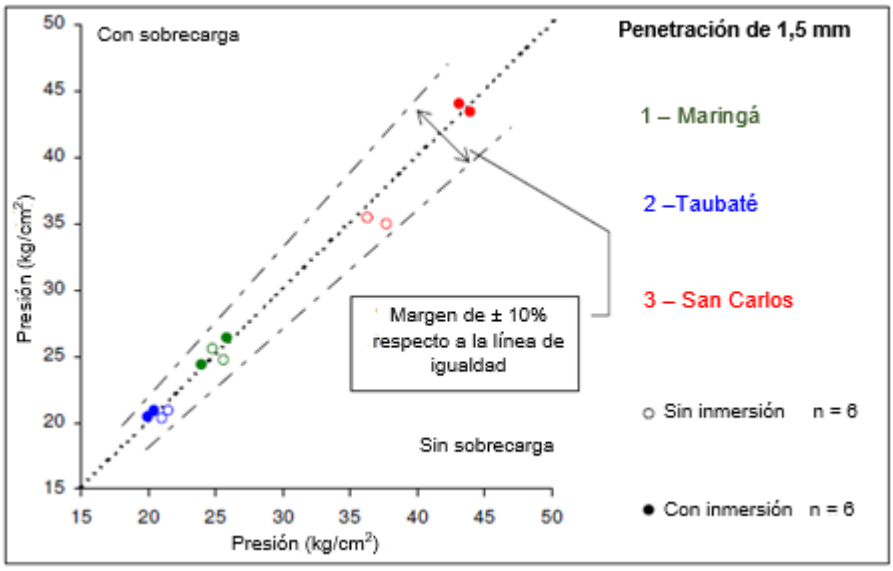


Figura 2-16: Comparación entre las presiones para una penetración de 1.5 mm en ensayos con y sin sobrecarga (con y sin inmersión).

Fuente: (Marson, 2004)

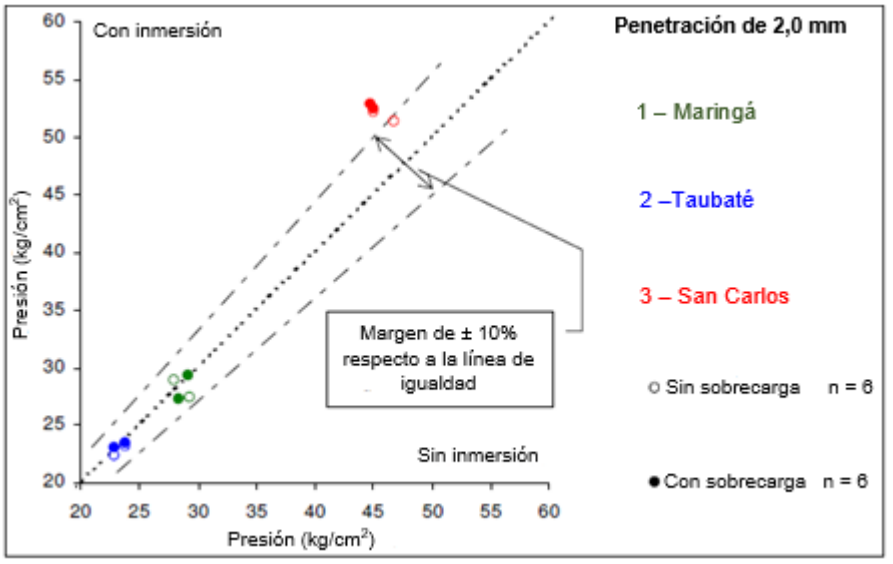


Figura 2-17: Comparación entre las presiones para una penetración de 2.0 mm en ensayos con y sin inmersión (con y sin sobrecarga).

Fuente: (Marson, 2004)

Para las correlaciones entre el ensayo de CBR y Mini CBR el autor preparó 149 muestras, de las cuales, 95 fueron comparados con el tradicional a energía normal y 54 a energía intermedia de compactación.

Los valores de presión analizados corresponden a las penetraciones de: 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 mm. Las correlaciones fueron obtenidas mediante regresión lineal.

A continuación, se presentan algunas gráficas comparativas entre el CBR y las regresiones lineales del Mini-CBR (Compactación de 10 golpes en Mini-Proctor) y seguido a esto se muestra el cuadro resumen de los coeficientes de correlación obtenidos, es importante aclarar que dentro de la investigación realizada se estaba analizando adicionalmente la influencia de la compactación en los suelos tropicales.

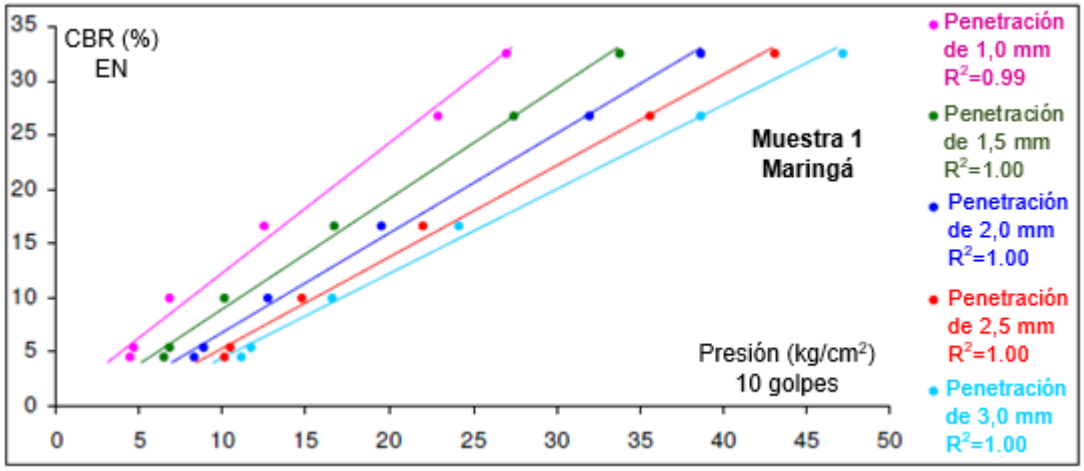


Figura 2-18: Correlación CBR (EN, energía normal) x presión Mini-CBR (10 golpes) para la muestra 1.

Fuente: (Marson, 2004).

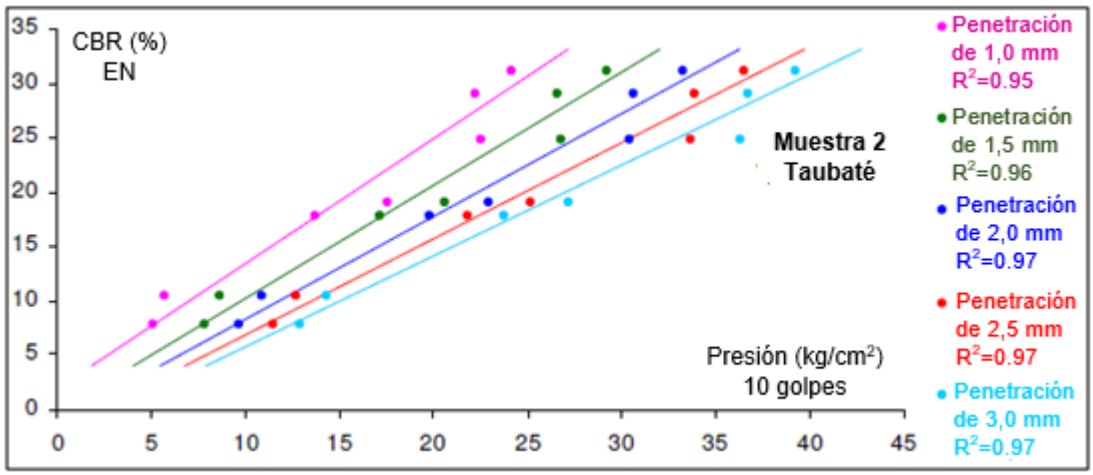


Figura 2-19: Correlación CBR (EN, energía normal) x presión Mini-CBR (10 golpes) para la muestra 2.

Fuente: (Marson, 2004).

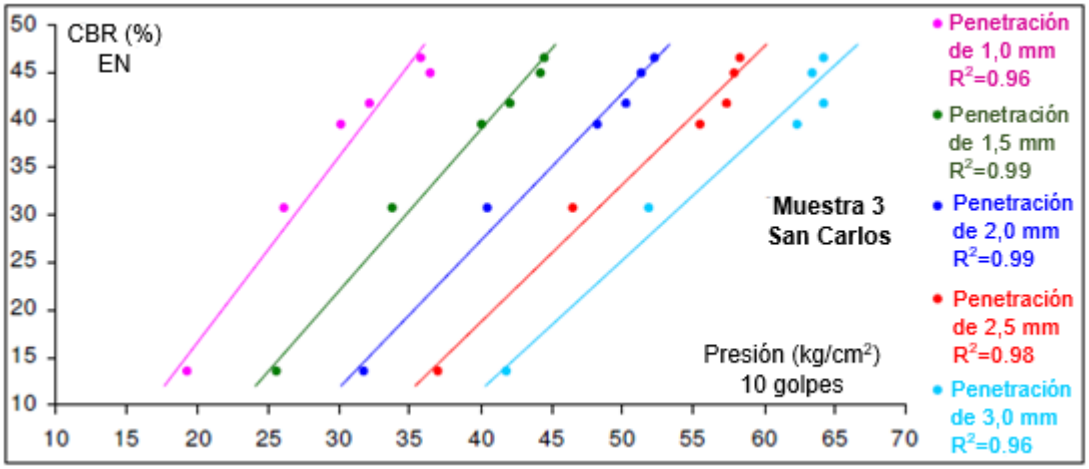


Figura 2-20: Correlación CBR (EN, energía normal) x presión Mini-CBR (10 golpes) para la muestra 3.

Fuente: (Marson, 2004).

En la Tabla 2-3 se resumen los coeficientes de correlación para ambos ensayos, teniendo en cuenta la cantidad de golpes de compactación y las propiedades de la muestra.

Tabla 2-3: Resumen de los coeficientes de correlación para los ensayos de CBR y Mini-CBR.

Coeficientes de correlación								
Muestra	**Característica**	**Número golpes**		**Penetraciones Mini-CBR (mm)**				
				1	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**
1 - Maringá	Arcillosa	Masa	7	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
			8	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97
			9	0.94	0.96	0.98	0.98	0.98
			10	0.99	1	1	1	1
2 - Taubaté	Arcillo arenosa		7	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97
			8	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98
			9	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98
			10	0.95	0.96	0.97	0.97	0.97
3 - Sao Carlos	Arenosa		9	0.71	0.84	0.85	0.85	0.87
			10	0.96	0.99	0.99	0.98	0.96
1 - Maringá	Arcillosa	Masa	11	0.83	0.88	0.9	0.92	0.93
			12	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92
			13	0.88	0.89	0.89	0.89	0.89
2 - Taubaté	Arcillo arenosa		11	0.98	0.99	0.99	0.99	1
			12	0.98	1	1	1	1
			13	0.96	0.98	0.98	0.99	0.99
3 - Sao Carlos	Arenosa		11	0.94	0.92	0.91	0.9	0.88
			12	0.95	0.95	0.95	0.94	0.92
			13	0.98	0.98	0.98	0.96	0.95
Media				0.93	0.95	0.95	0.95	0.95
Desviación				0.067	0.044	0.042	0.041	0.041
Desviación relativa (%)				7.1	4.6	4.4	4.3	4.3

Fuente: adaptado de (Marson, 2004)

Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 2-3, las penetraciones utilizadas para el ensayo de mini-CBR no afectarán considerablemente las correlaciones determinadas. Los valores de correlación medios para las diferentes penetraciones analizadas se encuentran por encima de 0.95, a excepción de la penetración de 1.0 mm.

(Marson, 2004) concluyó en su investigación que el ensayo mini-CBR se podía relacionar de manera satisfactoria con el CBR para las zonas de estudio delimitadas, al respecto determinó que el mini-CBR de diseño (equivalente al valor de CBR) debe ser evaluado con la presión ejercida para una penetración de 2.0 mm mediante la siguiente ecuación:

Arcilloso y arcillo-arenoso:

$$Mini - CBR = 1.5140 * Presión - 11.5979 \; R^2 = 0.98 \qquad (2\text{-}14)$$

Arenoso:

$$Mini - CBR = 1.5262 * Presión - 33.622 \; R^2 = 0.99 \qquad (2\text{-}15)$$

El Mini-CBR determinado por las ecuaciones mencionadas es equivalente al valor del CBR del ensayo tradicional.

2.2.2.3.4 Uberlandia-Brasil

Souza (2007) desarrolló una investigación en Uberlandia - Brasil, con el fin de comparar y correlacionar los valores de mini-CBR y CBR para los suelos de esa región. La premisa inicial fue implementar las correlaciones expresadas por Nogami en 1972 y posteriormente determinar correlaciones locales más ajustadas.

En la región de Uberlandia, donde fueron realizados estos análisis los suelos lateríticos cubren el 69% del área estudiada, se tiene un clima tropical de altitud con variaciones bruscas de estaciones húmedas y secas. Los tipos de suelo que componen el área de estudio son: Latosol rojo oscuro distrófico, latosol verde y rojo eutrófico, latosol morado distrófico y "*Terra roxa*".

La región de Uberlandia tiene una zonificación geotécnica dividida en 9 zonas de acuerdo con el estudio realizado por Andrade (2005) y expuestas en la investigación presentada por Souza (Tabla 2-4 y Tabla 2-5), para el análisis se tomaron muestras de 8 de esas regiones para realizar ensayos de peso específico, granulometría, propiedades índice, compactación, CBR, Mini-MCV, Mini-CBR. La unidad número 2 no fue analizada debido a la presencia orgánica y su difícil empleo en estructuras de pavimento

Tabla 2-4: Caracterización de materiales estudiados en Uberlandia.

UG	DESCRIPCIÓN
1	Residual de poco expesor (<2.0m), textura arcillo arenosa de coloración rojo oscuro
2	Espesores entre 2 y 5m textura arcillosa y arcillo arenosa con presencia de lentes orgánicos
3	Residual de más de 5m de espesor, arena arcillosa de coloración amarilla
4	Espesores entre 5 y 10m, textura arcillo arenosa y areno-arcillosa, coloración roja y amarilla
5	Espesores variables entre 5 y 20m, textura arcillo-limosa y arcillo-arenosa , coloración roja y amarilla
6	Espesores entre 2 y 5m textura arcillosa y arcillo arenosa, coloración rojo oscuro
7	Espesores entre 2 y 5m textura arcillosa y arcillo limosa
8	Suelo residual con textura areno arcillosa, de coloración rojo y amarillo
9	Espesores entre 2 y 10m, textura areno-arcillosa, con presencia de cantos, coloración roja

Fuente: adaptado de Souza, (2007)

Tabla 2-5: Continuación. Caracterización de materiales estudiados en Uberlandia.

UG	Propiedades índice			Clasificación		
	LL	LP	IP	USCS	AASHTO	MCT
1	30	26	4	ML	A-4	LG'
3			NP	SM	A-2-4	LA
4	28	23	5	ML	A-4	LG'
5	36	30	6	ML	A-4	LG'
6	31	24	7	ML	A-4	LG'
7	45	36	9	ML	A-5	LA'
8			NP	SM	A-2-4	LA
9			NP	SM	A-2-4	LA'

Fuente: adaptado de Souza, (2007)

De acuerdo con las Tabla 2-4 y Tabla 2-5, en términos generales se pueden distinguir 2 tipos de suelos; limos de baja compresibilidad (LG' - A-4) y arenas limosas, (LA y LA' - A-2-4); únicamente la unidad 7 presenta una clasificación AASHTO diferente (A-5). En lo que respecta al alcance de la investigación mencionada, todos los suelos tenían un comportamiento laterítico.

Al realizar la comparación entre los valores de CBR y Mini-CBR (Calculados a partir de la metodología propuesta por (Nogami, 1972) ver Mini-CBR (Sao Paulo)) para las unidades geotécnicas analizadas, se obtuvieron los siguientes gráficos resumidos (se presentan solo 3 muestras por unidad geotécnica).

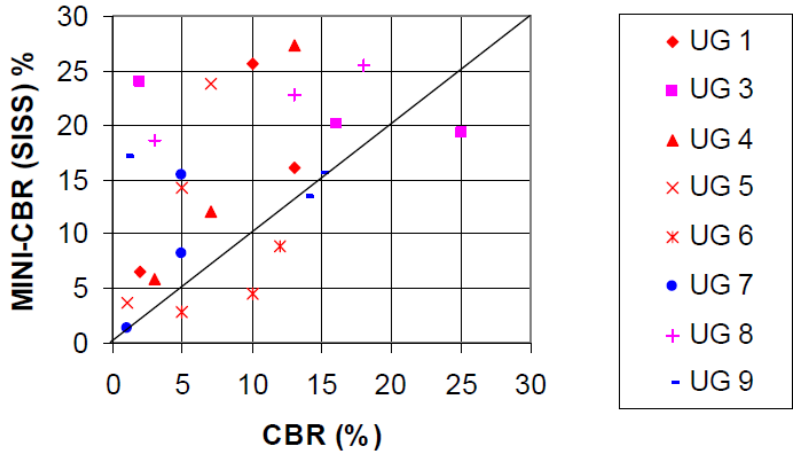


Figura 2-21: Comparación CBR vs Mini-CBR (Sin inmersión y sin sobrecarga).

Fuente: tomado de (Souza, 2007).

En el 75% de los casos analizados para la condición sin inmersión y sin sobrecarga, el valor del Mini-CBR fue superior al del CBR.

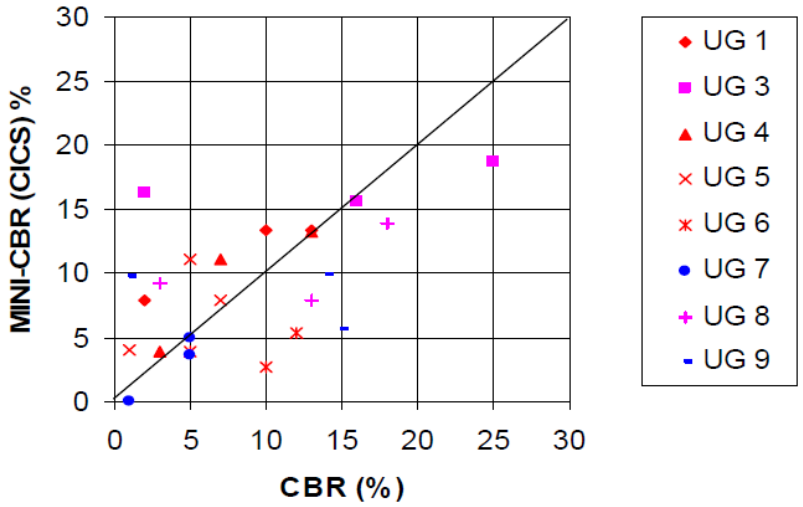


Figura 2-22: Comparación CBR vs Mini-CBR (con inmersión y con sobrecarga).

Fuente: tomado de (Souza, 2007).

En el 58% de los casos analizados para la condición con inmersión y con sobrecarga, el valor del Mini-CBR fue superior al del CBR.

Se puede apreciar para ambos casos una gran dispersión entre los ensayos analizados dentro de una misma unidad geotécnica.

El coeficiente de correlación se determinó para dos casos: humedad óptima y 3 puntos (humedad óptima, inmediatamente anterior e inmediatamente posterior), los resultados fueron los siguientes:

Tabla 2-6: Coeficientes de correlación entre CBR y Mini-CBR.

Ensayo	Valor de R^2 (3 puntos)	Valor de R^2 (w opt)
CBR vs Mini-CBR (SISS)	0.636	0.833
CBR vs Mini-CBR (CICS)	0.791	0.866

Fuente: tomado de (Souza, 2007).

2.2.2.3.5 Madre de Dios – Perú

Requiz Cristóbal (2018) realizó una investigación sobre la aplicación de la metodología MCT en los suelos tropicales de la selva baja del Perú, el autor buscaba comparar el diseño de la estructura de pavimentos teniendo en cuenta los parámetros tradicionales y los parámetros obtenidos por la metodología MCT.

La zona específica de estudio fue Dc. Km 166 – Tropezón (muestra 1) y La Joya-Infierno (muestra 2) de la Región Madre de Dios. Las dos muestras clasifican como CL según la USCS, de acuerdo con la clasificación AASHTO la muestra 1 es A-6 y la muestra 2 es A-7-6; al realizar la clasificación MCT se obtiene que las muestras corresponden a los subgrupos NS' y NG'.

Dentro del análisis presentado en esta investigación se tiene:

- Análisis de laboratorio: La ejecución de los ensayos miniatura de laboratorio utilizan un 14% de muestra y un 94% de tiempo de ejecución si se compara con los ensayos tradicionales.
- Comparación valores CBR: El autor empleó las correlaciones propuestas por Ferreira (1987) y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2-7: Comparativo valores CBR proyecto Caminos Madre de Dios - Perú

Resultados CBR - Caminos Madre de Dios - Peru			
Muestra	**CBR (%)**	**CBR corr. (%)**	**Mini-CBR (%)**
M-1	8.1	7.7	4
M-2	4.9	3.4	2.5

Fuente: adaptado de Requiz Cristóbal (2018)

El CBR corregido corresponde a la correlación obtenida a partir del valor de Mini-CBR, en la tabla se puede apreciar que se presenta una variación considerable en la diferencia entre los CBR's entre una muestra y otra. Sin embargo, es importante mencionar que para esta investigación solamente se tienen estos dos análisis, por tal motivo, no son valores representativos.

Finalmente, realizó un análisis comparativo entre los espesores finales para una estructura de pavimento diseñada con cada uno de estos parámetros de entrada.

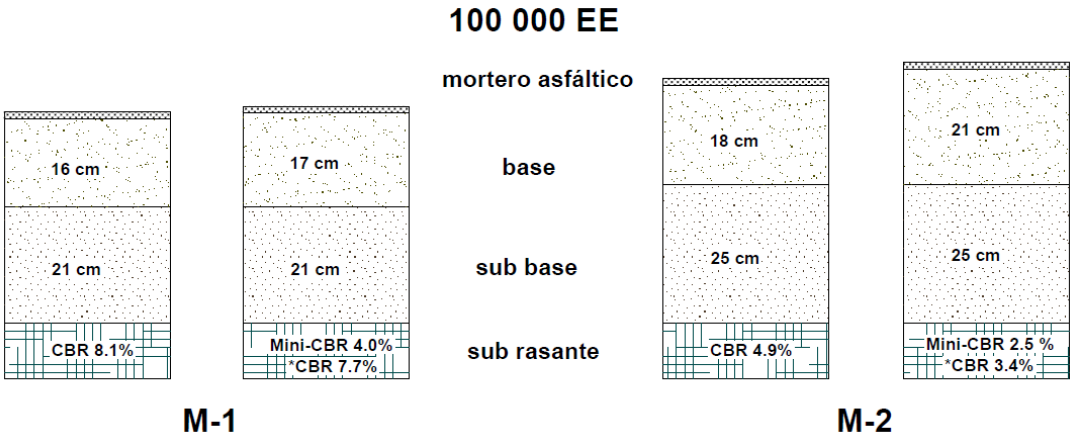


Figura 2-23: Comparación estructura final por el método AASHTO 93 de acuerdo al valor de CBR empleado.

Fuente: tomado de (Requiz Cristóbal, 2018).

Los espesores obtenidos para los suelos M-1 y M-2 varían en 2.6% y 6.8% para 100.000 EE, 2.2% y 7.7% para 250.000 EE y finalmente 1.9 y 8.4% para 500.000 EE.

2.2.3. Ensayo de módulo resiliente

La subrasante de un pavimento se encuentra en un estado variable de esfuerzos y por lo tanto de deformaciones cada que los vehículos aplican cargas dinámicas sobre la estructura. Debido a la naturaleza de las cargas, parte de la deformación sufrida por la subrasante es recuperada una vez se retira la carga, esta capacidad es denominada resiliencia. El módulo resiliente se define como la relación entre el esfuerzo desviador y la deformación unitaria recuperada (Vidal & Osorio, 2002).

Hveem & Carmany (1949) reconocieron que el módulo dinámico de elasticidad para subrasantes es un parámetro de gran importancia para entender el agrietamiento (por fatiga) de las superficies de asfalto y que la carga monotónica podría no ser la adecuada para su determinación.

En 1955, Hveem desarrolló el tema “comportamiento resiliente de los pavimentos” en el cual propuso la prueba del estabilómetro para caracterizar a las subrasantes. Posteriormente, Seed, Chan, & Monismith (1955) desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo de resiliencia, el cual fue cambiado más tarde por el de módulo resiliente. A partir de ese momento, el módulo resiliente fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable (Seed et al., 1962).

Bajo carga cíclica, la deformación permanente se va acumulando, en los ciclos intermedios la deformación permanente para cada uno disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales (Moreno Rubio, 2005). Durante pruebas de carga cíclica se observa que, a partir de un cierto número de ciclos de carga, el módulo tiende a ser aproximadamente constante y la respuesta del suelo puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama módulo de resiliencia, Mr (Garnica, P. Pérez, N. Gómez, 2001).

La principal ventaja de los ensayos dinámicos es que se obtiene el parámetro (Mr) de forma directa. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, no todos los laboratorios cuentan con los equipos necesarios para realizarlo y, adicionalmente, el desarrollo del ensayo tiene un costo elevado.

Ecuaciones constitutivas

Para materiales puramente cohesivos (ϕ=0), la resistencia del material está controlada por la cohesión.

$$(\sigma_d)_f = 2 * C \qquad (2\text{-}16)$$

A mayor cohesión del material, mayor será el esfuerzo desviador necesario para llevarlo a la falla. Por consiguiente, la secuencia de esfuerzos deberá iniciar con un esfuerzo desviador mínimo para evitar la falla del espécimen prematuramente (Andrei et al., 2004).

A continuación, se presenta un resumen de las ecuaciones constitutivas planteadas por diferentes autores y que dependen de diferentes parámetros físicos o de la iteración de la misma ecuación.

Es importante aclarar que Los valores K_i de los diferentes modelos son constantes experimentales que dependen de las propiedades físicas del material y son obtenidas mediante un análisis de regresión

- Modelo k_1-k_3 (Uzan-Witczak)
  Modelo establecido para cualquier tipo de suelo, desde puramente cohesivo hasta no cohesivo

$$Mr = k1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k3} \qquad (2\text{-}17)$$

  Donde,
  Θ: σ1+σ2+σ3
  Pa: Presión atmosférica
  $\tau_{oct=}\frac{1}{3} * ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)^{0.5}$.

  Las siguientes constantes K_1, K_2 y K_3 fueron determinadas específicamente para suelos finos:

$$K1 = \ 1446.2 \ - 4.56 * (Ptamiz\ 1.27) \ + 4.92 * LL - 27.73 * Wopt$$
$$K2 = \ 0.45679 - 0.00073376 * (Ptamiz\ 80) - 0.00269 * LL$$
$$+ 0.00060555 * (\%\ gravas) \ + 12.97 * D10$$

K3= -0.188.

Donde,

Ptamiz 1.27: Porcentaje de material que pasa el tamiz con apertura de 1.27mm.

LL: Límite líquido.

W_{opt}: Humedad óptima de la muestra.

Ptamiz 80: Porcentaje de material que pasa el tamiz con apertura de 180 μm.

% Gravas: Porcentaje de material retenido en el tamiz con apertura de 4.75 mm.

D10: Diámetro para el cual pasan el 10% de las partículas en la curva de granulometría.

- Modelo k-Θ modificado (Seed et al., 1967)

$$Mr = k1 * \left(\frac{\theta}{\sigma 0}\right)^{k2} \qquad (2\text{-}18)$$

Modelo no-lineal dependiente del esfuerzo, empleado principalmente para materiales granulares.

Θ (invariante de esfuerzos): σ1+σ2+σ3 en términos totales.

σ0: esfuerzo de referencia (presión atmosférica)

Las constantes k_1 y k_2 se obtienen del análisis de regresión lineal del gráfico Log-Log entre el Mr y Θ.

- Moossazadeh & Witczak, (1981)

También conocido como el modelo del esfuerzo desviador o modelo k-σd. Con este modelo se obtuvieron buenas correlaciones con ensayos de laboratorio para suelos finos de San Diego, Illinois.

$$Mr = k1 * \left(\frac{\sigma d}{Pa}\right)^{k3} \qquad (2\text{-}19)$$

Las constantes k_1 y k_2 se obtienen del análisis de regresión lineal del gráfico Log-Log entre el Mr y σd.

- Long Term Pavement Performance Study – FHWA (Yau & Quintus, 2002)

$$Mr = k1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k2} * \left[\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right]^{k3} \qquad (2\text{-}20)$$

Donde,

$\tau_{oct} = \frac{1}{3} * ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)^{0.5}$.

Las siguientes constantes K_1, K_2 y K_3 fueron determinadas específicamente para suelos finos:

Para suelos arcillosos

$$K1 = 1.3577 + 0.0106 * (\%\, arcilla) - 0.0437 * w$$

$$K2 = 0.5193 - 0.0073 * (Ptamiz4) + 0.0095 * (Ptamiz40) - 0.0027 * (P200) - 0.003 * LL - 0.0049 * wopt$$

$$K3 = 1.4258 - 0.0288 * (Ptamiz4) + 0.0303 * (Ptamiz40) - 0.0521 * (P200) + 0.0251 * (\%limo) + 0.0535 * LL - 0.0672 * wopt - 0.0026 * \gamma opt + 0.0025 * \gamma d - 0.6055 * (w/wopt)$$

Donde,

%Arcilla: porcentaje de arcilla dentro de la muestra obtenido en el ensayo de hidrometría.

W: Humedad natural

Ptamiz 4: Porcentaje de material que pasa el tamiz con apertura de 4.75 mm.

Ptamiz 40: Porcentaje de material que pasa el tamiz con apertura de 425 μm.

LL: Límite líquido.

W_{opt}: Humedad óptima de la muestra.

P200: Porcentaje de material que pasa el tamiz con apertura de 75 μm.

%Limo: porcentaje de limo dentro de la muestra obtenido en el ensayo de hidrometría.

γopt: Peso unitario óptimo de la muestra obtenido a partir de la humedad óptima de la muestra (KN/m^3).

γd: Peso unitario seco de la muestra (KN/m^3).

Para suelos limosos

$K1 = 1.0480 + 0.0177 * (\%\ arcilla) + 0.0279 * IP - 0.0370 * w$

$K2 = 0.5097 - 0.0286 * IP$

$K3 = -0.2218 + 0.0047 * (\%\ limo) + 0.0849 * IP - 0.1399 * w$

Donde,

%Arcilla: porcentaje de arcilla dentro de la muestra obtenido en el ensayo de hidrometría.

IP: índice de plasticidad.

W: Humedad natural.

%Limo: porcentaje de limo dentro de la muestra obtenido en el ensayo de hidrometría.

- Proyecto de investigación Vial en Minnesota (Dai & Zollars, 2002)

$$Mr = K_4 * \theta^{k2} * \sigma d^{k3} \qquad (2\text{-}21)$$

Las siguientes constantes K_1, K_2 y K_3 fueron determinadas específicamente para suelos finos:

$K4 = 5770.8 - 520.98 * (\gamma d)^{0.5} - 3941.8 * (w)^{0.5} + 33.1 * IP - 36.62 * LL - 17.93 * (P200)$

$K2 = -5.334 + 0.000316 * (\gamma d)^3 + 9.686 * w - 0.054 * IP + 0.046 * LL + 0.022 * (P200)$

$K3 = 409.9 - 306.18 * (\gamma d)^{0.1} - 82.63 * w + 0.033 * IP - 0.0.041 * LL + 0.1385 * (P200)$

Donde,

γd: Peso unitario seco de la muestra (KN/m^3)

W: Humedad natural

IP: Índice de Plasticidad

LL: Límite líquido.

P200: Porcentaje de material que pasa el tamiz con apertura de 75 μm.

2.2.4. Ensayo PDC (Penetración dinámica con cono)

En 1956, Scala desarrolló en Australia el penetrómetro dinámico con cono, basado en un modelo suizo anterior, su finalidad era evaluar la resistencia al corte del material en un pavimento. Éste primer modelo consistía en una masa de 9 kg que caía 508mm e impactaba un cono de 30° para introducirlo dentro del estrato a analizar.

Durante los años posteriores se desarrollaron nuevas investigaciones en Sudáfrica en las que se variaban la masa, la caída libre o las dimensiones del cono; finalmente, a comienzos de los años 70 se estandarizó en este país un modelo con una masa de 8kg, una caída libre de 57.5 cm y un cono de 60° (Paige-Green & Plessis, 2009).

El ensayo se usa para evaluar la resistencia in-situ de suelos inalterados. La rata de penetración puede ser utilizada para estimar el CBR in-situ (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2012c). Del ensayo de PDC se determina el número dinámico (ND) del suelo de subrasante, la aplicabilidad principal de este procedimiento es la de correlacionar este valor con el CBR (Office of Minnesota road research, 1996).

El PDC es un ensayo de campo simple y fácil de ejecutar que permite evaluar la resistencia de las capas de base o subrasante, este procedimiento ha sido ampliamente usado en muchos países (Wu & Sargand, 2007).

2.2.4.1 *Metodología de ensayo:*

El método de ensayo PDC se encuentra estandarizado en Colombia por la norma INV-E-172-13 "*Método de ensayo normal para el uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad"*.

El ensayo contempla la rata de penetración del equipo, a través de un suelo inalterado o materiales compactados. La penetración total para cierto número de

golpes es registrada en unidades de mm/golpe (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2012c).

2.2.4.2 *Correlaciones existentes entre el PDC y los parámetros de resistencia física y mecánica del suelo.*

Tal y como se mencionó anteriormente, una de las principales aplicaciones del ensayo de PDC consiste en determinar el CBR de la subrasante mediante alguna de las correlaciones existentes, sin embargo, existen algunos autores que han buscado correlacionar el PDC con otras propiedades del suelo como el Mr. A continuación, se presenta una tabla resumen de todas las correlaciones encontradas en la revisión bibliográfica con sus respectivas aclaraciones.

Tabla 2-8: Correlaciones entre el PDC y el CBR.

ECUACIÓN	AUTOR	OBSERVACIONES
$\log(CBR) = 2.555 - 1.145\log(PDC)$	Australian Road Research Board (ARRB) (Smith and Pratt, 1983)	
$\log(CBR) = 2.222 - 0.576\log(DCPI)$	TRL (1986)	Para suelos cohesivos.
$\log(CBR) = 2.20 - 0.71\,(\log(PDC))^{1.5}$	Livneh during the Southeast Asian Geotechnical Conference in Bangkok, Thailand (1987)	Para todos los suelos.
$\log(CBR) = 2.64 - 1.08\log(PDC)$ $CBR = \frac{435}{PDC^{1.08}} \quad (R^2 = 0.79)$	North Carolina Department of Transportation (NCDOT) (Wu, 1987)	

ECUACIÓN	AUTOR	OBSERVACIONES
$\log(CBR) = 2.81 - 1.32\log(PDC)$	Harison (1989)	Para todos los suelos. Ángulo del cono 60°.
$\log(CBR) = 2.56 - 1.16\log(PDC)$		Arcillas
$\log(CBR) = 3.03 - 1.51\log(PDC)$		Arenas S-W
$\log(CBR) = 2.55 - 0.96\log(PDC)$		Gravas G-W
$\log(CBR) = 2.76 - 1.28\log(PDC)$		Muestras con inmersión
$\log(CBR) = 2.83 - 1.33\log(PDC)$		Muestras sin inmersión
$\log(CBR) = 2.465 - 1.12 * \log(PDC)$	U.S. Army Corps of Engineers (1992)	Para todos los suelos.
$CBR = 292 * PDC^{-1.12}$		No aplica a suelos CL con CBR <10, ni a suelos CH.
$CBR = 58.8 * PDC^{-2.0}$		Aplica a suelos CL con CBR <10.
$CBR = 348.3 * PDC^{-1.0}$		Aplica a suelos CH.
$\log(CBR) = 2.62 - 1.27\log(PDC)$	Kleyn (1992)	
$\log(CBR) = 2.20 - 0.71\log(PDC)$	Livneh and Ishai (1992)	Usando PDC automatizado. Donde: $CBR = 0.84\ CBR_A$
$CBR = 567.0 * PDC^{-1.40}$	MOPT Colombia (1992)	Suelos granulares.
$CBR = \frac{1}{0.002871 * PDC}$	Webster, Brown and Porter (1994)	Para suelos CH.
$CBR = \frac{1}{(0.017019 * PDC)^2}$	Webster, Brown and Porter (1994)	Para suelos CL.
$\log(CBR) = 2.669 - 1.065\log(PDC)$	Ese, Myre, Noss, and Vaernes, (1994)	

ECUACIÓN	AUTOR	OBSERVACIONES
$\log(CBR_{lab}) = 2.438 - 1.65\log(PDC_{campo})$	Ese (1994)	
$\log(CBR) = 0.84 - 1.26\log(PDC)$	IDOT (1997)	Para todos los suelos.
$\log(CBR_{campo}) = 2.53 - 1.14\log(PDC_{campo})$	Coonse, (1999)	
$CBR = 428.5 * PDC^{-1.28}$	Kleyn y Van Heerden	
$CBR = 302 * PDC^{-1.057}$	TRL Overseas Road Note 8	
$CBR = \frac{5.1}{PDC^{0.2} - 1.41}$ $(R^2 = 0.93)$	Abu-Farsakh, Alshibli, Nazzal, and Seyman, (2004)	
$\log(CBR) = 2.954 - 1.496\log(PDC)$	Yitagesu (2012)	Para arcillas no saturadas.
$\log(CBR) = 2.48 - 1.057\log(PDC)$	TRL	Para todos los suelos. Ángulo del cono 60°.
$\ln(CBR) = 5.8 - 0.95\ln(PDC)$	Sampson	
$\ln(CBR) = 5.93 - 1.1\ln(PDC)$		Materiales plásticos
$\ln(CBR) = 6.15 - 1.248\ln(PDC)$		IP < 6
$\ln(CBR) = 5.70 - 0.82\ln(PDC)$		IP > 6
$\ln(CBR) = 5.86 - 0.69\ln(PDC)$		IP = 0
$CBR = 30.52 * PDC^{-0.62}$	UPTC - Colombia	Suelos Finos
$CBR = 37.9 * PDC^{-0.69}$	Bateman - Colombia	Suelos Finos

Fuente: elaboración propia

Tabla 2-9: Correlaciones entre el PDC y el módulo de elasticidad.

ECUACIÓN	AUTOR	OBSERVACIONES
$E_i(MPa) = \frac{17421.2}{PDC^{2.05} + 62.53} - 5.71$ $E_i(ksi) = \frac{2526.7}{PDC^{2.05} + 62.53} - 0.828$ $(R^2 = 0.94)$	Abu-Farsakh, Alshibli, Nazzal, and Seyman, (2004)	Para módulo inicial.
$E_R(MPa) = \frac{5142.61}{PDC^{1.57} + 14.8} - 3.49$ $E_R(ksi) = \frac{745.873}{PDC^{1.57} + 14.8} - 0.506$ $(R^2 = 0.95)$	Abu-Farsakh, Alshibli, Nazzal, and Seyman, (2004)	Para módulo de recarga.
$E(ksi) = 78.05 * PDC^{-0.6645}$ $E(MPa) = 537.76 * PDC^{-0.6645}$ $R^2 = 0.855$	Chen, Lin, Liau, and Bilyeu, (2005)	

Fuente: elaboración propia

Tabla 2-10: Correlaciones entre el PDC y el Mr.

ECUACIÓN	AUTOR	OBSERVACIONES
$M_R = \frac{151.8}{(PDC)^{1.096}}$ $R^2 = 0.91, RMSE = 6.1\ MPa$	Mohammad et al (2007)	RMSE: "root-mean-square error"
$M_R = 165.5\left(\frac{1}{PDC^{1.147}}\right) + 0.0966\left(\frac{\gamma_d}{w}\right)$ $R^2 = 0.92, RMSE = 5.9\ MPa$	Mohammad et al (2007)	

Fuente: elaboración propia

2.3 CBR (California Bearing Ratio)

El ensayo fue desarrollado originalmente por el ingeniero Porter a comienzos de 1920 de la División de Carreteras del Estado de California, posteriormente fue objeto de diversas modificaciones antes de ser adoptado por el Cuerpo de Ingenieros de la Marina de los Estados Unidos durante la segunda guerra mundial. La principal necesidad de la época era determinar un método simple y eficaz para determinar la resistencia de los suelos para la construcción de pistas de aterrizaje para los aviones en diferentes países (Marson, 2004).

El CBR es una medida indirecta de la capacidad de soporte de un suelo, basada en la resistencia a la penetración de un pistón estándar moviéndose a una velocidad establecida para una medida de penetración determinada (FHWA, 2006).

En Colombia, es práctica habitual el empleo del ensayo CBR de laboratorio para determinar la resistencia de los suelos con fines de diseño de pavimentos (Montejo Fonseca, 2002). El CBR es el parámetro más usado para estimar el módulo resiliente dado que este ensayo no es caro y es relativamente fácil de realizar (Dione et al., 2014).

El CBR es un parámetro globalmente usado para determinar la capacidad de soporte de la subrasante, sin embargo, las metodologías de diseño emplean el módulo resiliente como parámetro de rigidez de este estrato. Lo anterior debido a que el Mr es una medida de la propiedad elástica del suelo, admitiendo ciertas características no lineales (AASHTO, 1993) y representa mejor el comportamiento resiliente de la subrasante a un número elevado de repeticiones de carga.

Teniendo en cuenta la practicidad y universalidad del ensayo CBR y la importancia del comportamiento resiliente de la subrasante, diversos autores han determinado correlaciones entre el CBR y el Mr (Heukelom y Foster 1960, Heukelom y Klomp 1962, Green y Hall 1975, entre otros.).

La ventaja de este ensayo es su generalización, la gran mayoría, por no decir que todos los laboratorios de geotecnia y pavimentos cuentan con el equipo necesario para realizarlo; es un ensayo con gran tradición en el diseño de estructuras de

pavimentos, por lo que todos los técnicos laboratoristas se encuentran capacitados para realizarlo.

2.3.1. Metodología de ensayo:

El ensayo de CBR se encuentra estandarizado en Colombia por la norma INV-E-148-13 "*CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada"*

La norma describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos de subrasante (CBR), mediante la penetración de un pistón a una velocidad constante. El CBR es la relación porcentual entre el esfuerzo requerido para que el pistón penetre 0.1" o 0.2" dentro de la muestra y el esfuerzo que se requirió para penetrar lo mismo en una muestra de grava bien gradada (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2012a).

2.3.1.1 *Correlaciones del CBR con propiedades índice*

Diversos autores han buscado obtener correlaciones de este parámetro a partir de las propiedades índice o las propiedades mecánicas de los suelos, en la Tabla 2-11 se presentan la más reconocidas para suelos finos.

Las convenciones usadas son las siguientes:

LL: Límite líquido (%).

IP: Índice de plasticidad (%).

P_{200}: Porcentaje de material que pasa el tamiz con aberturas de 75 μm.

γt: Peso unitario de la muestra.

CI: Compresión inconfinada .

Tabla 2-11: Correlaciones CBR y Propiedades índice.

ECUACIÓN	AUTOR	OBSERVACIONES
$CBR = -0.43 * LL + 20.52, R^2 = 0.85$	Tomado de Rehman, Z et al. 2017	Suelos finos.
$CBR = 0.58 * IP + 14.25, R^2 = 0.85$	Tomado de Rehman, Z et al. 2017	Suelos finos.
$CBR = -0.1 * LL - 0.425 * IP + 15.73, R^2 = 0.9$	Tomado de Rehman, Z et al. 2017	Suelos finos.
$CBR = \frac{7}{1 + 0.728 * pasa\ 200 * IP}$	National Cooperative Highway research Program, 2001	Suelos finos de consistencia plástica.
$CBR = \gamma_t{}^{1.72314} * (LP * P_{200})^{0.16351}, R^2 = 0.91$	Valera, L, 2013	Suelos finos de alta compresibilidad
$CBR_{nat} = 1.23 + 0.609 * CI\ , R^2 = 0.82$	Rivera, W. 2013	Suelos finos
$CBR_{sat} = \frac{1}{\log(0.0479 + 0.217 * CI)}\ , R^2$	Rivera, W. 2013	Suelos finos
$CBR_{sat} = \frac{1}{\log(-0.027 + 0.287 * CI)}\ , R^2 = 0.62$	Rivera, W. 2013	Suelos arcillosos

$CBR_{sat} = \frac{1}{\log(0.048 + 0.211 * CI)}$, $R^2 = 0.67$	Rivera, W. 2013	Suelos limosos

Fuente: elaboración propia

2.3.1.2 *Correlaciones del CBR con Mr*

Diversos autores han buscado obtener correlaciones entre el CBR de laboratorio y el Mr, en la Tabla 2-12 se presentan la más reconocidas para suelos finos.

Tabla 2-12: Correlaciones CBR y Mr.

ECUACIÓN	AUTOR	OBSERVACIONES
$M_r = 5409 * CBR^{0.711}$ (psi)	Heukelom & Foster (1960) Green & Hall (1975)	Para CBR < 10%
$M_r = 1500 * CBR\ (psi)$	Heukelom &Klomp (1962)	Para CBR < 10%
$M_r = 14 * CBR\ (MPa)$	Uzan et al. (1977)	Para CBR < 10%
$M_r = 10 * CBR^{0.73}\ (MPa)$	Poulsen & Stubstad (1980)	Para subrasantes en Dinamarca
$M_r = 17.6 * CBR^{0.64}\ (MPa)$	Powell et al. (1984)	Para CBR < 12%
$M_r = 25.55 * CBR^{0.64}\ (MPa)$	Lister & Powell. (1987)	Para CBR < 10%
$M_r = 21 * CBR^{0.65}\ (MPa)$	Ayres (1997)	
$M_r = 5 * CBR\ (MPa)$	Reyes (2003)	Para utilizar el método Racional para Bogotá D.C.
$M_r = 22.1 * CBR^{0.55}\ (MPa)$	MOP de Chile (2004)	Para 12 < CBR < 80%

Fuente: elaboración propia

2.4 Referencias

AASHTO. (1993). *Guide for design pavement sturctures 1993*. American ASsociation of State Highway and Transportation Officials.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2020). Plan Distrital de Desarrollo 2020-2024 Un Nuevo Contrato Social y Ambiental para la Bogotá del Siglo XXI. *Página Institucional*, *2009*(366), 170. http://concejodebogota.gov.co/cbogota/site/edic/base/port/inicio.php

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2010). *Decreto 523 de 2010*.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2021). *Plan Operativo Anual de Inversiones*.

Andrei, D., Witczak, M., Schwartz, C., & Uzan, J. (2004). Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. *Journal of the Transportation Research Board*, *1874*, 29–37.

Assali, M. P., Fortes, R. M., & Cymrot, R. (2003). Comparação da incerteza de medição entre ensaios CBR e mini CBR. *34º Reunião Anual de Pavimentação*, 20.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). Colombia Estrategia de País del BID 2015–2018. In *Colombia*. http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=40089561

Banco Interamericano de Desarrollo. (2019). *Estrategia del Grupo BID con Colombia (2019-2022)*. https://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=EZSHARE-1474758834-2

Barros, C. O. de A. (2003). *Revisão da Correlação Mini CBR / CBR para solos do municipio de São Carlos – SP*. Universidade de São Paulo.

Barroso, S. H. de A. (2002). *Estudo dos solos da regiäo metropolitana de Fortaleza para aplicacao na engenharia rodoviária*. Universidade de Sâo Paulo.

Bojacá Torres, D. C. (2019). *Módulo resiliente de suelos blandos de subrasante de la zona lacustre de Bogotá a partir del ensayo CBR cíclico*.

Cabrera, A. (2012). *Evaluation of the laboratory resilient modulus test using a New Mexico subgrade soil Recommended Citation "Evaluation of the laboratory resilient modulus test using a New Mexico subgrade soil*. https://digitalrepository.unm.edu/ce_etds.%22

Cámara Colombiana de la Infraestructura. (2009). *Tarifas de arrendamiento para equipos de construcción*.

CEPAL. (2018). Transporte de carretera en América Latina : evolución de la infraestructura y de sus impactos entre 2007 y 2015. *FAL*, *367*(7), 1–15. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44440/1/S1801184_es.pdf

Chu, T. Y., & Davidson, D. T. (1955). Some laboratory test for the evaluation of stabilized soils. *Iowa State University Bulletin*, *21*.

Clavijo, S., Vera, A., & Vera, N. (2013). *La inversión en infraestructura en Colombia 2012-2020*. 7–14. http://www.cvc.com.ve/docs/2016219124559Inversion en infraestructura Colombia 2013-2020.pdf

Dai, S., & Zollars, J. (2002). Resilient Modulus of Minnesota Road Research Project Subgrade Soil. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1786*(1), 20–28. https://doi.org/10.3141/1786-03

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1997). DNER - ME 254 Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão. In *Norma rodoviária*. http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me254-97.pdf

Dione, A., Fall, M., Berthaud, Y., Benboudjema, F., & Michou, A. (2014). *Implementation of Resilient Modulus - CBR relationship in Mechanistic-Empirical (M . -E) Pavement Design Abstract :* *1*(2), 65–71. https://www.researchgate.net/publication/271829406_Implementation_of_Resilient_Modulus_-_CBR_relationship_in_Mechanistic-Empirical_M_-E_Pavement_Design

Escobar Toro, L. J. (2011). *CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS TROPICALES EN UN TALUD DE LA AUTOPISTA MEDELLÍN – BOGOTÁ EN EL TRAMO DE VÍA ENTRE MARINILLA Y SANTUARIO*. Universidad Nacional de Colombia.

Fernandes, E. (2006). *ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS APLICADAS AOS SOLOS TROPICAIS*. Universidade de São Paulo.

FHWA. (2006). Geotechnical aspects of pavements. In *FHWA NHI-05-037* (Issue 132040). http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geotechnical+Aspects+of+Pavements#1

Garnica, P. Pérez, N. Gómez, J. (2001). Módulos de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares. In *Publicación Técnica N. 142* (Issue 142).

George, K. P. (2004). *Prediction of Resilient Modulus From Soil Index Properties. Report No. FHWA/MS-DOT-RD-04-172*. *November*, 72.

Grupo Banco Mundial. (2018). *Índice de desempeño logístico*. https://datos.bancomundial.org/indicador/LP.LPI.INFR.XQ?end=2018&start=2007&view=chart&year_high_desc=true

Hveem, F. N., & Carmany, R. M. (1949). The faactors underlying the rational design of pavements. *Twenty-Eighth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C.*, *28*, 101–136. https://trid.trb.org/view/104547

Indian Roads Congress. (2012). Tentative Guidelines for the design of Flexible Pavements. In *Indian Road Congress* (p. 108). https://archive.org/details/govlawircy2012sp37_0/page/90

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2017). *Capítulo técnico Geotecnia y Pavimentos*.

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), & Universidad Nacional de Colombia. (2013). *Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.* http://www.umv.gov.co/sisgestion2017/Documentos/MISIONAL/PDV/PDV-DE-003-V1_Guia_diseno_de_pavimentos_para_bajos_volumenes_de_transito_y_vias_locales_para_bogota.pdf

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012a). *INV 148-13 CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO Y SOBRE MUESTRA INALTERADA*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012b). *INV E-156-13 Módulo resiliente de suelos y agregados*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012c). *INV E-172-13 MÉTODO DE ENSAYO NORMAL PARA EL USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO EN APLICACIONES DE PAVIMENTOS A POCA PROFUNDIDAD*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2018). *Estado De La Red Vial Criterio Tecnico Segundo Semestre 2018*.

Khasawneh, M. A., & Al-jamal, N. F. (2019). Modeling resilient modulus of fine-grained materials using different statistical techniques. *Transportation Geotechnics*, *21*(February), 100263. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100263

Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. K., & Gurland, J. (1956). Relationship between the California Bearing Ratio and The Iowa Bearing Value. *Methods for Testing Engineering Soils*, *59*(December), 257–293. http://publications.iowa.gov/22209/1/IADOT_IHRB_Bulletin_21_Methods_Testing_Engineering_Soils_1960.pdf

Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. K., & John, G. (1960). Relationship between the California Bearing Ratio and The Iowa Bearing Value. In D. T. Davidson (Ed.), *Methods for testing engineering soils* (Vol. 59, Issue December, pp. 257–293). Iowa State University of Science and Technology. http://publications.iowa.gov/22209/1/IADOT_IHRB_Bulletin_21_Methods_Testing_Engineering_Soils_1960.pdf

Malaver Soto, N. M. (2018). *Lineamientos básicos para la clasificación de suelos tropicales en Colombia orientado a pavimentos* [Universidad Católica de Colombia]. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22378/1/TESIS VFinal%2830-nov-2018%29 ENTREGADA.pdf

Marson, L. A. (2004). *Correlações entre ensaios CBR e Mini-CBR para solos lateríticos de textura fina*. Insitituto Tecnológico de Aeronáutica.

Martinez, J. O., Gerena, C., & Nicely, A. (2013). *Correlación PDC Con CBR Para Suelos En La Localidad De Suba*. http://unimilitar-dspace.metabiblioteca.org/handle/10654/3653

Mendoza, C., & Caicedo, B. (2019). Elastoplastic framework of relationships between CBR and Young's modulus for fine grained materials. *Transportation Geotechnics*, *21*(September), 100280. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100280

Mohammad, L. N., Herath, A., Abu-Farsakh, M. Y., Gaspard, K., & Gudishala, R. (2007). Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *19*(11), 986–

992. https://doi.org/10.1061/40776(155)2

Montaña, D., & Durán, J. E. (2013). *Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá*. 1.

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia.

Moossazadeh, J., & Witczak, M. (1981). Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior. *Transportation Research Record*, *810*, 9–17. http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1981/810/810-002.pdf

Moreno Rubio, J. (2005). *Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas* [Universidad Politecnica De Catalunya]. http://hdl.handle.net/2099.1/3252

Narzary, B. K., & Ahamad, K. U. (2018). Estimating elastic modulus of California bearing ratio test sample using finite element model. *Construction and Building Materials*, *175*, 601–609. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.228

Nogami, J. S. (1972). Determinação do índice de suporte Califórnia com equipamentos de dimensões reduzidas. *II Reunião Das Administrações Rodoviárias*.

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1979). Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, *19*(1), 196–199. https://doi.org/10.1007/BF02600475

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1981). UMA NOVA CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PARA FINALIDADES RODOVIÁRIAS. *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais Em Engenharia*, 13.

Office of Minnesota road research. (1996). *User guide to the Dinamic cone penetrometer*. http://www.dot.state.mn.us/materials/researchdocs/User_Guide.pdf

Orozco Rojas, L. F. (n.d.). Presentación SCI. *Asentamientos de Edificios Altos*, 29.

Paige-Green, P., & Plessis, L. Du. (2009). *THE USE AND INTERPRETATION OF THE DYNAMIC CONE PENETROMETER (DCP) TEST* (Issue September).

Palomino, A., Salazar Ferro, F., Orozco, L. F., & Salcedo, M. (2016). *Tilting of a Large Apartment Building in Bogota, Colombia, Due to Foundation Failure and the Recuperation of Its Verticality*. 17–28. https://doi.org/10.1061/9780784480076.003

Reddy, C. N. V. S., & Moorthy, N. V. R. (2005). Significance of bearing capacity of clayey subgrade in flexible pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, *6*(3), 183–189. https://doi.org/10.1080/10298430500137194

Rehman, Z. U., Khalid, U., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2017). Prediction of CBR value from index properties of different soils. *Technical Journal University of Engineering and Technology Taxila, Pakistan*, *22*(August), 17–26.

Requiz Cristóbal, J. O. (2018). *Aplicación de la metodología MCT en estudio de suelos tropicales con fines de pavimentación en la selva baja del Perú. Caso: caminos vecinales de madre de dios.* [Universidad Nacional Federico Villarreal]. http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2145

Rojas lópez, M. D., & Ramírez Muriel, A. F. (2018). Inversión en infraestructura vial y su impacto en el crecimiento económico : Aproximación de análisis al caso infraestructura en colombia (1993-2014). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *17*(32), 109–128. https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a6

Rondón Quintana, H., Fernández Gómez, W., & Hernández Noguera, J. (2013). Influencia de la rigidez de la subrasante y las capas granulares sobre la vida a fatiga de mezclas asfálticas. *Tecno Lógicas*, *31*, 53–72. http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n31/n31a04.pdf

Sánchez, F., & Campagnoli, S. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras: Guía práctica para lo estudios y diseños* (Escuela Colombiana de Ingeniería (ed.); 1ra ed.).

Saurabh, J., Joshi, Y. P., & Goliya, S. S. (2013). Design of Rigid and Flexible Pavements by Various Methods & Their Cost Analysis of Each Method. *International Journal of Engineering Research and Applications*, *3*(5), 119–123.

Saxena, R. K. (1991). Can failures be minimized and pavement performance improved by adequately designing and constructing road subgrades. *Indian Roads Congress*, *52*(2), 263–311.

Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). RESILIENCE CHARACTERISTICS OF SUBGRADE SOILS AND THEIR RELATION TO FATIGUE FAILURES IN ASPHALT PAVEMENTS. *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Supplement*, 77–113. https://trid.trb.org/view/716093

Seed, H. B., Chan, C. K., & Monismith, C. L. (1955). EFFECTS OF REPEATED LOADING ON THE STRENGTH AND DEFORMATION OF COMPACTED CLAY. *Thirty-Fourth Annual Meeting of the Highway Research Board*, *34*, 541–558. https://trid.trb.org/view/126583

Seed, H. B., Mitry, F. B., Monismith, C. L., & Chan, C. K. (1967). PREDICTION OF FLEXIBLE PAVEMENT DEFLECTIONS FROM LABORATORY REPEATED-LOAD TESTS. *Trasnportation Research Board*, *35*, 117. https://trid.trb.org/view/104508

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Mapa Geológico Colombiano 2017*.

Souza, R. A. De. (2007). *Estudo Comparativo dos Ensaios de CBR e Mini-CBR para Solso de Uberlândia-MG* [Universidad Federal de Uberlândia]. https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14236/1/RASouzaDISPRT.pdf

Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3 ed.). John Wiley & Sons.

The Asphalt Institute. (1989). *The Asphalt Handbook Manual Series No. 4*.

Vidal, J., & Osorio, R. (2002). Módulo resiliente de suelos finogranulares. *Revista Universidad Eafit*, *125*, 63–72.

Wonnacott, T., & Wonnacott, R. (1993). *Fundamentos de estadística para administración y economía* (1a ed). Limusa.

World Economic Forum. (2019). The Global Competitiveness Report 2019. In *World Economic Forum*. http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf

Wu, S., & Sargand, S. (2007). *USE OF DYNAMIC CONE PENETROMETER IN SUBGRADE AND BASE ACCEPTANCE* (Vol. 14817, Issue 14817).

Yau, A., & Quintus, H. L. Von. (2002). *Study of LTPP laboratory resilient modulus test data*

and response characteristics. *FHWA-RD-02-051*, 173. https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/reports/02051/02051.pdf

Zhou, C., Huang, B., Drumm, E., Shu, X., Dong, Q., & Udeh, S. (2015). Soil resilient modulus regressed from physical properties and influence of seasonal variation on asphalt pavement performance. *Journal of Transportation Engineering*, *141*(1), 1–9. https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000727

3.0 Ensayo Mini-CBR

Como se mencionó anteriormente en la revisión bibliográfica, el ensayo de Mini-CBR se postula como un ensayo rápido y económico para determinar la resistencia al corte de los suelos de subrasante. Es importante aclarar que este ensayo se estima como una alternativa al CBR tradicional pero no reemplaza los ensayos dinámicos que establecen las propiedades mecánicas de los suelos considerando los niveles de esfuerzos, como los ensayos de módulo resiliente (Mr) o el CBR cíclico (cCBR). Lo anterior quiere dejar claro que este ensayo presenta las mismas limitaciones que el ensayo tradicional y por lo tanto no representa satisfactoriamente el comportamiento de la subrasante ante diferentes estados de esfuerzos y cargas dinámicas.

Este capítulo tiene como finalidad presentar el correcto desarrollo del ensayo Mini-CBR junto con la cuantificación de los recursos necesarios para su ejecución. De este modo, se establece el costo real del ensayo y se implementa en el laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

3.1 Consideraciones generales

El ensayo de Mini-CBR es una prueba iniciada en la Universidad de Iowa y posteriormente desarrollada y estandarizada en Brasil para suelos lateríticos que busca ser una alternativa al ensayo de CBR reduciendo los tiempos y costos de extracción de muestras y de ejecución del ensayo, así como una disminución significativa en la cantidad de muestra necesaria.

El principio del ensayo es el mismo que el ensayo tradicional manteniendo un factor de escala para los diferentes elementos involucrados: molde, pistón, anillo de carga, cantidad de muestra. Para suelos limosos y arcillosos, especímenes de 2 pulgadas de diámetro por 2 pulgadas de altura se encontraron satisfactorios, es necesario el 5% de muestra y el 25% de tiempo respecto al ensayo tradicional (Chu & Davidson, 1955).

A continuación, se presentan las características del ensayo Mini-CBR frente al ensayo tradicional:

Tabla 3-1: Características de los ensayos CBR y Mini-CBR.

Características de los ensayos CBR y Mini-CBR			
Características	**Unidad.**	**CBR**	**Mini-CBR**
Limitante granulométrica	mm	19.1 (#3/4")	2.0 (#10)
Cantidad de muestra por molde	g	≈6000	≈180
Diámetro interno del molde	mm	152	50
Altura del molde	mm	178	130
Diámetro del pistón	mm	49.6	16
Velocidad de penetración	mm/min	1.27	1.25
Sobrecarga estándar	g	4540	500
Tiempo de inmersión	h	96	20

Fuente: adaptado de Marson, (2004)

Las penetraciones evaluadas de acuerdo con la norma brasilera (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997) son de 0,25 mm, 0,50 mm, 0,75 mm, 1,00 mm, 1,25 mm, 1,50 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 3,5 mm, 4,0 mm, 4,5 mm y 5,0 mm.

Como se describió detalladamente en la revisión bibliográfica, cada autor que ha investigado y desarrollado este ensayo ha buscado determinar una correlación entre las cargas obtenidas para cada una de las penetraciones descritas en el ensayo Mini-CBR y el valor del CBR tradicional.

De las investigaciones existentes Lafleur et al. (1960) fue el único que analizó arcillas de consistencia blanda de la ciudad de Iowa; las investigaciones restantes se realizaron para suelos lateríticos en Brasil y Perú.

La totalidad de las ecuaciones desarrolladas se presentan en el capítulo 2 de este informe, a continuación se presentan los dos grupos de ecuaciones más convenientes y usados: Lafleur et al. (1956) al ser el único en suelos similares a los de este estudio y la ecuación estandarizada en Brasil ya que es el punto de partida de las investigaciones posteriores:

(Lafleur et al., 1956):

IBV corresponde a la carga en kilogramos fuerza a la penetración descrita en el ensayo de Mini-CBR.

- CBR a 0.1 in:
  - Sin inmersión: Emplear IBV sin inmersión a una penetración de 0.06 in.

$$Log(CBR) = 1.1035 * Log(IBV) - 0.9675 \quad (3\text{-}1)$$

  - con inmersión: Emplear IBV con inmersión (24h) a una penetración de 0.08 in.

$$Log(CBR) = 0.9073 * Log(IBV) - 0.6287 \quad (3\text{-}2)$$

- CBR a 0.2 in:
  - Sin inmersión: Emplear IBV sin inmersión a una penetración de 0.06 in.

$$Log(CBR) = 0.8780 * Log(IBV) - 0.5160 \quad (3\text{-}3)$$

  - con inmersión: Emplear IBV con inmersión (24h) a una penetración de 0.10 in.

$$Log(CBR) = 1.1058 * Log(IBV) - 0.9739 \quad (3\text{-}4)$$

(Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997):

El valor de Mini-CBR1 y Mini-CBR2 son equivalentes al CBR 0.1" y CBR 0.2".

$$\log_{10}(Mini - CBR1) = -0.254 + 0.896 * \log_{10}(C1) \quad (20)$$

$$\log_{10}(Mini - CBR2) = -0.356 + 0.937 * \log_{10}(C2) \quad (21)$$

Donde,

C1: Carga (kg) correspondiente a una penetración de 2.0 mm

C2: Carga (kg) correspondiente a una penetración de 2.5 mm

Como se observa en las ecuaciones descritas, el principio del ensayo del Mini-CBR es determinar una correlación entre las cargas obtenidas para una penetración determinada y el resultado del CBR.

3.2 Técnica de la prueba Mini-CBR

Las variables y procedimientos tienen una gran similitud con lo estipulado en la norma INV-E-148 para CBR en condición inalterada. Sin embargo, como se ha reiterado en varias ocasiones se guarda una proporcionalidad con el ensayo tradicional, el principal cambio es el molde empleado ya que se necesita únicamente una muestra de 5 cm de altura por 5 cm de diámetro.

3.2.1. Extracción de muestras

Teniendo en cuenta que las muestras no son extraídas in-situ con el molde del Mini-CBR directamente, fue necesario emplear un tubo de pared delgada tipo Shelby (Figura 3-1) y posteriormente tallar la muestra para el molde del ensayo (Figura 3-2).

Figura 3-1 Tubo Shelby para la obtención de muestras inalteradas in-situ

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-2 Molde Para el ensayo del Mini-CBR

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, es necesario seguir los lineamientos y procedimientos para obtener muestras de suelo inalterado:

- Nivelar la superficie del terreno y presionar el tubo Shelby contra el suelo por el filo cortante, insertando el tomamuestras sin rotación, mediante un movimiento continuo y relativamente rápido.
- Retirar el muestreador lo más cuidadosamente posible para evitar alteraciones o perturbaciones en la muestra.
- Inmediatamente después de extraído se deberá remover el material suelto o perturbado en el extremo superior del tubo y aplicar la parafina en ambos extremos para conservar su humedad y propiedades. En caso de que el tiempo de espera entre la extracción y el ensayo sea muy corto, se podrá cubrir los extremos del tubo con papel vinipel cubriendo muy bien la muestra.
- Una vez se tenga la muestra en el laboratorio, se extrae del tubo y se repite el proceso con el molde de Mini-CBR: nivelar la superficie, presionar el molde contra la muestra por el filo cortante sin rotación.
- Una vez se tenga una muestra de 5cm de diámetro y altura, se procede a la realización del montaje y posterior ensayo.

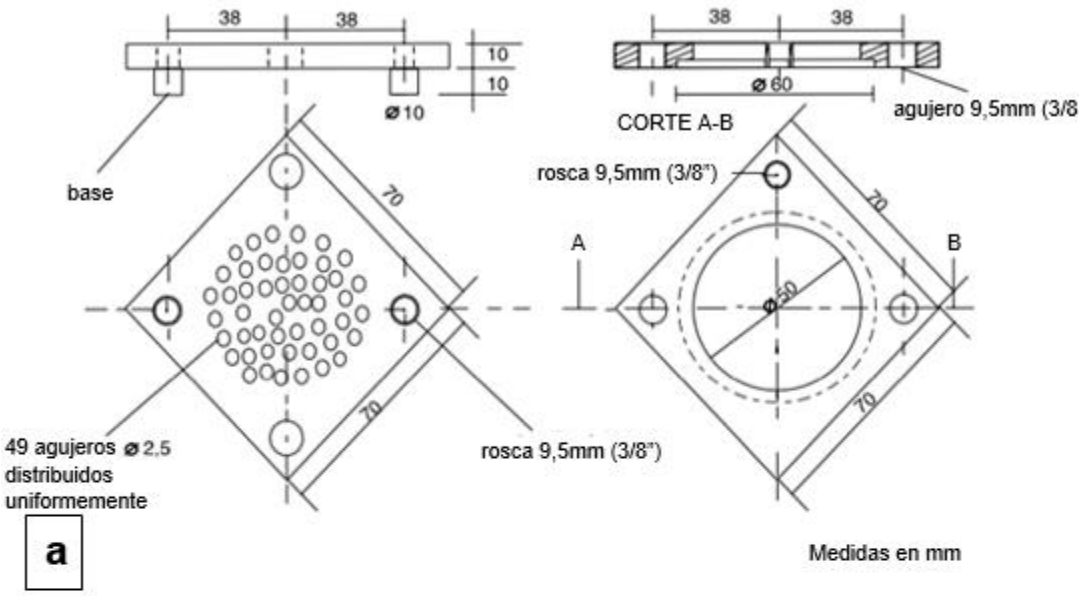
3.2.2. Equipo de Ensayo para el Mini-CBR

A continuación, se presentan los equipos necesarios para la realización del ensayo Mini-CBR, de acuerdo con la normativa DNER-ME 254/97 *"Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão"* (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

Junto al esquema de los equipos presentados en la norma, se presentan las fotos de los equipos utilizados para este trabajo.

- Equipo para la inmersión que consta de una base metálica perforada con 4 varillas que conectan a la tapa, una tapa metálica hueca para asegurar la base, una placa perforada con barra central para colocar la sobrecarga (ver Figura 3-3 a Figura 3-7).
- Pistón en acero de 16mm de diámetro y penetración mínima de 15cm, acoplable a un anillo dinamométrico o dispositivo equivalente que permita mantener la verticalidad durante el ensayo. (Figura 3-9)

- Cronómetro
- Prensa similar a la del ensayo CBR compuesta de:
    - Marco de engranaje con velocidad variable, acompañado de un plato reforzado ajustable al marco.
    - Conjunto dinamométrico constituido por: anillo de acero con dimensiones compatibles con la carga presentada, con dispositivo para fijar; extensómetro graduado en 0.01 mm fijo al centro del anillo para medir reducciones diametrales; pistón de penetración de acero.
    - Dispositivo para medición de penetración del pistón, dotado de un extensómetro que permita la lectura directa en 0.01mm y tacómetro, acoplable al pistón de penetración mediante un soporte como el presentado en la Figura 3-11.
- Papel de filtro
- Dispositivo con extensómetro con precisión de 0.01 mm para medida del crecimiento en altura de la muestra, durante la inmersión.
- Tanque de agua que satisfaga las siguientes condiciones:
    - Colocación del molde con la muestra y su respectivo armado en posición vertical.
    - Permita mantener una lámina de agua de 5 mm encima de la placa superior del armado.
    - Almacenamiento continuo de agua.
- Sobrecarga anular, metálica, con diámetro externo de 49mm, alma central de 18mm de diámetro y masa de 500g, de acuerdo con la Figura 3-10.
- Guía anular, metálica, de las mismas dimensiones de la sobrecarga.
- Extractor de muestras en moldes de 50 mm de diámetro.
- Horno capaz de mantener una temperatura de 110°C ± 5°C.
- Balanza con capacidad de 1kg y sensibilidad de 0.1 g.



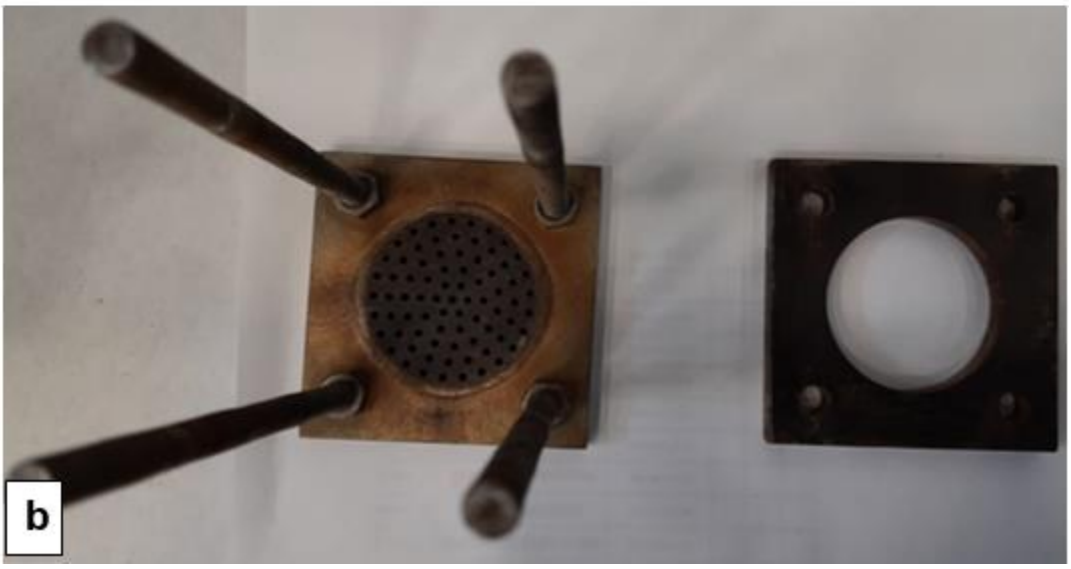


Figura 3-3: Base y tapa dispositivo miniatura para la inmersión de muestras; (a) esquema en la norma y (b) piezas usadas en la investigación

Fuente: adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997)

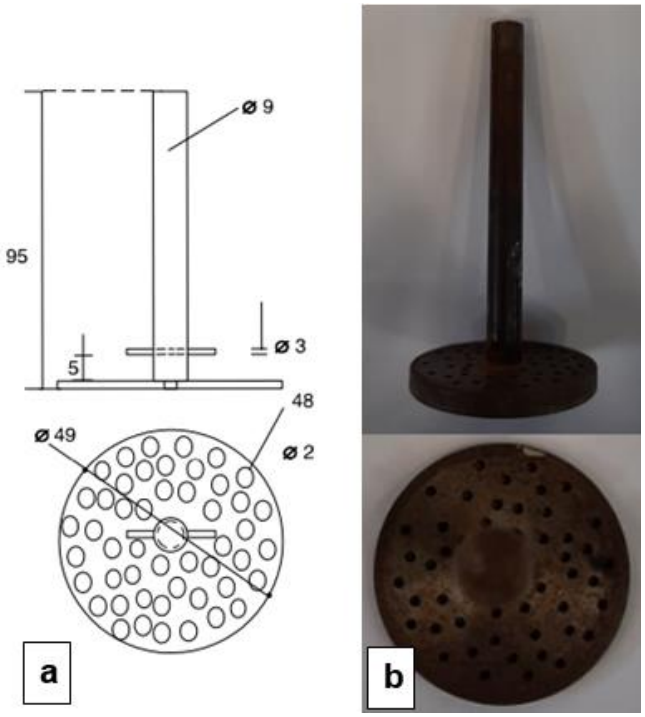


Figura 3-4: Placa perforada para sobrecarga dispositivo miniatura para la inmersión de muestras: (a) esquema en la norma y (b) pieza usada en la investigación

Fuente: adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997)

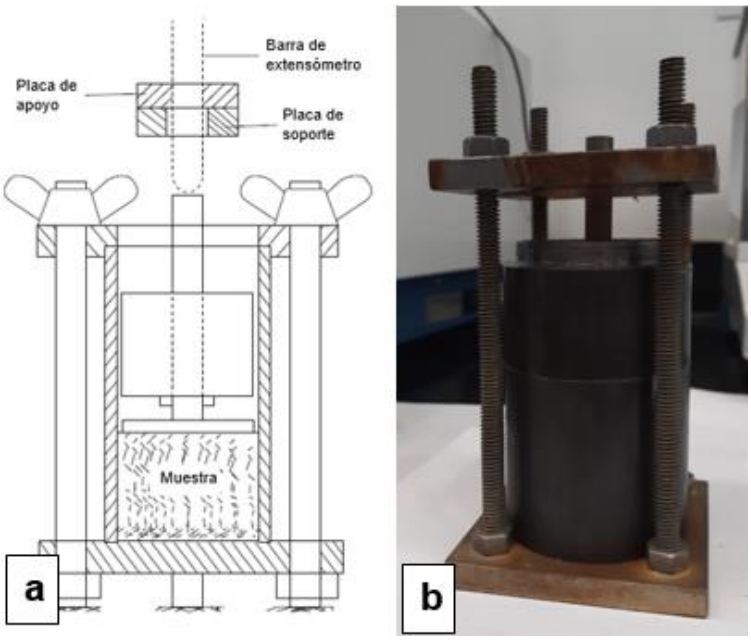


Figura 3-5: Montaje esquemático dispositivo miniatura para la inmersión de muestras: (a) esquema en la norma y (b) montaje real

Fuente: adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

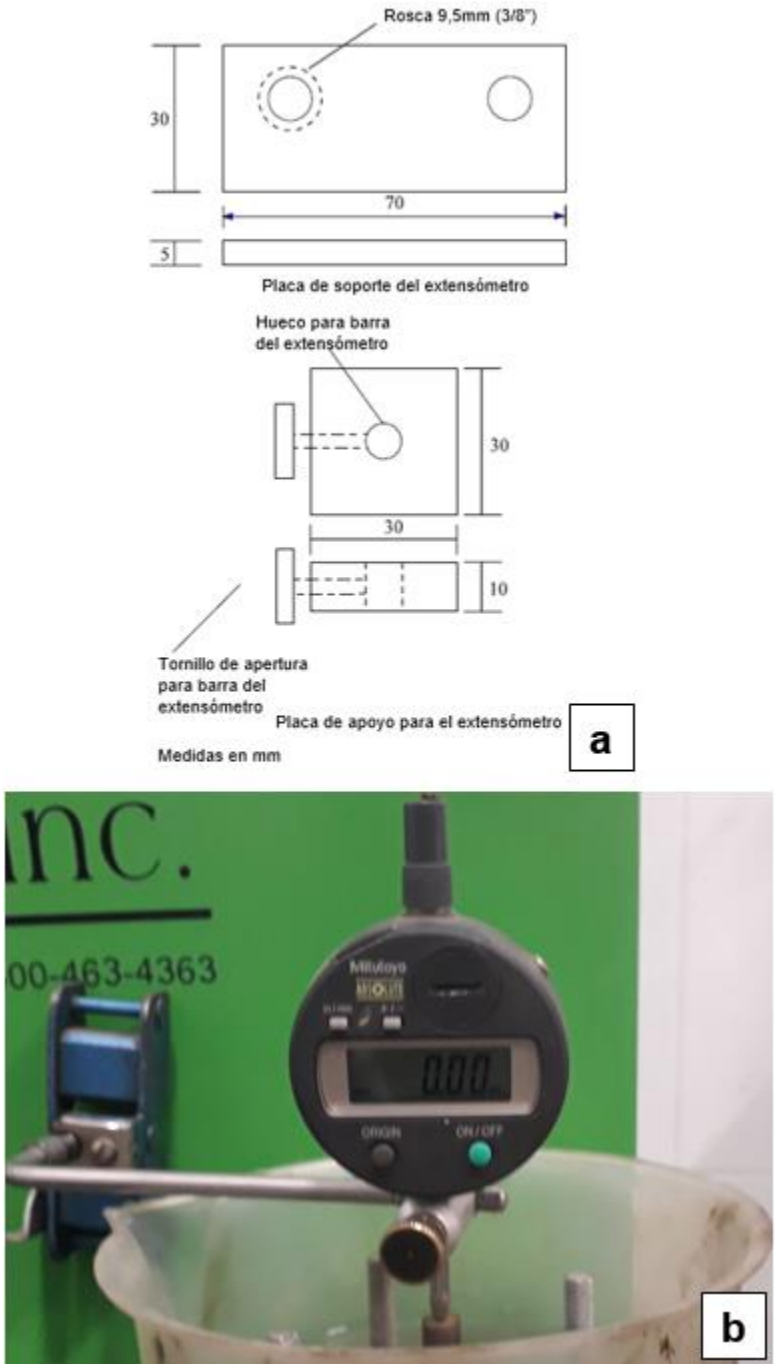


Figura 3-6: Placa de soporte y de apoyo del extensómetro para la inmersión de muestras: (a) esquema en la norma y (b) montaje empleado en la investigación

Fuente: adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

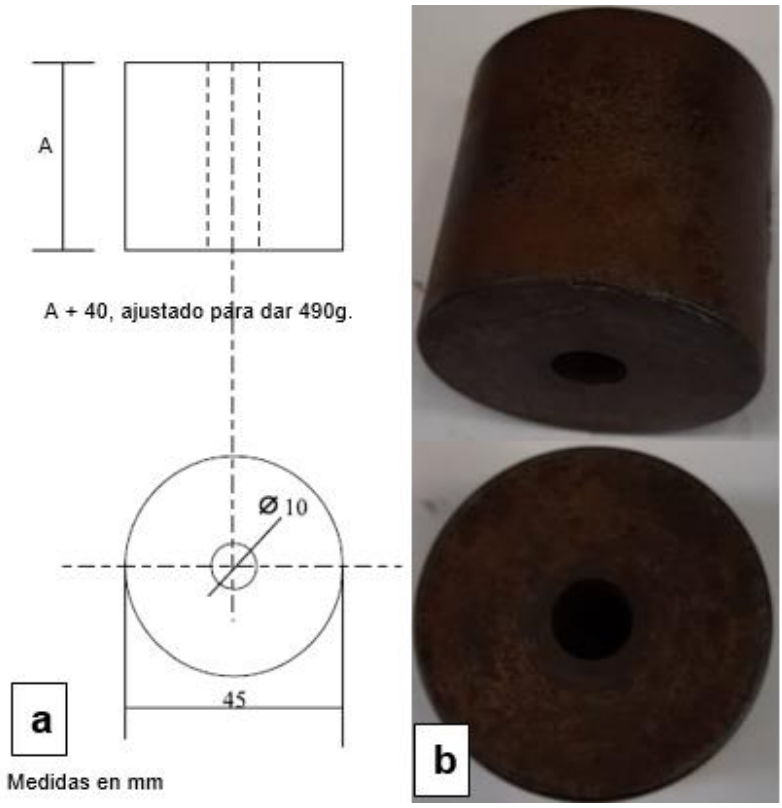


Figura 3-7: Sobrecarga anular para inmersión de 490g: (a) esquema en la norma y (b) pieza usada en la investigación

Fuente: adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

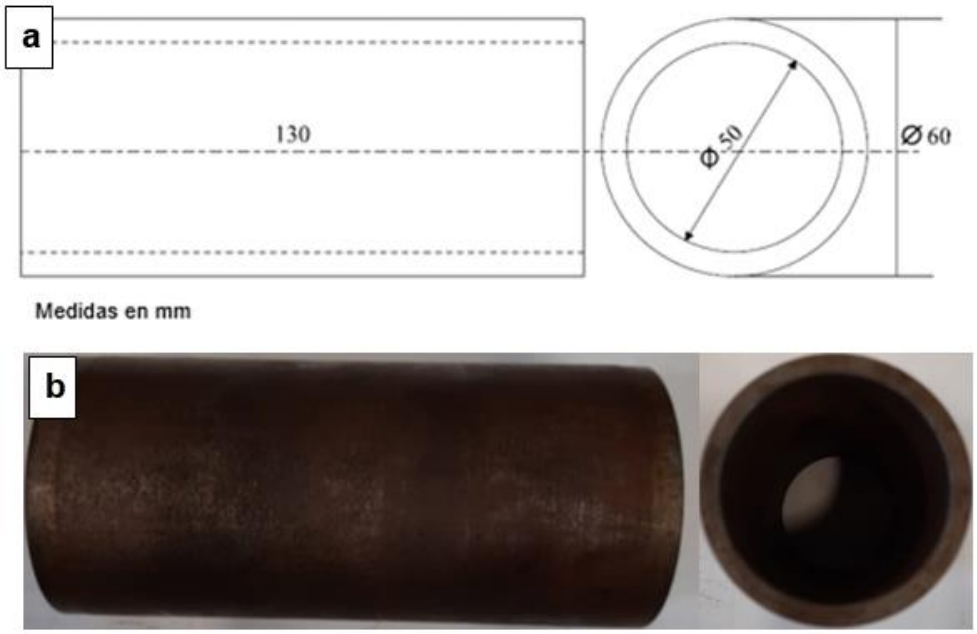


Figura 3-8: Molde Mini-CBR: (a) esquema en la norma y (b) pieza usada en la investigación

Fuente: adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

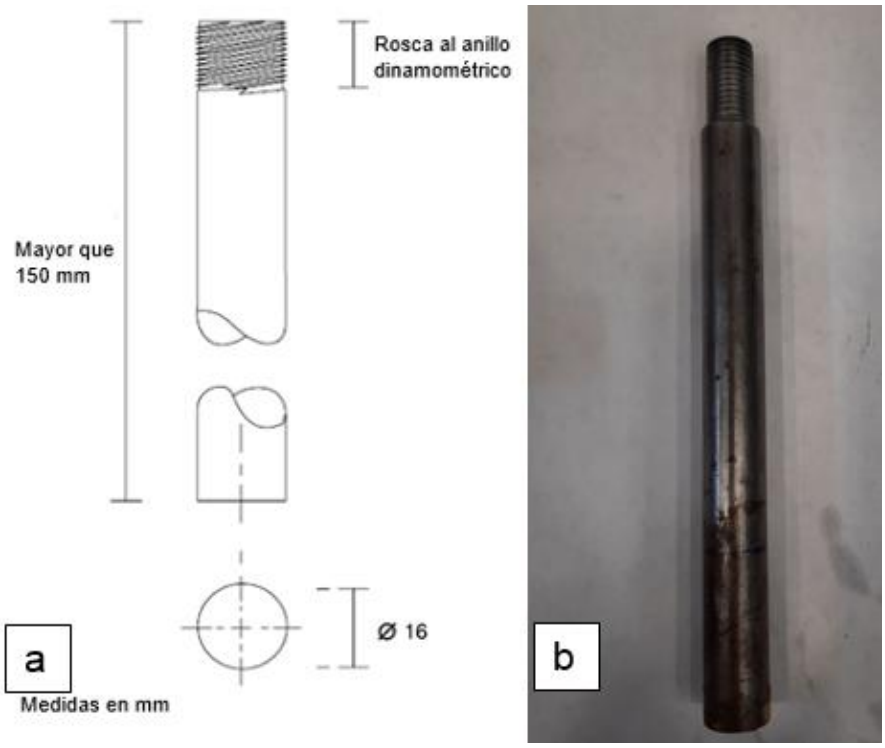


Figura 3-9: Pistón de penetración: (a) esquema en la norma y (b) pieza usada en la investigación

Fuente: adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

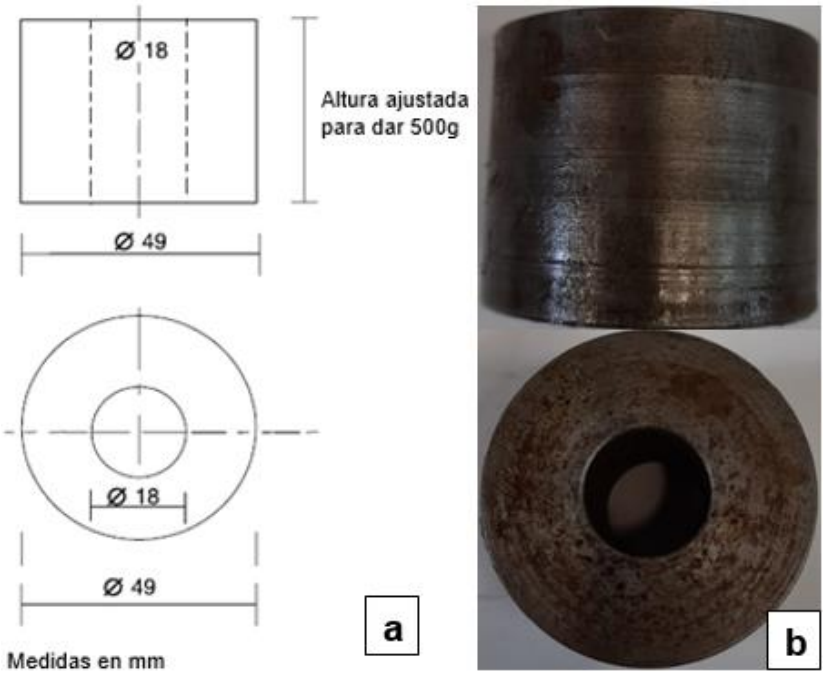
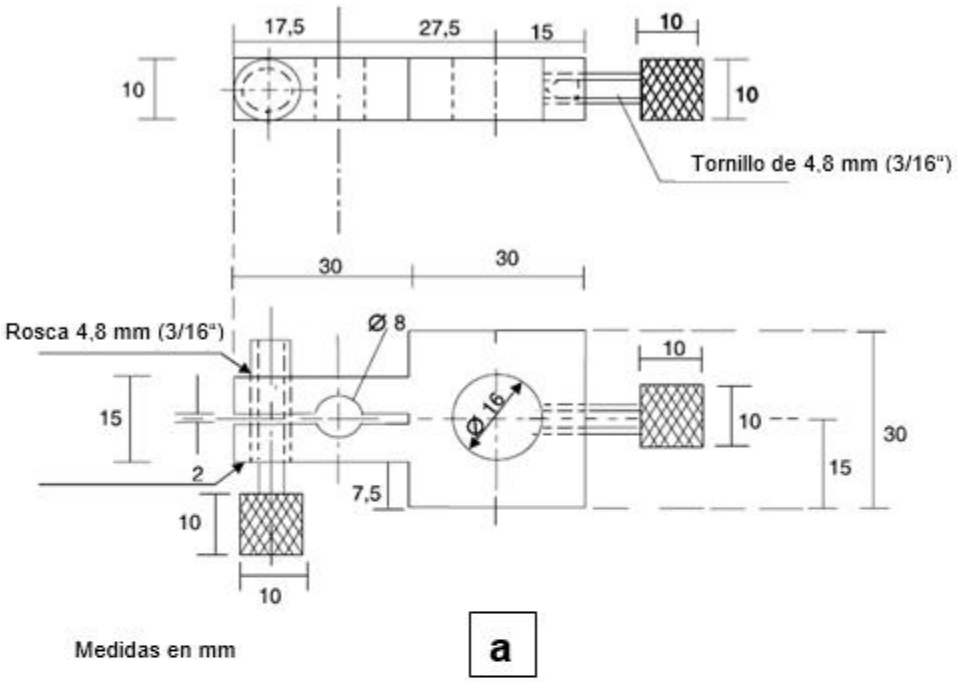


Figura 3-10: Sobrecarga anular para ensayo de penetración: (a) esquema en la norma y (b) pieza usada en la investigación.

Fuente: adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).



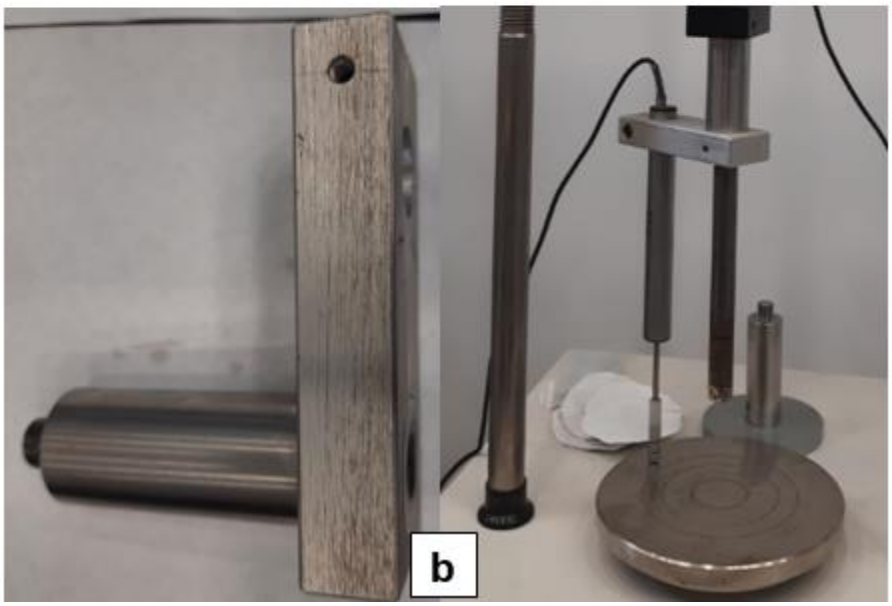


Figura 3-11: Dispositivo de acople del extensómetro: (a) esquema en la norma y (b) piezas usadas en la investigación.

Fuente: adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

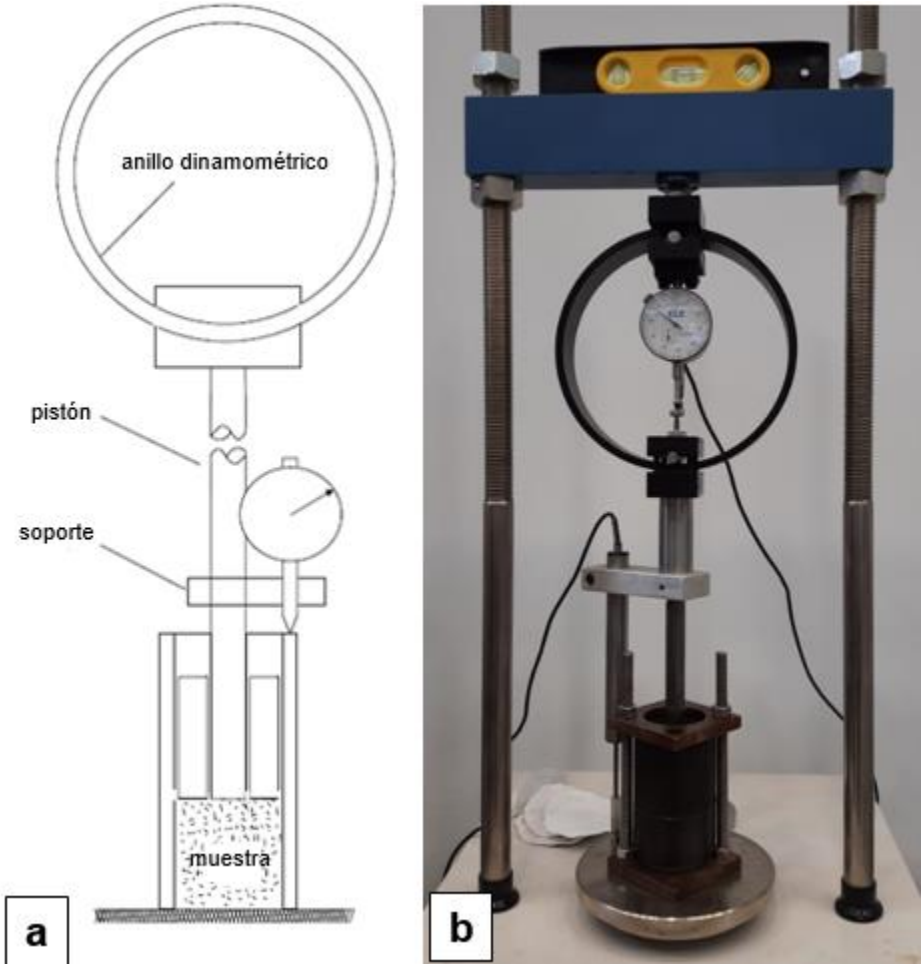


Figura 3-12: Montaje ensayo mini-CBR: (a) esquema en la norma y (b) montaje real en la investigación.

Fuente: adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

3.2.3. Procedimiento del ensayo para el Mini-CBR

3.2.3.1 *Mini-CBR con inmersión y sobrecarga*

1. Colocar papel de filtro en la base del armado para inmersión y colocar sobre este el molde con la muestra. Sobre la muestra, dentro del molde, colocar otro papel de filtro y encima el disco perforado equipado con el eje vertical, sobre éste añadir la sobrecarga anular. Colocar la placa superior del armado de inmersión y ajustar los tornillos.
2. Llevar el conjunto al tanque de inmersión vacío y medir la altura inicial (0.01 mm).

3. Llenar el tanque de inmersión hasta que la lámina de agua esté 5 mm por encima de la placa superior del conjunto. Registrar la hora exacta luego de la inmersión.
4. Dejar en inmersión por lo menos durante 20 horas, posteriormente efectuar la lectura final en el extensómetro.

   Nota: En la medida de lo posible, se recomienda que se efectúe adicionalmente la lectura a la hora, 4 horas y 6 horas.
5. Retirar el conjunto del tanque y desmontarlo. Colocar el molde levemente inclinado de manera que pueda escurrir el agua por un periodo de 15 minutos.
6. Dejar en reposo la muestra por cerca de 1 hora para disipar la presión neutra, evitando variaciones de temperatura y condiciones que propicien la pérdida de humedad. Retirar los discos de polietileno y colocar el disco de acero de la sobrecarga sobre el molde.
7. Llevar el molde a ensayar con la sobrecarga a la prensa de acero y ajustar el pistón.
8. A continuación, ajustar el extensómetro del dispositivo de medida de penetración, de manera que el puntero, que lee 0,01 mm, coincida con cero.
9. Configurar la velocidad de penetración a 1.27 mm/min
10. Efectuar medidas en el extensómetro del anillo dinamométrico, correspondientes a las siguientes penetraciones: 0,25 mm, 0,50 mm, 0,75 mm, 1,00 mm, 1,25 mm, 1,50 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 3,5 mm, 4,0 mm, 4,5 mm y 5,0 mm.
11. Bajar el plato de la prensa, quitar el molde mediante un extractor apropiado, con el fin de extraer el cuerpo de prueba.
12. Tomar una porción de la muestra de aproximadamente 5 mm de la parte superior, de la parte central y de la base, para determinar el contenido de humedad.

3.2.3.2 *Mini-CBR sin inmersión y con sobrecarga*

1. Retirar los discos de polietileno de la base y el extremo superior de la muestra.
2. Colocar papel de filtro en la base de la prensa y colocar sobre este el molde con la muestra. Sobre la muestra, dentro del molde, colocar otro papel de filtro y encima el disco perforado equipado con el eje vertical y la sobrecarga para penetración.
3. Realizar los procedimientos descritos en los pasos 7 a 12 del proceso con inmersión.

Figura 3-13: Procedimiento ensayo Mini-CBR: (a) Tallar la muestra, (b) Colocar la sobrecarga anular y empezar la penetración midiendo deformaciones, (c) Armar el molde de inmersión y dejar saturando la muestra midiendo expansión, (d) Escurrir el molde y realizar el ensayo con la sobrecarga y (e) muestra final luego del ensayo.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.3 *Cálculos*

3.2.3.3.1 Expansión:

Con los valores obtenidos en los puntos 2 a 4 en condición de inmersión, calcula lar expansión “E” de acuerdo con la ecuación 3-5.

$$E = \frac{(L_i - L_f) * 100}{A_i} \qquad (3\text{-}5)$$

Donde,

L_i: Lectura inicial del extensómetro, en milímetros, con aproximación de 0.01 mm.

L_f: Lectura final del extensómetro, en milímetros, con aproximación de 0.01 mm.

A_i: Altura inicial de la muestra, en milímetros, con aproximación de 0.01 mm.

Nota: en los suelos arcillosos altamente expansivos (E mayor a 5%) se recomienda realizar el gráfico tiempo vs expansión, las expansiones parciales se determinan con la misma ecuación y correspondientes a las lecturas intermedias

3.2.3.3.2 Mini-CBR (para las condiciones con inmersión (E) y sin inmersión (S) y con sobrecarga:

- Calcular las cargas, en kilogramos de fuerza, correspondientes a las lecturas del anillo dinamométrico (u otro dispositivo de medida de carga), marcar los puntos respectivos en el gráfico, con las penetraciones en abscisas y las cargas en ordenadas y trazar por ellos la curva media correspondiente.
- Dependiendo de la forma de la curva obtenida, corregirla de acuerdo con lo siguiente:

  Por punto de inflexión cerca al origen, Figura 3-14

- Cuando presente un punto de inflexión cerca del origen, trazar una tangente a la curva en ese punto, hasta que la misma intercepte el eje de las abscisas.
- La curva corregida se formará por esta tangente hasta el punto de inflexión y por el tramo original de la curva después de ese punto.
- Desplazar el cero de las abscisas a la intersección antes mencionada.

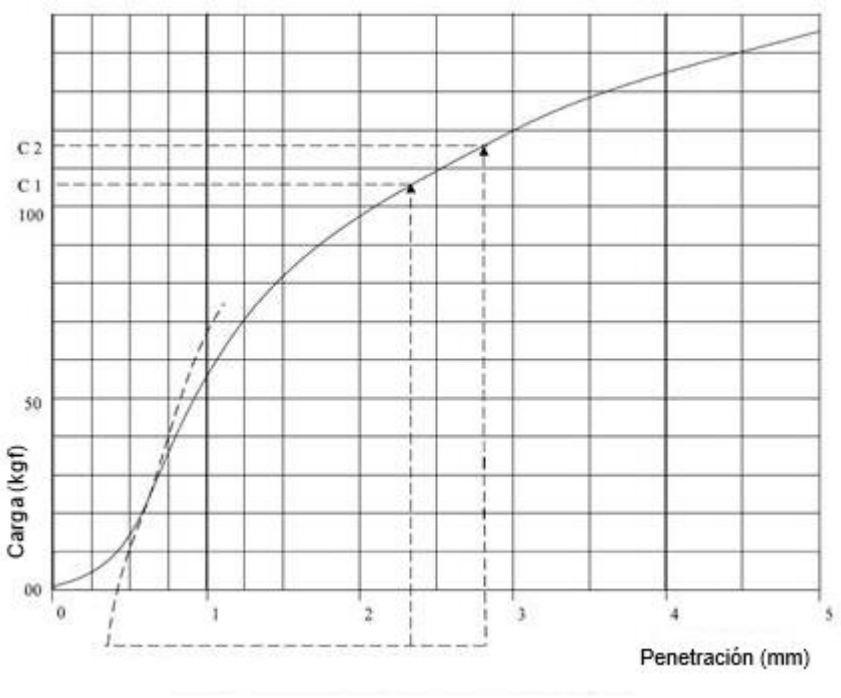


Figura 3-14: Corrección curva de mini-CBR por punto de inflexión cerca al origen.

Fuente: Adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

Por comportamiento decreciente (cizallamiento), Figura 3-15

- Cuando el tramo más allá de la penetración de 2,00 mm sea decreciente, indicando la ocurrencia de cizalla del cuerpo de prueba, corregirla prolongándola con la misma tendencia de la curvatura, desde un punto justo antes del valor de la carga máxima observada.
- Determinar las cargas en kilogramos de fuerza correspondientes a las penetraciones de 2,0 mm y 2,5

mm, luego de realizada la corrección de la gráfica (en caso de ser necesario).

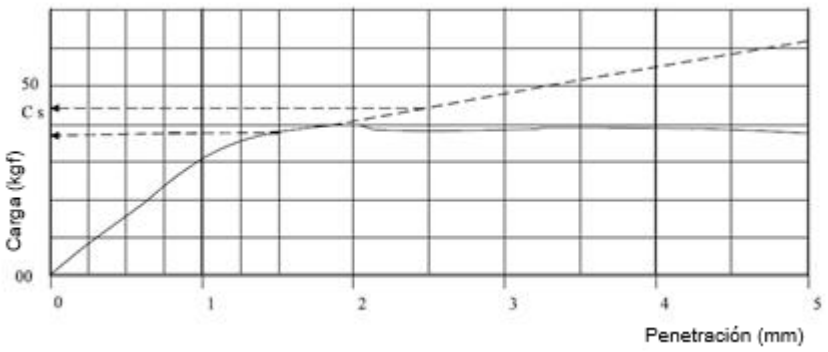


Figura 3-15: Corrección curva de mini-CBR por comportamiento decreciente (cizallamiento).

Fuente: Adaptado de (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

- Determinar las cargas en kilogramos fuerza de la curva del ensayo o luego de las correcciones descritas, correspondientes a las penetraciones de 2.0 mm y 2.5 mm.
- Calcular el Mini-CBR1 (penetración de 2.0 mm) y el Mini-CBR2 (penetración de 2.5 mm) por las siguientes fórmulas:

$$\log_{10}(Mini - CBR1) = -0.254 + 0.896 * \log_{10}(C1) \qquad (20)$$

$$\log_{10}(Mini - CBR2) = -0.356 + 0.937 * \log_{10}(C2) \qquad (21)$$

Donde,

C1: Carga (kg) correspondiente a una penetración de 2.0 mm

C2: Carga (kg) correspondiente a una penetración de 2.5 mm

3.3 Referencias

AASHTO. (1993). *Guide for design pavement sturctures 1993*. American ASsociation of State Highway and Transportation Officials.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2020). Plan Distrital de Desarrollo 2020-2024 Un Nuevo Contrato Social y Ambiental para la Bogotá del Siglo XXI. *Página Institucional*, *2009*(366), 170. http://concejodebogota.gov.co/cbogota/site/edic/base/port/inicio.php

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2010). *Decreto 523 de 2010*.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2021). *Plan Operativo Anual de Inversiones*.

Andrei, D., Witczak, M., Schwartz, C., & Uzan, J. (2004). Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. *Journal of the Transportation Research Board*, *1874*, 29–37.

Assali, M. P., Fortes, R. M., & Cymrot, R. (2003). Comparação da incerteza de medição entre ensaios CBR e mini CBR. *34º Reunião Anual de Pavimentação*, 20.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). Colombia Estrategia de País del BID 2015–2018. In *Colombia*. http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=40089561

Banco Interamericano de Desarrollo. (2019). *Estrategia del Grupo BID con Colombia (2019-2022)*. https://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=EZSHARE-1474758834-2

Barros, C. O. de A. (2003). *Revisão da Correlação Mini CBR / CBR para solos do municipio de São Carlos – SP*. Universidade de São Paulo.

Barroso, S. H. de A. (2002). *Estudo dos solos da regiäo metropolitana de Fortaleza para aplicacao na engenharia rodoviária*. Universidade de Sâo Paulo.

Bojacá Torres, D. C. (2019). *Módulo resiliente de suelos blandos de subrasante de la zona lacustre de Bogotá a partir del ensayo CBR cíclico*.

Cabrera, A. (2012). *Evaluation of the laboratory resilient modulus test using a New Mexico subgrade soil Recommended Citation "Evaluation of the laboratory resilient modulus test using a New Mexico subgrade soil*. https://digitalrepository.unm.edu/ce_etds.%22

Cámara Colombiana de la Infraestructura. (2009). *Tarifas de arrendamiento para equipos de construcción*.

CEPAL. (2018). Transporte de carretera en América Latina : evolución de la infraestructura y de sus impactos entre 2007 y 2015. *FAL*, *367*(7), 1–15. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44440/1/S1801184_es.pdf

Chu, T. Y., & Davidson, D. T. (1955). Some laboratory test for the evaluation of stabilized soils. *Iowa State University Bulletin*, *21*.

Clavijo, S., Vera, A., & Vera, N. (2013). *La inversión en infraestructura en Colombia 2012-2020*. 7–14. http://www.cvc.com.ve/docs/2016219124559Inversion en infraestructura Colombia 2013-2020.pdf

Dai, S., & Zollars, J. (2002). Resilient Modulus of Minnesota Road Research Project Subgrade Soil. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1786*(1), 20–28. https://doi.org/10.3141/1786-03

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1997). DNER - ME 254 Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão. In *Norma rodoviária*. http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me254-97.pdf

Dione, A., Fall, M., Berthaud, Y., Benboudjema, F., & Michou, A. (2014). *Implementation of Resilient Modulus - CBR relationship in Mechanistic-Empirical (M . -E) Pavement Design Abstract :* *1*(2), 65–71. https://www.researchgate.net/publication/271829406_Implementation_of_Resilient_Modulus_-_CBR_relationship_in_Mechanistic-Empirical_M_-E_Pavement_Design

Escobar Toro, L. J. (2011). *CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS TROPICALES EN UN TALUD DE LA AUTOPISTA MEDELLÍN – BOGOTÁ EN EL TRAMO DE VÍA ENTRE MARINILLA Y SANTUARIO*. Universidad Nacional de Colombia.

Fernandes, E. (2006). *ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS APLICADAS AOS SOLOS TROPICAIS*. Universidade de São Paulo.

FHWA. (2006). Geotechnical aspects of pavements. In *FHWA NHI-05-037* (Issue 132040). http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geotechnical+Aspects+of+Pavements#1

Garnica, P. Pérez, N. Gómez, J. (2001). Módulos de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares. In *Publicación Técnica N. 142* (Issue 142).

George, K. P. (2004). *Prediction of Resilient Modulus From Soil Index Properties. Report No. FHWA/MS-DOT-RD-04-172*. *November*, 72.

Grupo Banco Mundial. (2018). *Índice de desempeño logístico*. https://datos.bancomundial.org/indicador/LP.LPI.INFR.XQ?end=2018&start=2007&view=chart&year_high_desc=true

Hveem, F. N., & Carmany, R. M. (1949). The faactors underlying the rational design of pavements. *Twenty-Eighth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C.*, *28*, 101–136. https://trid.trb.org/view/104547

Indian Roads Congress. (2012). Tentative Guidelines for the design of Flexible Pavements. In *Indian Road Congress* (p. 108). https://archive.org/details/govlawircy2012sp37_0/page/90

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2017). *Capítulo técnico Geotecnia y Pavimentos*.

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), & Universidad Nacional de Colombia. (2013). *Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.* http://www.umv.gov.co/sisgestion2017/Documentos/MISIONAL/PDV/PDV-DE-003-V1_Guia_diseno_de_pavimentos_para_bajos_volumenes_de_transito_y_vias_locales_para_bogota.pdf

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012a). *INV 148-13 CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO Y SOBRE MUESTRA INALTERADA*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012b). *INV E-156-13 Módulo resiliente de suelos y agregados*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012c). *INV E-172-13 MÉTODO DE ENSAYO NORMAL PARA EL USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO EN APLICACIONES DE PAVIMENTOS A POCA PROFUNDIDAD*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2018). *Estado De La Red Vial Criterio Tecnico Segundo Semestre 2018*.

Khasawneh, M. A., & Al-jamal, N. F. (2019). Modeling resilient modulus of fine-grained materials using different statistical techniques. *Transportation Geotechnics*, *21*(February), 100263. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100263

Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. K., & Gurland, J. (1956). Relationship between the California Bearing Ratio and The Iowa Bearing Value. *Methods for Testing Engineering Soils*, *59*(December), 257–293. http://publications.iowa.gov/22209/1/IADOT_IHRB_Bulletin_21_Methods_Testing_Engineering_Soils_1960.pdf

Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. K., & John, G. (1960). Relationship between the California Bearing Ratio and The Iowa Bearing Value. In D. T. Davidson (Ed.), *Methods for testing engineering soils* (Vol. 59, Issue December, pp. 257–293). Iowa State University of Science and Technology. http://publications.iowa.gov/22209/1/IADOT_IHRB_Bulletin_21_Methods_Testing_Engineering_Soils_1960.pdf

Malaver Soto, N. M. (2018). *Lineamientos básicos para la clasificación de suelos tropicales en Colombia orientado a pavimentos* [Universidad Católica de Colombia]. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22378/1/TESIS VFinal%2830-nov-2018%29 ENTREGADA.pdf

Marson, L. A. (2004). *Correlações entre ensaios CBR e Mini-CBR para solos lateríticos de textura fina*. Insitituto Tecnológico de Aeronáutica.

Martinez, J. O., Gerena, C., & Nicely, A. (2013). *Correlación PDC Con CBR Para Suelos En La Localidad De Suba*. http://unimilitar-dspace.metabiblioteca.org/handle/10654/3653

Mendoza, C., & Caicedo, B. (2019). Elastoplastic framework of relationships between CBR and Young's modulus for fine grained materials. *Transportation Geotechnics*, *21*(September), 100280. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100280

Mohammad, L. N., Herath, A., Abu-Farsakh, M. Y., Gaspard, K., & Gudishala, R. (2007). Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *19*(11), 986–

992. https://doi.org/10.1061/40776(155)2

Montaña, D., & Durán, J. E. (2013). *Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá*. 1.

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia.

Moossazadeh, J., & Witczak, M. (1981). Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior. *Transportation Research Record*, *810*, 9–17. http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1981/810/810-002.pdf

Moreno Rubio, J. (2005). *Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas* [Universidad Politecnica De Catalunya]. http://hdl.handle.net/2099.1/3252

Narzary, B. K., & Ahamad, K. U. (2018). Estimating elastic modulus of California bearing ratio test sample using finite element model. *Construction and Building Materials*, *175*, 601–609. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.228

Nogami, J. S. (1972). Determinação do índice de suporte Califórnia com equipamentos de dimensões reduzidas. *II Reunião Das Administrações Rodoviárias*.

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1979). Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, *19*(1), 196–199. https://doi.org/10.1007/BF02600475

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1981). UMA NOVA CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PARA FINALIDADES RODOVIÁRIAS. *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais Em Engenharia*, 13.

Office of Minnesota road research. (1996). *User guide to the Dinamic cone penetrometer*. http://www.dot.state.mn.us/materials/researchdocs/User_Guide.pdf

Orozco Rojas, L. F. (n.d.). Presentación SCI. *Asentamientos de Edificios Altos*, 29.

Paige-Green, P., & Plessis, L. Du. (2009). *THE USE AND INTERPRETATION OF THE DYNAMIC CONE PENETROMETER (DCP) TEST* (Issue September).

Palomino, A., Salazar Ferro, F., Orozco, L. F., & Salcedo, M. (2016). *Tilting of a Large Apartment Building in Bogota, Colombia, Due to Foundation Failure and the Recuperation of Its Verticality*. 17–28. https://doi.org/10.1061/9780784480076.003

Reddy, C. N. V. S., & Moorthy, N. V. R. (2005). Significance of bearing capacity of clayey subgrade in flexible pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, *6*(3), 183–189. https://doi.org/10.1080/10298430500137194

Rehman, Z. U., Khalid, U., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2017). Prediction of CBR value from index properties of different soils. *Technical Journal University of Engineering and Technology Taxila, Pakistan*, *22*(August), 17–26.

Requiz Cristóbal, J. O. (2018). *Aplicación de la metodología MCT en estudio de suelos tropicales con fines de pavimentación en la selva baja del Perú. Caso: caminos vecinales de madre de dios.* [Universidad Nacional Federico Villarreal]. http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2145

Rojas lópez, M. D., & Ramírez Muriel, A. F. (2018). Inversión en infraestructura vial y su impacto en el crecimiento económico : Aproximación de análisis al caso infraestructura en colombia (1993-2014). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *17*(32), 109–128. https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a6

Rondón Quintana, H., Fernández Gómez, W., & Hernández Noguera, J. (2013). Influencia de la rigidez de la subrasante y las capas granulares sobre la vida a fatiga de mezclas asfálticas. *Tecno Lógicas*, *31*, 53–72. http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n31/n31a04.pdf

Sánchez, F., & Campagnoli, S. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras: Guía práctica para lo estudios y diseños* (Escuela Colombiana de Ingeniería (ed.); 1ra ed.).

Saurabh, J., Joshi, Y. P., & Goliya, S. S. (2013). Design of Rigid and Flexible Pavements by Various Methods & Their Cost Analysis of Each Method. *International Journal of Engineering Research and Applications*, *3*(5), 119–123.

Saxena, R. K. (1991). Can failures be minimized and pavement performance improved by adequately designing and constructing road subgrades. *Indian Roads Congress*, *52*(2), 263–311.

Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). RESILIENCE CHARACTERISTICS OF SUBGRADE SOILS AND THEIR RELATION TO FATIGUE FAILURES IN ASPHALT PAVEMENTS. *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Supplement*, 77–113. https://trid.trb.org/view/716093

Seed, H. B., Chan, C. K., & Monismith, C. L. (1955). EFFECTS OF REPEATED LOADING ON THE STRENGTH AND DEFORMATION OF COMPACTED CLAY. *Thirty-Fourth Annual Meeting of the Highway Research Board*, *34*, 541–558. https://trid.trb.org/view/126583

Seed, H. B., Mitry, F. B., Monismith, C. L., & Chan, C. K. (1967). PREDICTION OF FLEXIBLE PAVEMENT DEFLECTIONS FROM LABORATORY REPEATED-LOAD TESTS. *Trasnportation Research Board*, *35*, 117. https://trid.trb.org/view/104508

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Mapa Geológico Colombiano 2017*.

Souza, R. A. De. (2007). *Estudo Comparativo dos Ensaios de CBR e Mini-CBR para Solso de Uberlândia-MG* [Universidad Federal de Uberlândia]. https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14236/1/RASouzaDISPRT.pdf

Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3 ed.). John Wiley & Sons.

The Asphalt Institute. (1989). *The Asphalt Handbook Manual Series No. 4*.

Vidal, J., & Osorio, R. (2002). Módulo resiliente de suelos finogranulares. *Revista Universidad Eafit*, *125*, 63–72.

Wonnacott, T., & Wonnacott, R. (1993). *Fundamentos de estadística para administración y economía* (1a ed). Limusa.

World Economic Forum. (2019). The Global Competitiveness Report 2019. In *World Economic Forum*. http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf

Wu, S., & Sargand, S. (2007). *USE OF DYNAMIC CONE PENETROMETER IN SUBGRADE AND BASE ACCEPTANCE* (Vol. 14817, Issue 14817).

Yau, A., & Quintus, H. L. Von. (2002). *Study of LTPP laboratory resilient modulus test data*

and response characteristics. *FHWA-RD-02-051*, 173. https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/reports/02051/02051.pdf

Zhou, C., Huang, B., Drumm, E., Shu, X., Dong, Q., & Udeh, S. (2015). Soil resilient modulus regressed from physical properties and influence of seasonal variation on asphalt pavement performance. *Journal of Transportation Engineering*, *141*(1), 1–9. https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000727

4.0 Metodología y Caracterización de Muestras

Con el fin de desarrollar completamente los objetivos propuestos para esta investigación, se presenta a continuación una descripción detallada de la metodología seguida, los equipos utilizados durante los ensayos y la caracterización y clasificación de los materiales de subrasante empleados.

4.1 Metodología de la investigación

El trabajo se divide principalmente en cuatro etapas: la primera corresponde a la revisión del estado del arte, ya expuesta, por lo que solo se incluirá en este apartado la identificación y diagnóstico de la zona de trabajo, así como de la cantidad de muestras necesarias para realizarla; la segunda etapa contempla la extracción de las muestras inalteradas y la ejecución de los ensayos de resistencia in-situ; la tercera etapa abarca la totalidad de los ensayos de laboratorio requeridos para caracterizar física y mecánicamente cada muestra y finalmente, la cuarta etapa consiste en el análisis de los resultados obtenidos, determinación de correlaciones, recomendaciones y conclusiones.

4.1.1. Etapa 1: Identificación y diagnóstico de la zona de estudio

Para la delimitación de la zona de estudio se tuvieron en cuenta 4 factores principales: valores de CBR existentes, zonificación geotécnica, sísmica y geológica. Para los valores de CBR se contó con el apoyo de la firma LFO Ingenieros de Suelos S.A.S quienes suministraron información de sus proyectos, para las demás zonificaciones se empleó el decreto 523 de 2010 de la Alcaldía Mayor de Bogotá por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C.

4.1.1.1 *Zonificación proyectos existentes*

Se construyó una base de datos con 80 proyectos viales para la ciudad de Bogotá suministrados por la firma LFO Ingenieros de Suelos S.A.S., dentro de los cuales se contaba con 213 ensayos de CBR sobre muestra inalterada, todas las muestras extraídas corresponden al suelo de subrasante del proyecto analizado.

La base de datos cuenta con la siguiente información: Referencia, ubicación, # muestra, profundidad de extracción, descripción de la muestra, propiedades índice y valor de CBR, debido a su extensión, la tabla se presenta en el anexo 1. En la Figura 4-1, se presenta la localización de todos los proyectos analizados en Google Earth.

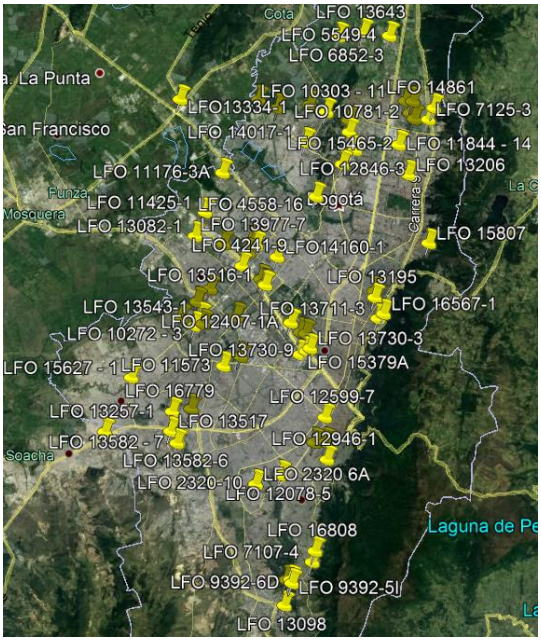


Figura 4-1: Localización proyectos analizados de la firma LFO Ingenieros de Suelos S.A.S.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta en resumen algunos de los análisis realizados para la caracterización de estos materiales de subrasante:

De las 213 muestras ensayadas, 55 fueron obtenidas sobre rellenos o no se realizaron ensayos de humedad natural y clasificación, 10 clasificaron como arenas arcillosas o limosas (SC, SM), 39 muestras como arcillas de alta compresibilidad (CH), 69 muestras como limos de alta compresibilidad (MH), 5 muestras con doble símbolo y alta compresibilidad (CH-CM), 31 muestras como arcillas de baja plasticidad (CL), 2 muestras como limos de baja compresibilidad (ML) y 2 muestras con doble símbolo y baja compresibilidad (ML-CL). En la Tabla 4-1 se presenta el resumen de las propiedades encontradas para cada suelo (Se analizaron únicamente las muestras de suelo fino):

Tabla 4-1: Resumen propiedades físicas y CBR, proyectos base de datos LFO.

		Profundidad (m)	Wn (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL (%)	%exp	CBR sin sat (%)	CBR sat (%)
Todas las muestras de suelo fino (n= 148)	Mín	0.2	5.3	17.4	9.5	7.9	-99.9	-0.7	0.8	0.2
	Máx	5.2	99.0	419.9	100.3	73.6	101.1	3.2	103.0	29.2
	Prom	1.1	48.2	79.2	41.5	35.1	16.1	0.5	7.4	3.9
	Desviación	0.6	23.8	40.2	21.3	14.7	35.6	0.6	11.2	3.4
Muestras CH (n=39, 26%)	Mín	0.2	22.9	50.3	17.8	25.0	-10.0	0.0	1.3	0.2
	Máx	5.2	83.3	156.6	100.3	73.6	70.9	3.2	21.6	7.9
	Prom	1.2	44.1	74.9	28.5	46.3	30.6	0.8	5.2	3.2
	Desviación	0.8	14.9	19.0	12.3	11.8	21.9	0.7	3.9	1.6
Muestras MH (n=69, 47%)	Mín	0.3	26.7	55.8	29.8	15.7	-133.3	0.0	1.9	0.7
	Máx	2.0	99.0	128.4	92.5	64.5	101.1	1.1	26.3	20.2
	Prom	1.0	63.3	95.1	58.6	36.4	11.0	0.2	5.7	3.8
	Desviación	0.3	20.2	19.3	13.8	11.4	45.7	0.3	3.6	2.7
Muestras CH-MH (n=5, 3%)	Mín	0.7	29.9	55.8	29.8	26.0	-10.0	0.0	1.9	0.8
	Máx	1.5	62.8	87.5	37.6	44.9	70.9	1.1	6.1	4.6
	Prom	1.1	48.0	71.8	33.5	37.3	37.0	0.5	4.1	3.1
	Desviación	0.3	16.7	11.3	2.9	7.0	42.0	0.5	1.7	1.5
Muestras CL (n=31, 21%)	Mín	0.2	7.8	17.4	9.5	7.9	-49.9	-0.7	0.8	0.3
	Máx	5.2	35.2	78.1	27.6	50.4	73.5	2.1	80.4	18.0
	Prom	1.2	22.1	37.8	19.0	19.1	13.0	0.5	10.5	4.2
	Desviación	0.8	8.5	10.4	3.9	8.0	34.6	0.7	15.3	3.5
Muestras ML (n=2, 1%)	Mín	0.7		48.9	30.1	18.7		0.0	8.2	2.3
	Máx	0.9		49.5	30.8	18.8		1.5	20.3	5.6
	Prom	0.8		49.2	30.5	18.8		0.8	14.2	4.0
	Desviación	0.0		0.4	0.5	0.1		1.1	8.5	2.4
Muestras ML-CL (n=2, 1%)	Mín	0.9		17.4	9.5	7.9		-0.7	5.0	2.7
	Máx	1.2		42.1	26.1	16.0		0.0	13.4	8.2
	Prom	1.1		29.8	17.8	12.0		-0.3	9.2	5.5
	Desviación	0.1		17.5	11.7	5.7		0.5	5.9	3.9

Wn: Humedad natural - LL: Límite líquido - LP: Límite plástico - IP: Índice de Plasticidad - IL: Índice de Liquidez - %exp: Porcentaje expansión

Fuente: elaboración propia, con base en los proyectos de LFO Ingenieros de Suelos S.A.S.

Es importante aclarar que los alores presentados pueden presentar una alta variabilidad por factores tales como tipo de suelo, profundidad de exploración y periodo en el que fueron extraídas.

Como era de esperar se obtienen valores de humedad natural y límites de Atterberg mayores en las muestras de alta compresibilidad que en las de baja y mayores en las muestras limosas frente a las arcillosas. Una de las muestras clasificadas como MH es conocida como un limo orgánico de color negro y gran expansibilidad, de ahí su elevado valor de índice de liquidez negativo. Los porcentajes de expansión en el ensayo de CBR son mayores en las muestras arcillosas que en las limosas.

Al revisar los resultados de CBR se observa que son mayores en las muestras de baja compresibilidad y a su vez se observa un ligero incremento en el valor de los limos respecto a las arcillas, lo anterior puede estar influenciado por la presencia de arenas que normalmente se encuentra en estas muestras.

Una vez se tenga la zona final delimitada se realizará un filtro de la base de datos existente para analizar unas muestras que en teoría serían más homogéneas.

4.1.1.2 *Zonificación por CBR*

En la Tabla 4-2 se resumen los valores de CBR encontrados para las 213 muestras analizadas, se observa que el intervalo típico para la zona blanda de Bogotá (1%<CBR<4%) corresponde al 63 % de las muestras evaluadas.

Teniendo en cuenta la variación observada en los valores de CBR y siendo conscientes que para cada proyecto cambiaba la profundidad de extracción o el suelo de subrasante, se decidió analizar la variación del CBR una vez se tenga una zona homogénea según las otras zonificaciones.

Tabla 4-2: Resumen valores CBR proyectos LFO Ingenieros de Suelos.

Rango CBR		Totales	
		Cantidad	Porcentaje
0.1	0.99	12	6%
1	1.99	43	20%
2	2.99	50	23%
3	3.99	43	20%
4	4.99	28	13%
5	100	37	17%
Total		**213**	**100%**

Fuente: elaboración propia.

4.1.1.3 *Zonificación Geotécnica*

Con base en el decreto 523 de 2010 (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010) y el geoportal del Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) se contempló trabajar únicamente con la zona Lacustre A, teniendo en cuenta que es la de mayor extensión. Sin embargo, la zona Lacustre B comparte las características y propiedades de la zona Lacustre A, por tal motivo, se decidió unificar las dos zonas.

A continuación, se presenta la descripción de las dos zonas analizadas, la información es extraída del decreto 523 de 2010 (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010). Como se mencionó anteriormente, las dos zonas corresponden a los suelos lacustres blandos objeto de esta investigación.

Tabla 4-3: Descripción zonas geotécnicas.

Nombre	Geotecnia	Geología	Geomorfología	Composición principal	Comportamiento geotécnico general
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	Terraza Alta - Lacustre	Planicie	Arcillas limosas muy blandas	Suelos de muy baja a baja capacidad portante y muy compresibles.
Lacustre B	Suelo lacustre blando			Arcillas limosas blandas	

Fuente: adaptado de decreto 523 de 2010 (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010).

La microzonificación de cada una de estas zonas fue plasmada en Google Earth para realizar su posterior superposición, tal y como se ve en la Figura 4-2a, Figura 4-2b y Figura 4-3.

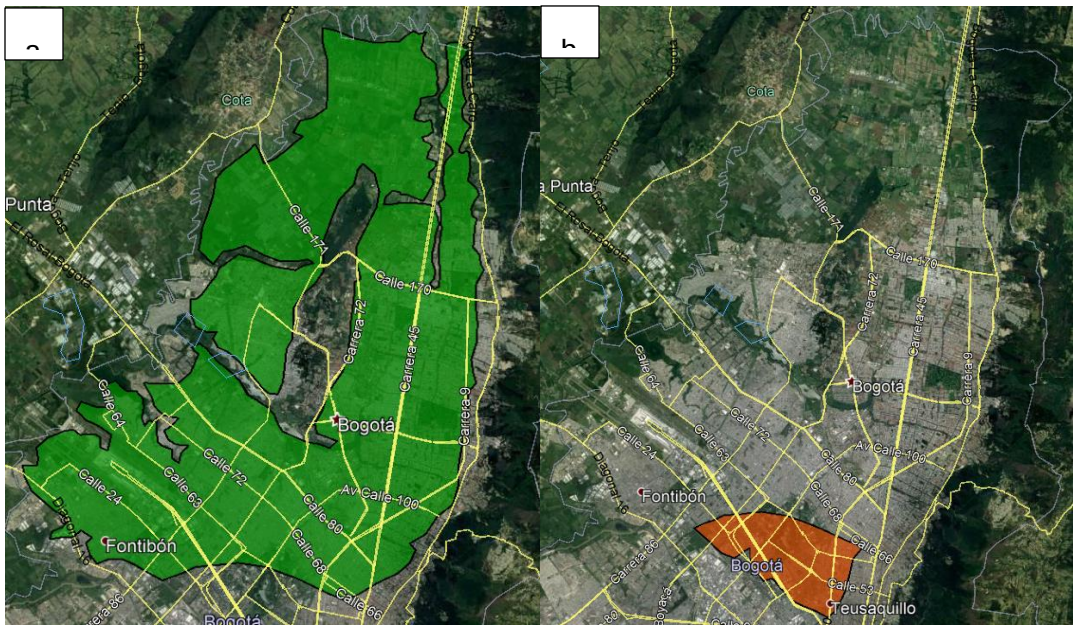


Figura 4-2: Microzonificación geotécnica de Bogotá. (a) Lacustre A, (b) Lacustre B,

Fuente: elaboración propia

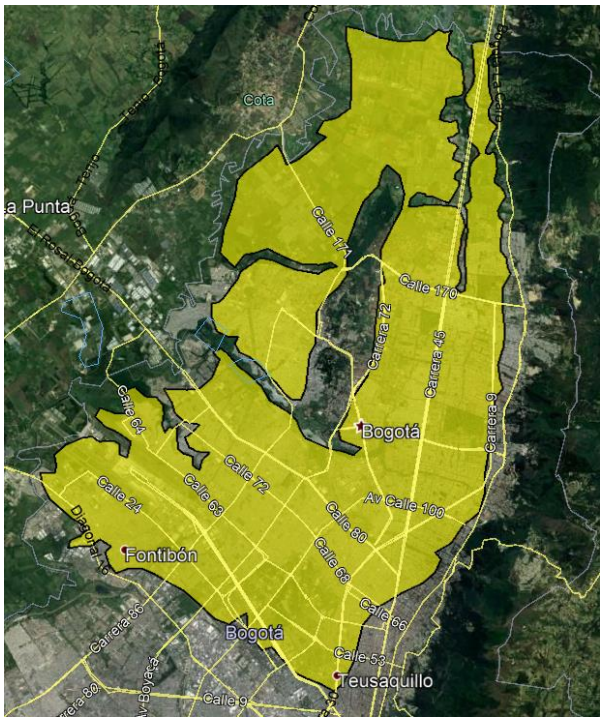


Figura 4-3: Zonificación geotécnica final para el proyecto.

Fuente: elaboración propia

4.1.1.4 *Zonificación Sísmica*

Con base en el decreto 523 de 2010 (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010) y el geoportal del Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) y teniendo en cuenta las características de cada una de las zonas, se decidió trabajar con la zona Lacustre 200 y Lacustre 300, las cuales abarcan la principal parte de la zona blanda de la Ciudad.

En la Tabla 4-4 se presenta la descripción de las dos zonas analizadas, la información es extraída del decreto 523 de 2010 (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010), como se mencionó anteriormente, las dos zonas corresponden a los suelos lacustres blandos objeto de esta investigación.

Tabla 4-4: Descripción de las zonas de respuesta sísmica.

Zona	Espesor del depósito (m)	Periodo fundamental del suelo (s)	Descripción geotécnica general	Velocidad onda promedio 50m Vs (m/s)	Humedad promedio 50 m Hn (%)	Efectos de sitio relacionados
Lacustre 200	100 - 200	2.5 - 3.5	Suelo lacustre blando: Arcillas limosas o limos arcillosos, en algunos sectores con intercalaciónes de lentes de turba	<175	>80	Amplificación
Lacustre 300	200 - 300	3.5 - 4.5				

Fuente: adaptado de decreto 523 de 2010 (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010)

La microzonificación de cada una de estas zonas fue plasmada en Google Earth para realizar su posterior superposición, tal y como se ve en la Figura 4-4 y Figura 4-5.

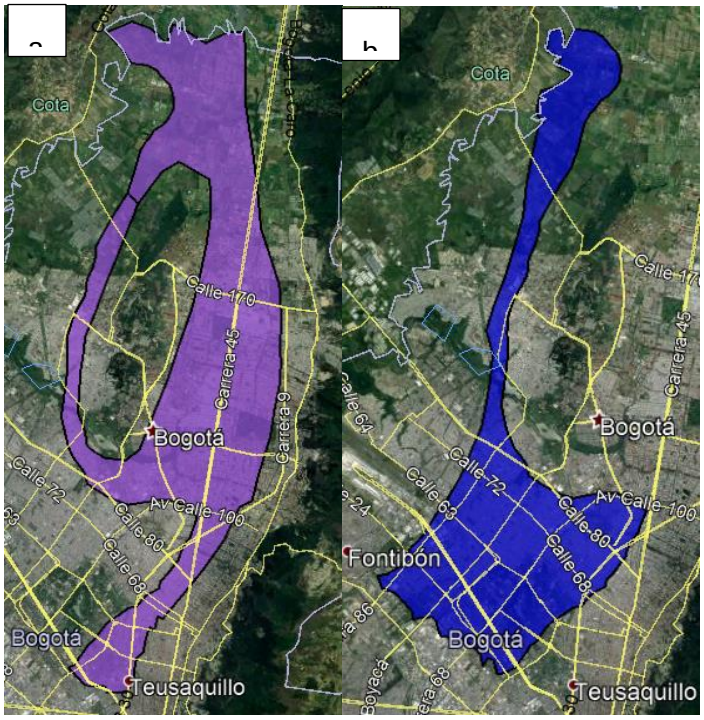


Figura 4-4: Microzonificación sísmica de Bogotá. (a): Lacustre 200, (b): Lacustre 300.

Fuente: elaboración propia.

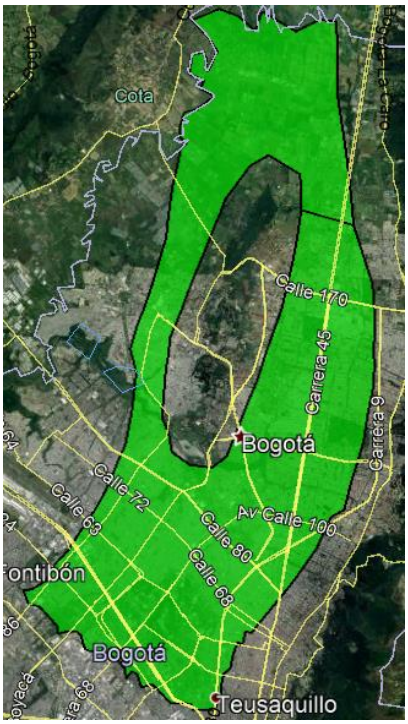


Figura 4-5: Zonificación sísmica final.

Fuente: elaboración propia.

4.1.1.5 *Zonificación Geológica*

Para la zona blanda de la Ciudad de Bogotá se tiene en términos generales una homogeneidad geológica, la cual se puede describir de la siguiente manera:

De acuerdo con el mapa geológico de Colombia, (Servicio Geológico Colombiano, 2017) la zona seleccionada pertenece a la unidad cronoestratigráfica Q1-l del Pleistoceno. La unidad está conformada por arcillas, turbas y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas.

De acuerdo con el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, la zona pertenece a la unidad geológica Qsa1 y Qsa2, correspondientes a la Formación Sabana. La unidad está conformada por arcillas orgánicas, turbas, arcillas arenosas y arenas arcillosas intercaladas, (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010).

La microzonificación de esta zona geológica de acuerdo con el geoportal del IDIGER fue plasmada en Google Earth, tal y como se ve en la Figura 4-6.

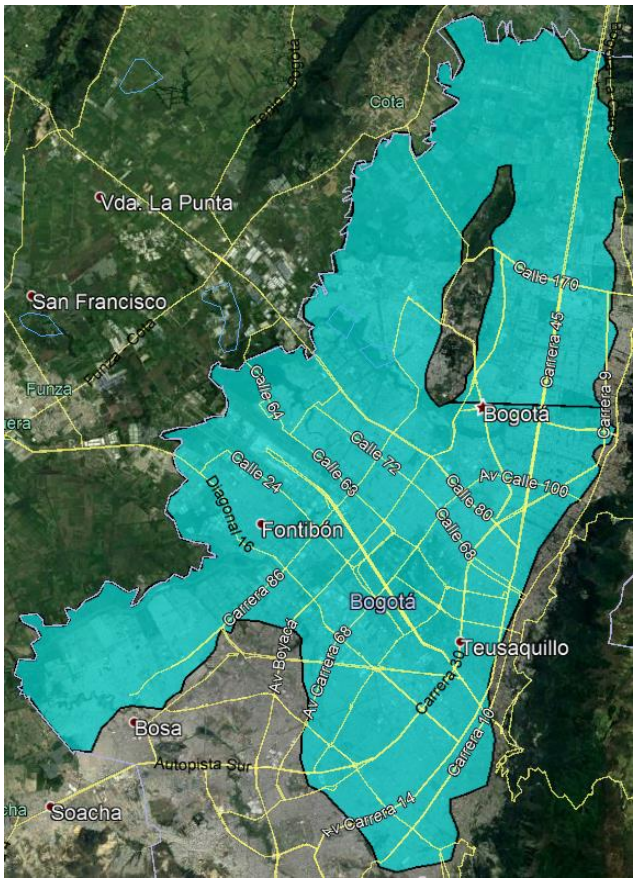


Figura 4-6: Microzonificación geológica final,

Fuente: elaboración propia.

4.1.1.6 *Delimitación zona definitiva*

Teniendo en cuenta las microzonificaciones presentadas anteriormente, se realizó la superposición de las 3 zonas finales obteniendo una zona que comprende en general desde la calle 26 hasta la calle 235 entre la carrera novena y la carrera 104.

En general la zona delimitada abarca la zona nor-oriental de la ciudad hasta donde empiezan a predominar los cerros orientales y no se incluyen los cerros de suba. En la Figura 4-7 se presenta en un mapa la zona seleccionada.

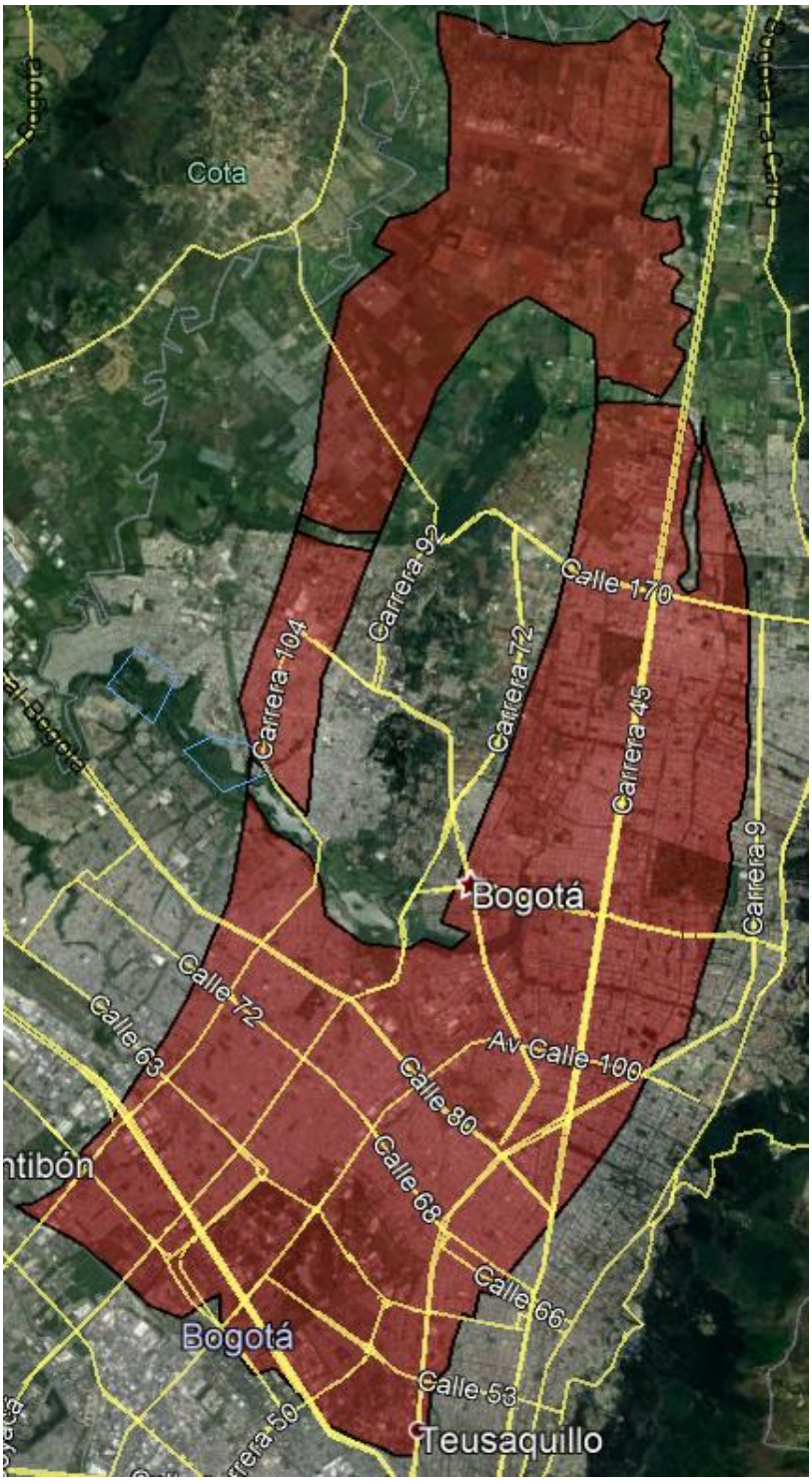


Figura 4-7: Zona de estudio.

Fuente: elaboración propia

A pesar de su gran extensión, los suelos correspondientes a esta zona deberían tener un comportamiento similar al pertenecer a las mismas microzonificaciones sísmicas, geológicas y geotécnicas.

4.1.1.7 *Análisis de los resultados de CBR en la zona de estudio*

Una vez determinada la zona común entre las unidades geotécnicas, geológicas y sísmicas descritas anteriormente, se procedió a filtrar los proyectos existentes en la base de datos. En total se cuenta con 23 proyectos realizados (Figura 4-8) y 70 ensayos de CBR sobre muestra inalterada. De estos ensayos se excluyeron del análisis 6 muestras que fueron extraídas sobre rellenos (tal y como se aprecia en la descripción de la muestra).

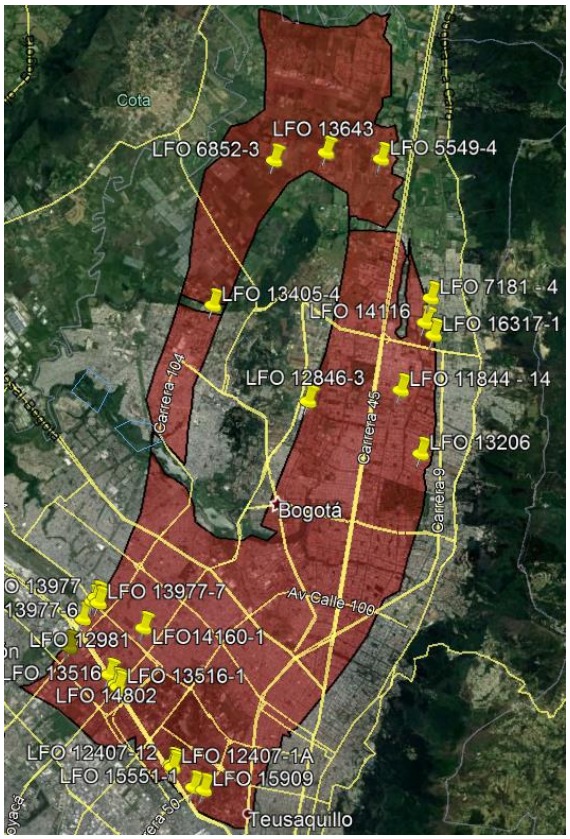


Figura 4-8: Ubicación proyectos de referencia en zona de estudio.

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 4-5, se presenta el cuadro resumen filtrado de los valores de CBR obtenidos luego de inmersión para las muestras ensayadas dentro de la zona seleccionada. El cuadro completo de clasificación y resultados para la zona

delimitada se presenta en el anexo 2. Un resumen de los ensayos de caracterización física se presenta en la Tabla 4-6 .

Tabla 4-5: Resumen valores CBR proyectos dentro de la zona de estudio.

Rango CBR		Totales		Filtrados	
		Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
0.1	0.99	3	4%	3	5%
1	1.99	7	10%	6	9%
2	2.99	25	36%	24	38%
3	3.99	17	24%	15	23%
4	4.99	11	16%	9	14%
5	100	7	10%	7	11%
Total		70	100%	64	100%

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con las muestras filtradas del cuadro anterior, el 70% en el rango entre 1 y 4%, lo cual coincide con los valores típicos empleados en diseño para la zona lacustre de la ciudad de Bogotá.

Tabla 4-6: Resumen ensayos de caracterización física dentro de la zona de estudio.

Resumen ensayos de caracterización física dentro de la zona de estudio							
		Profundidad (m)	Wn (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL (%)
CBR saturado menor a 1%	Mín	0.5	25.0	62.0	24.2	37.8	2.1
	Máx	1.5	51.2	81.2	32.2	54.8	50.2
	Promedio	1.0	40.5	71.1	27.6	43.5	28.9
	Desv. Est	0.4	13.7	9.6	4.1	9.8	24.5
CBR saturado Entre 1 y 2%	Mín	0.3	61.4	82.7	59.7	23.0	7.2
	Máx	1.6	99.0	125.1	67.2	64.5	101.1
	Promedio	1.0	81.7	103.9	63.0	40.8	56.7
	Desv. Est	0.4	17.9	16.6	3.1	15.9	39.5
CBR saturado Entre 2 y 3%	Mín	0.6	15.1	27.2	16.5	10.7	-23.3
	Máx	1.8	84.0	156.6	100.3	72.1	70.9
	Promedio	1.0	50.8	90.1	50.3	40.1	21.2
	Desv. Est	0.2	21.5	29.1	20.6	15.2	29.2
CBR saturado Entre 3 y 4%	Mín	0.5	38.4	65.6	21.2	22.8	9.1
	Máx	2.0	98.1	123.2	67.6	56.0	76.7
	Promedio	1.1	58.6	89.5	45.1	44.0	35.3
	Desv. Est	0.4	18.8	17.2	14.5	9.9	23.0
CBR saturado Entre 4 y 5%	Mín	0.6	15.1	24.7	15.8	8.9	-36.2
	Máx	1.6	86.1	107.5	76.8	49.1	49.8
	Promedio	1.2	49.4	79.5	47.6	31.9	12.3
	Desv. Est	0.3	23.4	27.1	25.1	11.4	33.4
CBR saturado mayor a 5%	Mín	0.5	38.2	73.3	29.3	31.4	10.1
	Máx	1.2	45.1	126.0	75.3	50.7	18.2
	Promedio	0.8	41.7	95.7	54.3	41.4	14.2
	Desv. Est	0.2	4.9	21.0	18.6	8.4	5.7
Totales	Mín	0.3	15.1	24.7	15.8	8.9	-36.2
	Máx	2.0	99.0	156.6	100.3	72.1	101.1
	Promedio	1.0	53.8	88.3	48.0	40.3	28.1
	Desv. Est	0.3	22.0	24.5	19.2	13.0	30.3

Wn: Humedad natural - LL: Límite líquido - LP: Límite plástico - IP: Índice de plasticidad - IL: Índice de liquidez

Fuente: elaboración propia.

En términos generales, de acuerdo con las descripciones realizadas en el laboratorio para los estudios de la base de datos, los suelos de subrasante típicos de la zona corresponden a limos de alta compresibilidad de color gris a café (MH) en un 57% y arcillas también de alta compresibilidad de color café (CH) en un 32%, en algunos casos se pueden presentar rastros de arena o raíces.

De acuerdo con la Tabla 4-6 los suelos de subrasante se encontraron a profundidades que varían generalmente entre 0.6 y 2.0m, la variación se debe a los diferentes espesores de relleno empleados en su momento para la nivelación de los terrenos. En cuanto a las propiedades físicas se tienen variaciones de la humedad natural entre 15 y 99% con una desviación estándar de 22%, límites líquidos entre 24 y 157% con una desviación estándar de 24.5%, límites plásticos entre 16 y 100% con una desviación estándar de 19.2%, índices de plasticidad

entre 9 y 72% con una desviación estándar de 13% e índices de liquidez entre -36 y 101% con una desviación estándar de 30.3%.

4.1.1.8 *Análisis de la base de datos en la zona de influencia*

Tal y como se realizó para la totalidad de los proyectos existentes en la base de datos elaborada, se procedió a realizar la caracterización de las muestras existentes en la zona delimitada para este proyecto:

De las 70 muestras ensayadas 6 fueron obtenidas sobre rellenos, a 9 muestras no se le realizaron ensayos de humedad natural y clasificación, 3 muestras clasificaron como suelo fino orgánico (OH), 2 clasificaron como arenas arcillosas o limosas (SC, SM), 9 muestras como arcillas de alta compresibilidad (CH), 37 muestras como limos de alta compresibilidad (MH) y 4 muestras con doble símbolo y alta compresibilidad (CH-CM). En la Tabla 4-7 se presenta el resumen de las propiedades encontradas para cada suelo (Se analizaron únicamente las muestras de suelo fino):

Tabla 4-7: Análisis de las muestras de la base de datos dentro de la zona de estudio.

		Profundidad (m)	Wn (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL (%)	%exp	CBR sin sat	CBR sat
Todas las muestras (n=50)	Mín	0.3	36.8	65.6	18.2	17.5	-36.2	0	1.87	0.79
	Máx	2	99	156.6	100.3	72.1	101.1	3.16	14.7	6.7
	Prom	1.1	63.6	96.6	53.9	42.6	28.1	0.4	5.1	3.3
	Desviación	0.3	18.6	18.6	17.1	11.9	33.1	0.6	2.7	1.2
Muestras CH (n=9, 18%)	Mín	0.7	36.8	69.4	18.2	45.4	18.2	0	3.12	2.7
	Máx	1.5	69.7	105.9	35.5	72.1	64.8	3.16	14.7	6.7
	Prom	1.1	49.1	80.4	27.4	53.0	38.5	1.2	5.5	3.8
	Desviación	0.2	10.7	10.6	6.9	8.5	14.3	1.1	3.6	1.2
Muestras MH (n= 37, 74%)	Mín	0.3	38.4	65.6	39	17.5	-99.9	0	2.13	1.5
	Máx	2	99	126	76.8	64.5	101.1	1.08	13.31	6.05
	Prom	1.0	70.5	100.5	60.6	39.9	15.6	0.2	5.3	3.3
	Desviación	0.3	18.5	15.1	8.7	11.7	46.0	0.2	2.5	1.2

Wn: Humedad natural - LL: Límite líquido - LP: Límite plástico - IP: Índice de Plasticidad - IL: Índice de Liquidez - %exp: Porcentaje expansión

Fuente: elaboración propia con base en los proyectos de LFO Ingenieros de Suelos S.A.S.

Tal y como se esperaba, las muestras de alta compresibilidad presentan mayores contenidos de humedad y límites de Atterberg más elevados que las muestras de baja compresibilidad, de igual manera, las muestras limosas presentan valores superiores en estas propiedades frente a las arcillosas.

Los porcentajes de expansión son más altos en las muestras arcillosas frente a las limosas pero en general no se obtienen valores mayores al 2%. Se encontraron limos orgánicos oscuros que presentan índices de liquidez negativos y de gran resistencia a causa de la desecación del terreno.

Los resultados del ensayo CBR (natural y sumergido) fueron similares para ambos tipos de suelo pero con un ligero aumento en las muestras arcillosas.

Se realizó un análisis particular a los límites de Atterberg para determinar en cual estado de consistencia se encontraba cada muestra, en la Figura 4-9 y la Figura 4-10 se presentan los resultados obtenidos.

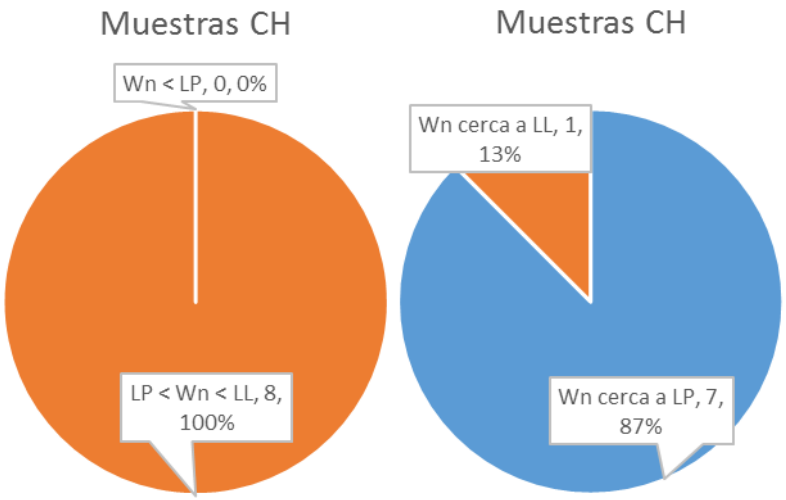


Figura 4-9: Estado de consistencia para las muestras CH de la base de datos en la zona delimitada.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 4-9, todas las muestras de arcilla de alta compresibilidad (CH) se encuentran dentro del estado plástico y la gran mayoría tienden más al límite plástico que al límite líquido.

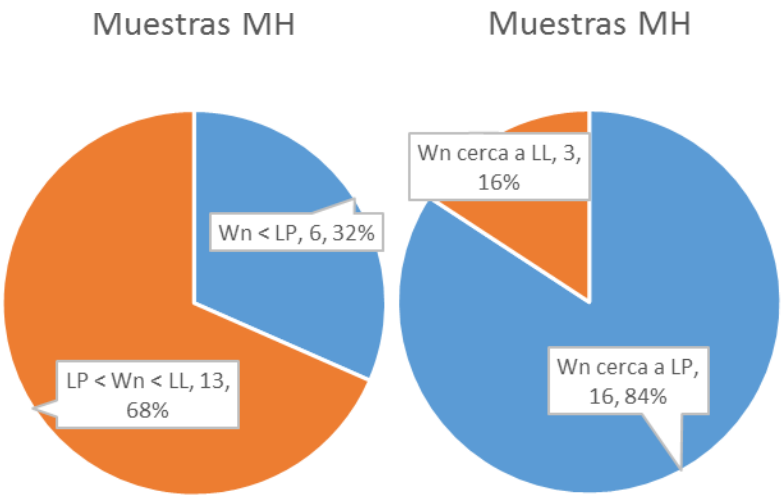


Figura 4-10: Estado de consistencia para las muestras MH de la base de datos en la zona delimitada.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 4-10, se observa que aproximadamente un tercio de las muestras se encuentra en el estado semisólido y las muestras restantes dentro del estado plástico. La gran mayoría tienden más al límite plástico que al límite líquido.

4.1.1.9 *Determinación muestras a ensayar*

Para determinar la cantidad de muestras a ensayar en la caracterización de la subrasante no existe alguna especificación en particular, por tal motivo, se seguirán las recomendaciones dadas por Sánchez & Campagnoli, (2016).

La metodología consiste en tener suficientes muestras para obtener cierto grado de confiabilidad mediante intervalos de confianza, logrando que la probabilidad de que la diferencia entre la media de la muestra y la media de la población se encuentren dentro de los rangos establecidos previamente.

Inicialmente se define el máximo valor del límite de precisión (R), el cual resulta de la diferencia entre la media de la muestra ($\bar{x}$) y la media real de la población (μ). Este parámetro representa el rango del valor real de la propiedad analizada, a partir del valor promedio obtenido con la ejecución de n ensayos, para un nivel de confianza igual a 100(1-α), siendo α la probabilidad de que la media sea mayor o igual al valor especificado.

$$(\bar{x} - \mu) = K\alpha_{/2} * \left[\frac{\sigma}{n^{0.5}}\right] = R \qquad (4\text{-}1)$$

Donde,

$K\alpha_{/2}$: Número de veces que se debe considerar la desviación estándar para lograr un determinado grado de confiabilidad. Su valor se determina con el área bajo la curva de una distribución normal.

σ: Desviación estándar encontrada para el valor de respuesta en suelos de similares características en otros proyectos.

N: Número requerido de muestras.

Para determinar el valor de $K\alpha_{/2}$ es necesario determinar α, para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$Confiabilidad = 100(1 - \alpha) \qquad (4\text{-}2)$$

En geotecnia y especialmente en diseño de pavimentos, es práctica común emplear un grado de confiabilidad del 90%. De acuerdo con Sánchez & Campagnoli, (2016) la desviación estándar (σ) para suelos de subrasante con CBR inferior a 7% varía entre 0.5 y 2. Adicionalmente, recomiendan un límite de precisión (R) del 1%.

Teniendo en cuenta los parámetros mencionados anteriormente se tiene para la presente investigación:

Confiabilidad: 90%

α/2=0.05

$K\alpha_{/2} = 1.645.$

σ= 1.5

R= 1%

A partir de lo anterior, es posible determinar el número recomendado de ensayos en una zona homogénea:

$$1.645 * \left[\frac{2}{n^{0.5}}\right] = 1$$

$$n = 7\ ensayos$$

De acuerdo con los análisis realizados por Sánchez & Campagnoli (2016), un aumento en el número de ensayos realizados para la caracterización no genera un suficiente incremento en la precisión de los resultados que justifiquen el costo adicional de los mismos.

A partir del análisis realizado, se consideró conveniente para esta investigación trabajar con 21 puntos de análisis dentro de la zona seleccionada.

4.1.2. Etapa 2: Extracción de muestras y ensayos de resistencia in-situ

En esta etapa, se realizaron las perforaciones para obtener muestras inalteradas en tubos Shelby y en moldes de CBR, de acuerdo con las normas INV-E-105 "*Obtención de muestras de suelo mediante tubos de pared delgada"* e INV-E-148 "CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada", respectivamente. Adicionalmente, junto a cada perforación realizada para extracción de muestras se ejecutó un ensayo de PDC, siguiendo los lineamientos de la norma INV-E-172 "Penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad".

A continuación, se presenta el registro fotográfico de la toma de muestras y el ensayo PDC, es importante recordar que estas actividades se realizaron en conjunto con los operarios de la firma LFO Ingenieros de Suelos S.A.S y del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Figura 4-11. Extracción de muestras y ensayo de PDC.

Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenidas las muestras en los moldes de CBR y los tubos Shelby, se procedió a envolverlas cuidadosamente cubriendo toda la muestra para evitar una pérdida significativa de sus propiedades in-situ, adicionalmente, se procuró realizar los ensayos pertinentes a la mayor brevedad posible para reducir el tiempo de almacenamiento.

Figura 4-12. Almacenamiento de muestras de tubo Shelby y moldes de CBR.

Se realizaron un total de 21 exploraciones dentro de la zona delimitada para este estudio, en cada exploración se extrajo un molde de CBR, dos tubos Shelby y se realizó un ensayo de PDC. Este número de muestras se consideró suficiente teniendo en cuenta las recomendaciones de Sánchez & Campagnoli (2016).

En la Tabla 4-8 y la Figura 4-13 se presenta el resumen y localización de las exploraciones realizadas, es importante mencionar que hay una mayor concentración de muestras en dos puntos específicos: 10 exploraciones se hicieron en la Escuela Colombiana de Ingeniería y 6 en un lote ubicado en la zona de San José de Bavaria, con el objeto de disminuir, en la medida de lo posible, la variabilidad de los suelos y poder establecer posibles correlaciones entre los resultados obtenidos.

Tabla 4-8: Ubicación de las exploraciones realizadas.

No.	Profundidad (m)	Localización
1	0.5 - 0.8	Cra 72 No. 181 - 90
2	0.5 - 0.8	Cra 72 No. 181 - 90
3	0.5 - 0.8	Cra 72 No. 181 - 90
4	0.5 - 0.7	Cra 72 No. 181 - 90
5	0.6 - 0.8	Cra 72 No. 181 - 90
6	0.4 - 0.6	Cra 72 No. 181 - 90
7	0.5 - 0.7	Calle 134 A 50 - 34
8	0.5 - 0.7	Calle 134 A 50 - 34
9	0.4 - 0.7	Autopista norte con calle 125
10	0.4 - 0.7	Autopista norte con calle 125
11	0.5 - 0.7	Calle 88 con Carrera 30
12	0.5 - 0.8	Escuela Colombiana de Ingeniería, portería vehicular
13	0.5 - 0.8	Escuela Colombiana de Ingeniería, portería vehicular
14	0.5 - 0.8	Escuela Colombiana de Ingeniería, portería vehicular
15	0.5 - 0.8	Escuela Colombiana de Ingeniería, portería vehicular
16	0.5 - 0.8	Escuela Colombiana de Ingeniería, portería vehicular
17	0.5 - 0.8	Escuela Colombiana de Ingeniería, portería vehicular
18	0.5 - 0.8	Escuela Colombiana de Ingeniería, portería vehicular
19	0.5 - 0.8	Escuela Colombiana de Ingeniería, portería vehicular
20	0.5 - 0.8	Escuela Colombiana de Ingeniería, portería vehicular
21	0.5 - 0.8	Escuela Colombiana de Ingeniería, portería vehicular

Fuente: Elaboración propia

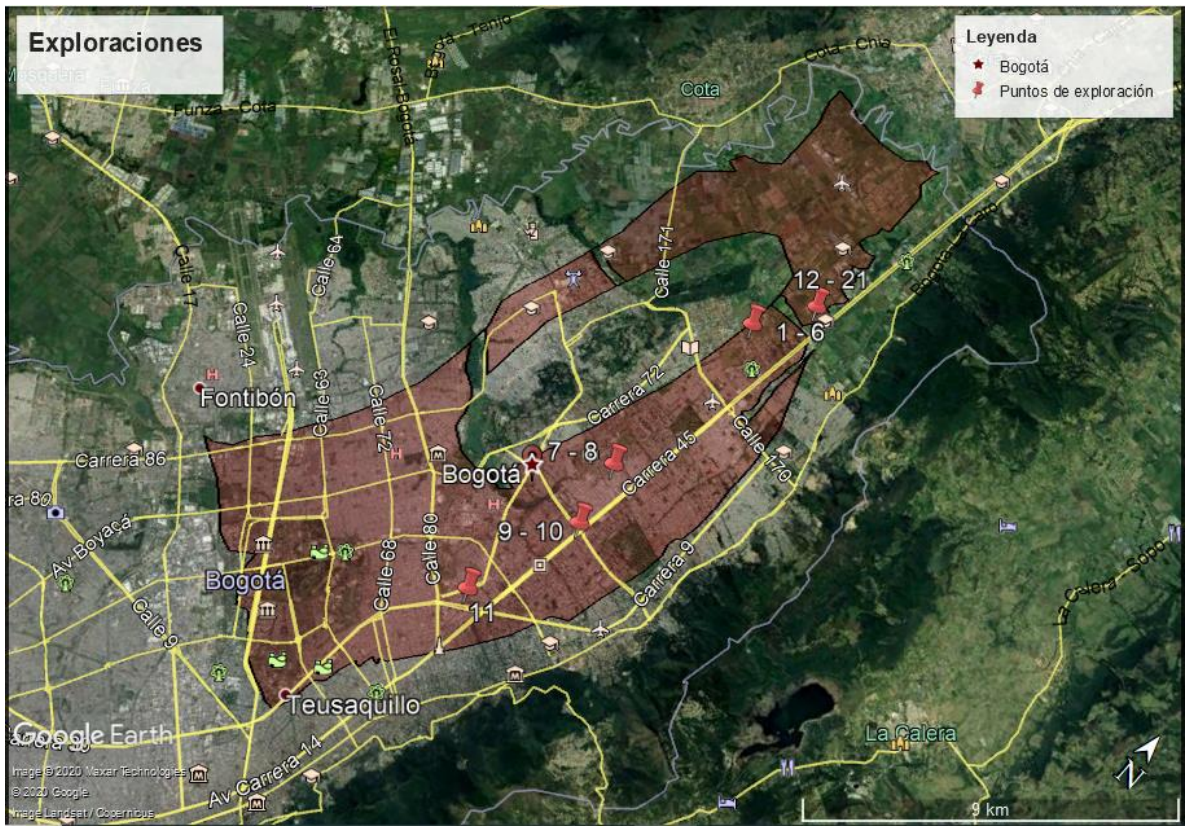


Figura 4-13. Localización de las exploraciones realizadas.

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Etapa 3: Caracterización física, mecánica y clasificación.

En esta etapa se desarrollaron los ensayos convencionales de caracterización física y clasificación de las muestras extraídas, así como los ensayos de caracterización mecánica. Los procedimientos se realizaron siguiendo los lineamientos establecidos en las normas INVIAS.

4.1.3.1 *Caracterización Física y clasificación.*

Las muestras inalteradas obtenidas de los tubos de pared delgada se utilizaron para los siguientes ensayos de caracterización: humedad natural (wn), límite líquido (LL), límite plástico (LP), granulometría (Hidrometría), gravedad específica (Gs) y peso unitario (γt) (Normatividad ASTM). En el anexo 3 se presenta la descripción y los registros de cada uno de los ensayos.

4.1.3.2 *Caracterización mecánica.*

Las muestras inalteradas obtenidas de los tubos de pared delgada se utilizaron para los ensayos de módulo resiliente y los ensayos de Mini-CBR, de acuerdo con las nomas INV-E-156 “Módulo resiliente de suelos y agregados” y DNER-ME 254/979 “*Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão*”, respectivamente.

Las muestras inalteradas obtenidas en molde de CBR se emplearon para realizar los ensayos correspondientes, de acuerdo con la norma INV-E-148-13 “CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada”.

4.1.3.2.1 Ensayo triaxial cíclico

El ensayo consiste en someter una muestra inalterada de suelo (Debidamente tallada para cumplir una relación de h=2*D) a diferentes estados de esfuerzos en un determinado número de ciclos establecido por la norma. Adicionalmente, si la muestra lo permitía, fallarlas a una presión de confinamiento de 27.6 kPa y una velocidad de 1% de la deformación por minuto para obtener la resistencia al corte no drenada.

El procedimiento del ensayo según INV-E-156 establece pulsos de carga Harvesine de 0.1 segundos y un periodo de reposo de 3 segundos, se estableció un ciclo de acondicionamiento de 1000 repeticiones. La falla se establece si se obtiene una deformación mayor al 5%.

Para el cálculo del módulo resiliente se emplearon la deformación resiliente y el esfuerzo cíclico promedio de los últimos 5 pulsos. El análisis se realizó a partir de dos ecuaciones constitutivas: Moossazadeh & Witczak (Modelo $k - \sigma_d$) y el modelo universal (modelo de cortante octaédrico), las cuales fueron descritas en la revisión bibliográfica.

En la Figura 4-14, se presentan imágenes del procedimiento para obtener el Mr.

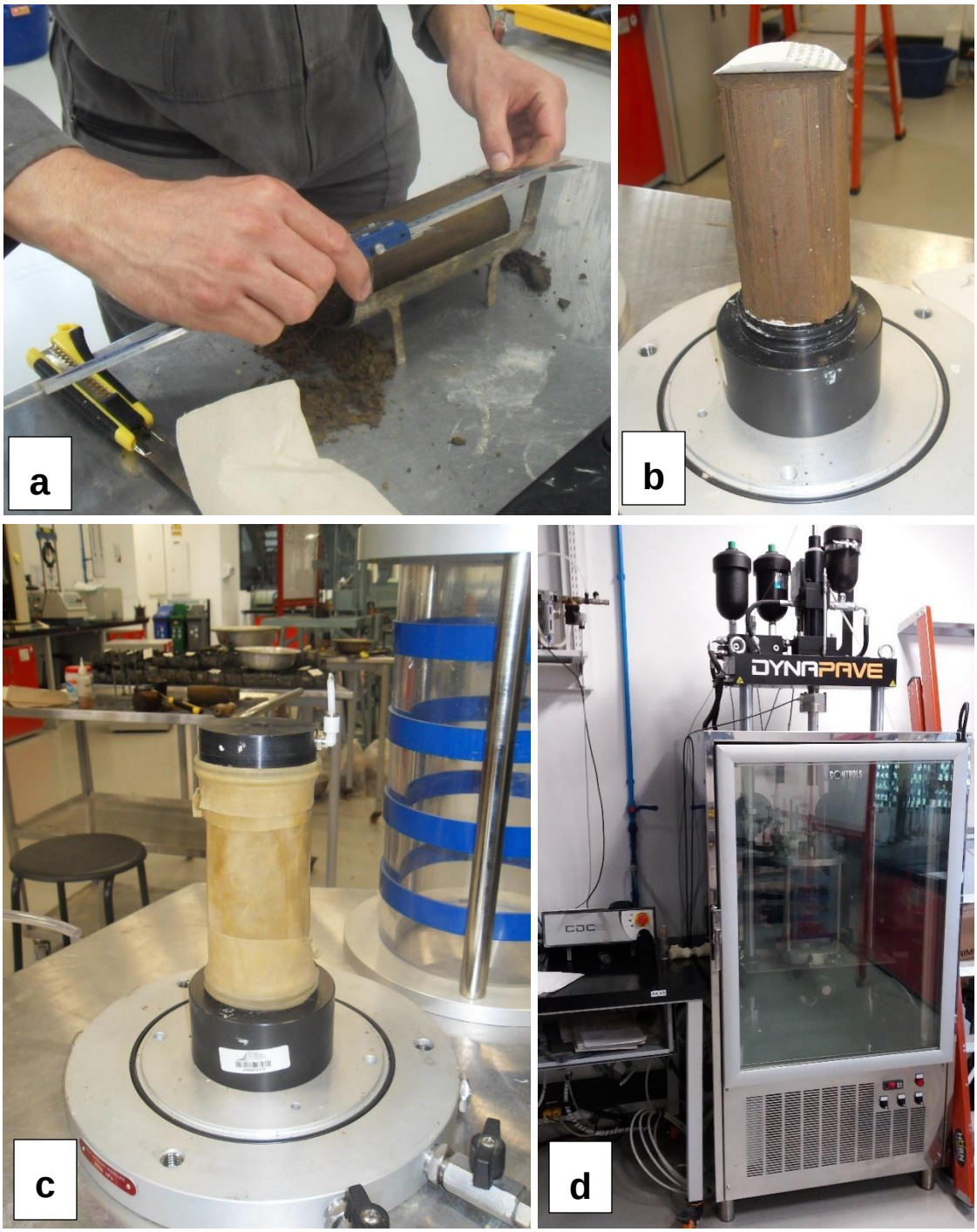


Figura 4-14. Procedimiento ensayo Mr: (a) tallado de la muestra para cumplir relación h/D, (b) colocación de los papeles de filtro en la muestra, (c) colocación geomembrana y tapa sobre la muestra e inserción del armado en la cámara y (d) ejecución del ensayo.

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2.2 Ensayo CBR

El ensayo consiste en penetrar, con un pistón cilíndrico de diámetro conocido las muestras inalteradas obtenidas en el molde de CBR para obtener el esfuerzo requerido para lograr una profundidad de 2.54 mm y 5.08 mm, la velocidad de penetración es de 1.27 mm/min; el anterior proceso está establecido en la norma INV-E-148 “CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada” (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2012a) y fue realizado en muestras con y sin inmersión.

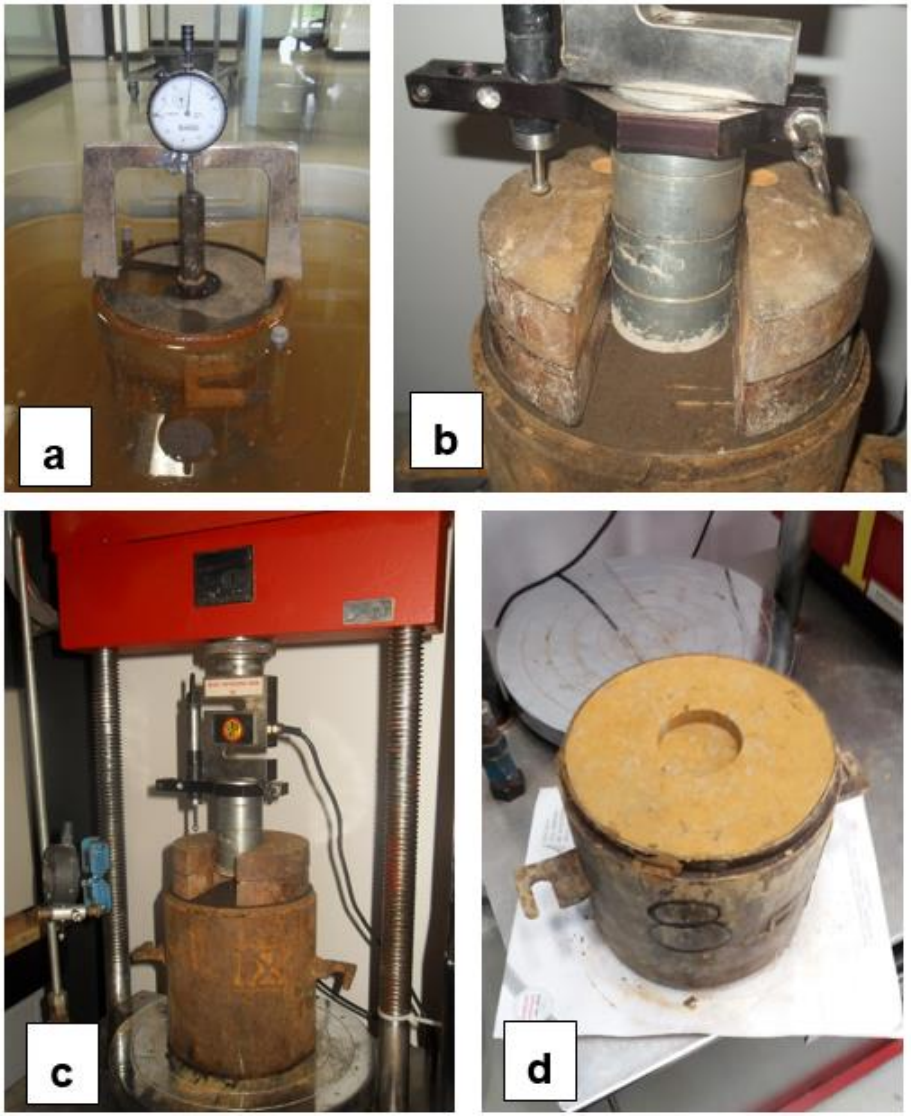


Figura 4-15. Procedimiento ensayo CBR: (a) inmersión del molde CBR, (b): colocación de las sobrecargas, (c) montaje del molde en la prensa y (d) muestra ensayada.

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2.3 Ensayo Mini-CBR

El ensayo es similar al del CBR pero a una escala reducida, consiste en penetrar con un pistón cilíndrico de diámetro conocido las muestras inalteradas en el molde Mini-CBR con la carga necesaria para lograr diferentes profundidades (0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 y 5.0 mm), la velocidad de penetración es de 1.27 mm/min; el anterior proceso está establecido en la norma DNER-ME 254/979 "*Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão*". Este ensayo también fue realizado en muestras con humedad natural y después de un proceso de inmersión en agua por un periodo comprendido entre 20 y 24 horas.

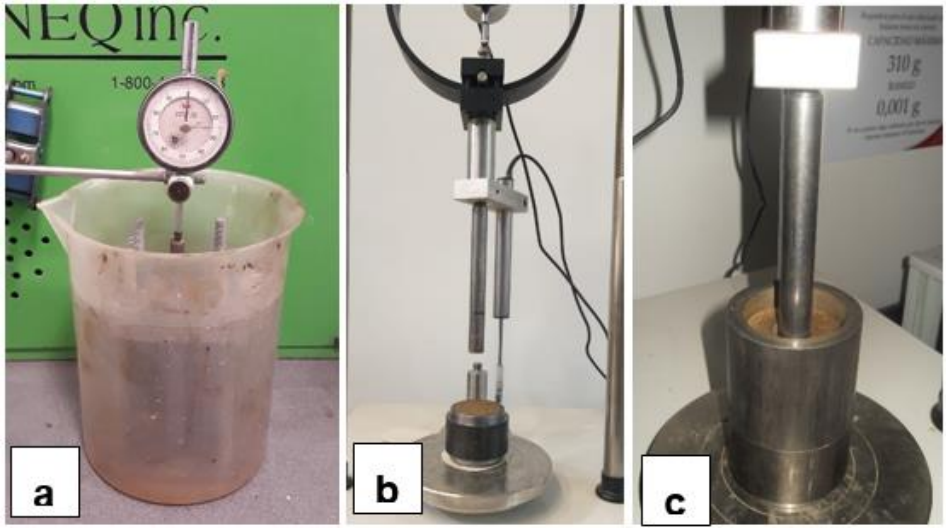


Figura 4-16. Ensayo Mini – CBR: (a) muestra en inmersión, (b) muestra tallada a las dimensiones del ensayo y (c) montaje con sobrecarga para realizar el ensayo.

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Etapa 4: Análisis de resultados y determinación de correlaciones

En esta última etapa, se analizaron y compararon todos los ensayos físicos y mecánicos realizados con el fin de determinar si existen correlaciones entre los diferentes parámetros y compararlas con las existentes en la literatura.

Se tuvieron en cuenta las ecuaciones constitutivas establecidas anteriormente para el módulo resiliente y el estado de esfuerzos con el cual se comparan los ensayos de PDC, CBR y Mini-CBR.

4.2 Clasificación y caracterización de los materiales

En la Tabla 4-9 se presenta el resumen de las propiedades físicas de las diferentes muestras evaluadas en este proyecto, para su obtención se realizaron los ensayos de caracterización física y clasificación descritos en la metodología. Es importante aclarar que las muestras de San José de Bavaria fueron extraídas en un lapso de un mes mientras que las de la ECI se realizaron en dos días, lo anterior puede explicar la variación en los contenidos de humedad para las muestras de San José de Bavaria.

Tabla 4-9. Propiedades físicas y caracterización de las muestras.

		Relaciones de fase						Granulometría e hidrometría				Límites de Atterberg			Clasificación
Exploración		w(%)	γ unitario (kN/m3)	Gs	Relación de vacíos	porosidad (%)	Grado de saturación (%)	Arena gruesa (%)	Arena media (%)	Arena fina (%)	Finos (%)	Límite líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de plasticidad	SUCS
S.J. Bavaria	1	102.4	12.68	2.69	3.21	76.2	85.9	0	1	28	70	129	72	57	MH
S.J. Bavaria	2	81.7	13.45	2.68	2.55	71.9	85.9	0	1	20	79	132	72	60	MH
S.J. Bavaria	3	96.1	13.32	2.68	2.87	74.1	89.9	0	2	36	61	125	65	59	MH
S.J. Bavaria	4	94.6	13.77	2.69	2.72	73.1	93.5	2	9	37	52	122	67	56	MH
S.J. Bavaria	5	106.9	13.41	2.68	3.05	75.3	93.9	0	6	41	53	125	75	50	MH
S.J. Bavaria	6	103.4	13.53	2.7	2.98	74.9	93.7	2	6	35	57	114	68	46	MH
Cll 134 (1)	7	108.6	13.37	2.72	3.16	76.0	93.5	5	8	34	53	132	64	68	MH
CLL 134 (2)	8	110.9	13.42	2.71	3.18	76.1	94.7	0	2	39	59	97	66	30	MH
CLL 125 (1)	9	84.7	14.55	2.69	2.34	70.1	97.2	0	2	39	59	104	55	48	MH
CLL 125 (2)	10	91.1	14.17	2.7	2.57	72.0	95.8	5	9	35	51	109	58	51	MH
Castellana	11	61.6	15.02	2.64	1.78	64.0	91.3	-	-	-	-	97	55	42	MH
ECI	12	45.1	17.28	2.71	1.23	55.2	99.3	-	-	-	-	82	24	58	CH
ECI	13	50.8	17.59	2.71	1.27	56.0	99.6	-	-	-	-	81	25	56	CH
ECI	14	45.2	17.03	2.68	1.24	55.3	97.7	-	-	-	-	82	24	57	CH
ECI	15	42.5	17.27	2.65	1.14	53.3	98.7	-	-	-	-	76	27	49	CH
ECI	16	43.8	17.1	2.75	1.26	55.8	95.2	-	-	-	-	78	27	51	CH
ECI	17	45.5	16.76	2.63	1.24	55.4	96.6	-	-	-	-	69	24	45	CH
ECI	18	45.6	17.21	2.71	1.24	55.4	99.2	-	-	-	-	79	27	53	CH
ECI	19	46.4	17.11	2.73	1.29	56.3	98.3	-	-	-	-	75	27	48	CH
ECI	20	44	17.3	2.69	1.19	54.4	99.1	-	-	-	-	75	28	48	CH
ECI	21	47.5	16.93	2.67	1.28	56.1	99.1	-	-	-	-	76	28	48	CH

Fuente: Elaboración propia

Todas las muestras ensayadas clasificaron como arcillas de alta compresibilidad (CH) o limos de alta compresibilidad (MH), lo cual es típico en los suelos de subrasante de la zona lacustre bogotana. En la Figura 4-17 se comparan los resultados obtenidos en las muestras analizadas con la base de datos de la firma LFO Ingenieros de Suelos S.A.S, evidenciando que se encuentran dentro de los rangos característicos. Es importante resaltar que las muestras que no fueron obtenidas en la Escuela Colombiana de Ingeniería presentaban una cantidad considerable de raíces.

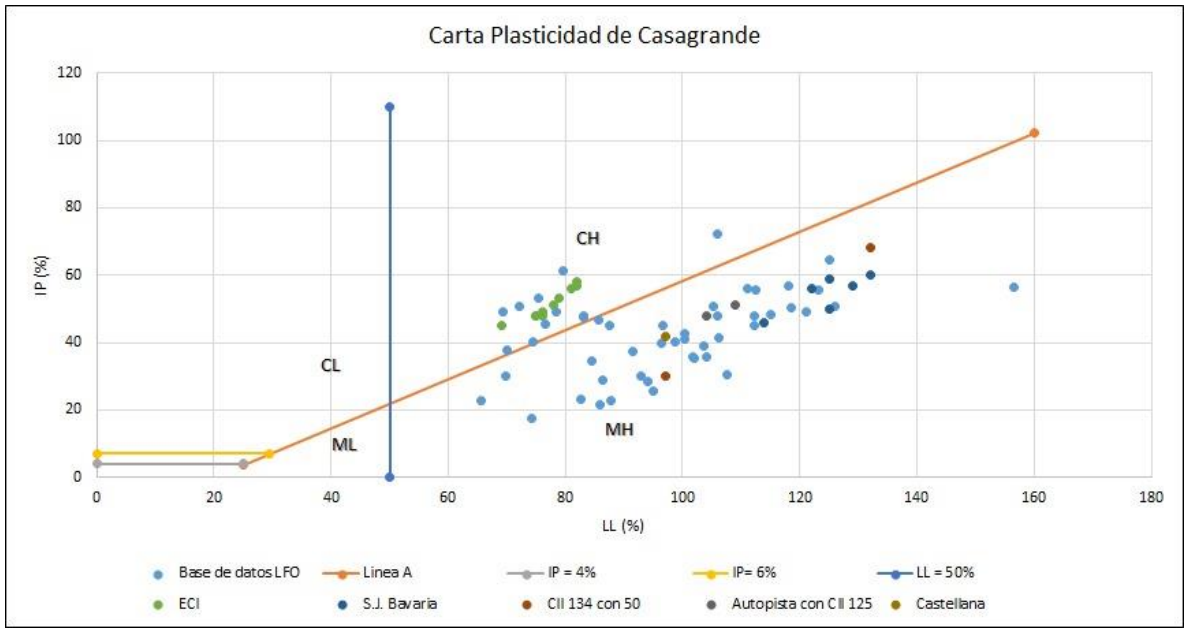


Figura 4-17: Carta de Casagrande comparando las muestras analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Las muestras de la Escuela Colombiana de Ingeniería clasificaron como CH y las demás muestras como MH. Las primeras tuvieron límites de líquidos que varían entre 75 y 85% e índices de plasticidad que varían entre 45 y 58%. Las muestras restantes tuvieron límites líquidos que varían entre 97 y 132% mientras que los índices de plasticidad estuvieron entre 30 y 68%. Las muestras limosas presentaron un porcentaje de arenas entre 20 y 40%.

Al revisar los valores existentes en la base de datos de proyectos se observa que para las arcillas de alta compresibilidad (CH) se tienen límites líquidos con valores entre 70 y 106% e índices de plasticidad que varían entre 45 y 72%. Los limos de alta compresibilidad (MH) tienen límites líquidos que varían entre 65 y 125% e índices de plasticidad que varían entre

20 y 64%. Teniendo en cuenta lo anterior, los valores del proyecto se encuentran acordes con los existentes en la base de datos para muestras en la zona de estudio.

Los valores de humedad de las muestras se encuentran entre 42 y 111%, esta variación puede ser atribuida al periodo en el que fueron extraídas las muestras, las de la Escuela Colombiana de Ingeniería (fueron extraídas en un corto periodo de tiempo) presentan valores más bajos al ser una temporada seca, mientras las restantes presentan valores más altos. Al revisar los datos existentes en la base de datos, se encuentran valores de humedad que varían entre 36.8 y 99% lo cual coincide con los datos obtenidos para este proyecto.

En cuanto a los pesos unitarios obtenidos varían entre 12.7 y 17.6 KN/m^3 siendo mayores en las muestras tipo arcilla y en las muestras con menor relación de vacíos, se observa que son valores típicos de los depósitos lacustres bogotanos (Orozco Rojas, n.d.; Palomino et al., 2016).

Por otra parte, las relaciones de vacíos obtenidas para las muestras analizadas son del orden de 1.25 para las arcillas y entre 1.8 y 3.2 para las muestras de limo. Estos valores son un poco inferiores a los típicos de los suelos lacustres bogotanos que pueden variar entre 2 y 4.5 (Montaña & Durán, 2013; Orozco Rojas, n.d.). Particularmente en las arcillas se obtuvieron valores ligeramente inferiores a los obtenidos en otras investigaciones sobre las arcillas de la ECI que se encuentran entre 1.28 a 1.78 (Bojacá Torres, 2019).

Finalmente, los grados de saturación se encontraron entre 85 y 98% lo cual es predecible debido a la cercanía del nivel freático con la superficie, los valores de Gs se encontraron en el rango entre 2.64 y 2.75 lo cual es el rango típico para suelos finos. Todos estos parámetros se encuentran acorde con otras investigaciones y conocimientos experimentales previos para los suelos lacustres bogotanos (Montaña & Durán, 2013; Orozco Rojas, n.d.; Palomino et al., 2016).

4.3 Referencias

AASHTO. (1993). *Guide for design pavement sturctures 1993*. American ASsociation of State Highway and Transportation Officials.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2020). Plan Distrital de Desarrollo 2020-2024 Un Nuevo Contrato Social y Ambiental para la Bogotá del Siglo XXI. *Página Institucional*, *2009*(366), 170. http://concejodebogota.gov.co/cbogota/site/edic/base/port/inicio.php

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2010). *Decreto 523 de 2010*.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2021). *Plan Operativo Anual de Inversiones*.

Andrei, D., Witczak, M., Schwartz, C., & Uzan, J. (2004). Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. *Journal of the Transportation Research Board*, *1874*, 29–37.

Assali, M. P., Fortes, R. M., & Cymrot, R. (2003). Comparação da incerteza de medição entre ensaios CBR e mini CBR. *34º Reunião Anual de Pavimentação*, 20.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). Colombia Estrategia de País del BID 2015–2018. In *Colombia*. http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=40089561

Banco Interamericano de Desarrollo. (2019). *Estrategia del Grupo BID con Colombia (2019-2022)*. https://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=EZSHARE-1474758834-2

Barros, C. O. de A. (2003). *Revisão da Correlação Mini CBR / CBR para solos do municipio de São Carlos – SP*. Universidade de São Paulo.

Barroso, S. H. de A. (2002). *Estudo dos solos da regiäo metropolitana de Fortaleza para aplicacao na engenharia rodoviária*. Universidade de Sâo Paulo.

Bojacá Torres, D. C. (2019). *Módulo resiliente de suelos blandos de subrasante de la zona lacustre de Bogotá a partir del ensayo CBR cíclico*.

Cabrera, A. (2012). *Evaluation of the laboratory resilient modulus test using a New Mexico subgrade soil Recommended Citation "Evaluation of the laboratory resilient modulus test using a New Mexico subgrade soil*. https://digitalrepository.unm.edu/ce_etds.%22

Cámara Colombiana de la Infraestructura. (2009). *Tarifas de arrendamiento para equipos de construcción*.

CEPAL. (2018). Transporte de carretera en América Latina : evolución de la infraestructura y de sus impactos entre 2007 y 2015. *FAL*, *367*(7), 1–15. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44440/1/S1801184_es.pdf

Chu, T. Y., & Davidson, D. T. (1955). Some laboratory test for the evaluation of stabilized soils. *Iowa State University Bulletin*, *21*.

Clavijo, S., Vera, A., & Vera, N. (2013). *La inversión en infraestructura en Colombia 2012-2020*. 7–14. http://www.cvc.com.ve/docs/2016219124559Inversion en infraestructura Colombia 2013-2020.pdf

Dai, S., & Zollars, J. (2002). Resilient Modulus of Minnesota Road Research Project Subgrade Soil. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1786*(1), 20–28. https://doi.org/10.3141/1786-03

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1997). DNER - ME 254 Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão. In *Norma rodoviária*. http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me254-97.pdf

Dione, A., Fall, M., Berthaud, Y., Benboudjema, F., & Michou, A. (2014). *Implementation of Resilient Modulus - CBR relationship in Mechanistic-Empirical (M . -E) Pavement Design Abstract :* *1*(2), 65–71. https://www.researchgate.net/publication/271829406_Implementation_of_Resilient_Modulus_-_CBR_relationship_in_Mechanistic-Empirical_M_-E_Pavement_Design

Escobar Toro, L. J. (2011). *CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS TROPICALES EN UN TALUD DE LA AUTOPISTA MEDELLÍN – BOGOTÁ EN EL TRAMO DE VÍA ENTRE MARINILLA Y SANTUARIO*. Universidad Nacional de Colombia.

Fernandes, E. (2006). *ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS APLICADAS AOS SOLOS TROPICAIS*. Universidade de São Paulo.

FHWA. (2006). Geotechnical aspects of pavements. In *FHWA NHI-05-037* (Issue 132040). http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geotechnical+Aspects+of+Pavements#1

Garnica, P. Pérez, N. Gómez, J. (2001). Módulos de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares. In *Publicación Técnica N. 142* (Issue 142).

George, K. P. (2004). *Prediction of Resilient Modulus From Soil Index Properties. Report No. FHWA/MS-DOT-RD-04-172*. *November*, 72.

Grupo Banco Mundial. (2018). *Índice de desempeño logístico*. https://datos.bancomundial.org/indicador/LP.LPI.INFR.XQ?end=2018&start=2007&view=chart&year_high_desc=true

Hveem, F. N., & Carmany, R. M. (1949). The faactors underlying the rational design of pavements. *Twenty-Eighth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C.*, *28*, 101–136. https://trid.trb.org/view/104547

Indian Roads Congress. (2012). Tentative Guidelines for the design of Flexible Pavements. In *Indian Road Congress* (p. 108). https://archive.org/details/govlawircy2012sp37_0/page/90

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2017). *Capítulo técnico Geotecnia y Pavimentos*.

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), & Universidad Nacional de Colombia. (2013). *Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.* http://www.umv.gov.co/sisgestion2017/Documentos/MISIONAL/PDV/PDV-DE-003-V1_Guia_diseno_de_pavimentos_para_bajos_volumenes_de_transito_y_vias_locales_para_bogota.pdf

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012a). *INV 148-13 CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO Y SOBRE MUESTRA INALTERADA*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012b). *INV E-156-13 Módulo resiliente de suelos y agregados*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012c). *INV E-172-13 MÉTODO DE ENSAYO NORMAL PARA EL USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO EN APLICACIONES DE PAVIMENTOS A POCA PROFUNDIDAD*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2018). *Estado De La Red Vial Criterio Tecnico Segundo Semestre 2018*.

Khasawneh, M. A., & Al-jamal, N. F. (2019). Modeling resilient modulus of fine-grained materials using different statistical techniques. *Transportation Geotechnics*, *21*(February), 100263. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100263

Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. K., & Gurland, J. (1956). Relationship between the California Bearing Ratio and The Iowa Bearing Value. *Methods for Testing Engineering Soils*, *59*(December), 257–293. http://publications.iowa.gov/22209/1/IADOT_IHRB_Bulletin_21_Methods_Testing_Engineering_Soils_1960.pdf

Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. K., & John, G. (1960). Relationship between the California Bearing Ratio and The Iowa Bearing Value. In D. T. Davidson (Ed.), *Methods for testing engineering soils* (Vol. 59, Issue December, pp. 257–293). Iowa State University of Science and Technology. http://publications.iowa.gov/22209/1/IADOT_IHRB_Bulletin_21_Methods_Testing_Engineering_Soils_1960.pdf

Malaver Soto, N. M. (2018). *Lineamientos básicos para la clasificación de suelos tropicales en Colombia orientado a pavimentos* [Universidad Católica de Colombia]. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22378/1/TESIS VFinal%2830-nov-2018%29 ENTREGADA.pdf

Marson, L. A. (2004). *Correlações entre ensaios CBR e Mini-CBR para solos lateríticos de textura fina*. Insitituto Tecnológico de Aeronáutica.

Martinez, J. O., Gerena, C., & Nicely, A. (2013). *Correlación PDC Con CBR Para Suelos En La Localidad De Suba*. http://unimilitar-dspace.metabiblioteca.org/handle/10654/3653

Mendoza, C., & Caicedo, B. (2019). Elastoplastic framework of relationships between CBR and Young's modulus for fine grained materials. *Transportation Geotechnics*, *21*(September), 100280. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100280

Mohammad, L. N., Herath, A., Abu-Farsakh, M. Y., Gaspard, K., & Gudishala, R. (2007). Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *19*(11), 986–

992. https://doi.org/10.1061/40776(155)2

Montaña, D., & Durán, J. E. (2013). *Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá*. 1.

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia.

Moossazadeh, J., & Witczak, M. (1981). Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior. *Transportation Research Record*, *810*, 9–17. http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1981/810/810-002.pdf

Moreno Rubio, J. (2005). *Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas* [Universidad Politecnica De Catalunya]. http://hdl.handle.net/2099.1/3252

Narzary, B. K., & Ahamad, K. U. (2018). Estimating elastic modulus of California bearing ratio test sample using finite element model. *Construction and Building Materials*, *175*, 601–609. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.228

Nogami, J. S. (1972). Determinação do índice de suporte Califórnia com equipamentos de dimensões reduzidas. *II Reunião Das Administrações Rodoviárias*.

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1979). Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, *19*(1), 196–199. https://doi.org/10.1007/BF02600475

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1981). UMA NOVA CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PARA FINALIDADES RODOVIÁRIAS. *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais Em Engenharia*, 13.

Office of Minnesota road research. (1996). *User guide to the Dinamic cone penetrometer*. http://www.dot.state.mn.us/materials/researchdocs/User_Guide.pdf

Orozco Rojas, L. F. (n.d.). Presentación SCI. *Asentamientos de Edificios Altos*, 29.

Paige-Green, P., & Plessis, L. Du. (2009). *THE USE AND INTERPRETATION OF THE DYNAMIC CONE PENETROMETER (DCP) TEST* (Issue September).

Palomino, A., Salazar Ferro, F., Orozco, L. F., & Salcedo, M. (2016). *Tilting of a Large Apartment Building in Bogota, Colombia, Due to Foundation Failure and the Recuperation of Its Verticality*. 17–28. https://doi.org/10.1061/9780784480076.003

Reddy, C. N. V. S., & Moorthy, N. V. R. (2005). Significance of bearing capacity of clayey subgrade in flexible pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, *6*(3), 183–189. https://doi.org/10.1080/10298430500137194

Rehman, Z. U., Khalid, U., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2017). Prediction of CBR value from index properties of different soils. *Technical Journal University of Engineering and Technology Taxila, Pakistan*, *22*(August), 17–26.

Requiz Cristóbal, J. O. (2018). *Aplicación de la metodología MCT en estudio de suelos tropicales con fines de pavimentación en la selva baja del Perú. Caso: caminos vecinales de madre de dios.* [Universidad Nacional Federico Villarreal]. http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2145

Rojas lópez, M. D., & Ramírez Muriel, A. F. (2018). Inversión en infraestructura vial y su impacto en el crecimiento económico : Aproximación de análisis al caso infraestructura en colombia (1993-2014). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *17*(32), 109–128. https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a6

Rondón Quintana, H., Fernández Gómez, W., & Hernández Noguera, J. (2013). Influencia de la rigidez de la subrasante y las capas granulares sobre la vida a fatiga de mezclas asfálticas. *Tecno Lógicas*, *31*, 53–72. http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n31/n31a04.pdf

Sánchez, F., & Campagnoli, S. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras: Guía práctica para lo estudios y diseños* (Escuela Colombiana de Ingeniería (ed.); 1ra ed.).

Saurabh, J., Joshi, Y. P., & Goliya, S. S. (2013). Design of Rigid and Flexible Pavements by Various Methods & Their Cost Analysis of Each Method. *International Journal of Engineering Research and Applications*, *3*(5), 119–123.

Saxena, R. K. (1991). Can failures be minimized and pavement performance improved by adequately designing and constructing road subgrades. *Indian Roads Congress*, *52*(2), 263–311.

Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). RESILIENCE CHARACTERISTICS OF SUBGRADE SOILS AND THEIR RELATION TO FATIGUE FAILURES IN ASPHALT PAVEMENTS. *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Supplement*, 77–113. https://trid.trb.org/view/716093

Seed, H. B., Chan, C. K., & Monismith, C. L. (1955). EFFECTS OF REPEATED LOADING ON THE STRENGTH AND DEFORMATION OF COMPACTED CLAY. *Thirty-Fourth Annual Meeting of the Highway Research Board*, *34*, 541–558. https://trid.trb.org/view/126583

Seed, H. B., Mitry, F. B., Monismith, C. L., & Chan, C. K. (1967). PREDICTION OF FLEXIBLE PAVEMENT DEFLECTIONS FROM LABORATORY REPEATED-LOAD TESTS. *Trasnportation Research Board*, *35*, 117. https://trid.trb.org/view/104508

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Mapa Geológico Colombiano 2017*.

Souza, R. A. De. (2007). *Estudo Comparativo dos Ensaios de CBR e Mini-CBR para Solso de Uberlândia-MG* [Universidad Federal de Uberlândia]. https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14236/1/RASouzaDISPRT.pdf

Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3 ed.). John Wiley & Sons.

The Asphalt Institute. (1989). *The Asphalt Handbook Manual Series No. 4*.

Vidal, J., & Osorio, R. (2002). Módulo resiliente de suelos finogranulares. *Revista Universidad Eafit*, *125*, 63–72.

Wonnacott, T., & Wonnacott, R. (1993). *Fundamentos de estadística para administración y economía* (1a ed). Limusa.

World Economic Forum. (2019). The Global Competitiveness Report 2019. In *World Economic Forum*. http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf

Wu, S., & Sargand, S. (2007). *USE OF DYNAMIC CONE PENETROMETER IN SUBGRADE AND BASE ACCEPTANCE* (Vol. 14817, Issue 14817).

Yau, A., & Quintus, H. L. Von. (2002). *Study of LTPP laboratory resilient modulus test data*

and response characteristics. *FHWA-RD-02-051*, 173. https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/reports/02051/02051.pdf

Zhou, C., Huang, B., Drumm, E., Shu, X., Dong, Q., & Udeh, S. (2015). Soil resilient modulus regressed from physical properties and influence of seasonal variation on asphalt pavement performance. *Journal of Transportation Engineering*, *141*(1), 1–9. https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000727

5.0 Resultados experimentales y análisis

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos de resistencia y rigidez realizados: Penetrómetro dinámico de cono (PDC), mini-CBR, CBR, resistencia al corte no drenada (en los casos donde fue posible) y módulo resiliente (Mr). Los formatos de todos los ensayos de laboratorio se presentan en el anexo 3.

De las 21 muestras analizadas dentro del presente trabajo, las 11 primeras (S.J. Bavaria, Calle 134 y calle 125) fueron realizadas de forma simultánea con la investigación de Bojacá Torres, (2019); la muestra de la castellana y las de la Escuela Colombiana de Ingeniería fueron realizadas particularmente para este estudio.

5.1 Resultados de los ensayos tradicionales de resistencia al corte.

El ensayo de PDC se realizó en el momento de la extracción de muestras inalteradas, ejecutándose lo más próximo al lugar de donde se tomó la muestra en el tubo Shelby. Si para la exploración fue necesario profundizar menos de 1.0 m, el ensayo se realizó a nivel del terreno, y cuando la profundidad fue mayor, el ensayo se realizó a nivel de la toma de muestras.

El ensayo de CBR se realizó para la condición natural y luego de inmersión. Es importante aclarar que los valores de CBR empleados para las correlaciones corresponden a la condición en la cual se evalúan los demás ensayos.

El valor de la resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$) fue obtenido al final del ensayo de módulo resiliente, si la muestra no falla en los primeros 15 ciclos de carga se realizó una prueba de corte rápido. Este parámetro no fue obtenido para todas las muestras puesto que algunas si alcanzaron la falla en los 15 primeros ciclos.

Los resultados de estos ensayos de resistencia al corte y las propiedades físicas de las 21 exploraciones analizadas se presentan en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Resultados caracterización física y ensayos de resistencia al corte de las muestras analizadas

Exploración		Prof. (m)	Caracterización y clasificación									Ensayos tradicionales de resistencia al corte						Mr.(95%)	
			w	γ unitario	Gs	e	Arena	Límite líquido	Límite plástico	Índice plast.	SUCS	CBR natural		CBR con inmersión		DN	Δσf	k-σ_d	Univ.
			(%)	kN/m3			%	%	%	%		CBR 0.1	CBR 0.2	CBR 0.1	CBR 0.2	mm/golpe	kPa	Mpa	Mpa
S.J. Bavaria	1	0.5 - 0.8	102.4	12.68	2.69	3.21	30	129	72	57	MH	5.06	4.07	2.18	2.15	69	118.46	20	20.1
S.J. Bavaria	2	0.5 - 0.8	81.7	13.45	2.68	2.55	21	132	72	60	MH	3.44	2.99	3.23	3.16	100	80.81	16.4	16.5
S.J. Bavaria	3	0.5 - 0.8	96.1	13.32	2.68	2.87	39	125	65	59	MH	3.92	3.25	3.63	3.07	100	157.1	27.4	27.5
S.J. Bavaria	4	0.5 - 0.7	94.6	13.77	2.69	2.72	48	122	67	56	MH	4.01	3.66	3.49	3.02	100	158.67	31.5	31.5
S.J. Bavaria	5	0.6 - 0.8	106.9	13.41	2.68	3.05	47	125	75	50	MH	2.7	2.44	2.59	2.37	44	247.41	25	25.1
S.J. Bavaria	6	0.4 - 0.6	103.4	13.53	2.7	2.98	43	114	68	46	MH	3.23	2.67	2.18	1.92	46	92.38	25.8	25.9
CLL 134 (1)	7	0.5 - 0.7	108.6	13.37	2.72	3.16	47	132	64	68	MH	3.57	2.85	2.27	2.24	44	-	28.5	28.5
CLL 134 (2)	8	0.5 - 0.7	110.9	13.42	2.71	3.18	41	97	66	30	MH	4.36	4.01	2.18	1.92	44	-	23.2	23.3
CLL 125 (1)	9	0.4 - 0.7	84.7	14.55	2.69	2.34	41	104	55	48	MH	4.53	4.01	4.18	3.89	100	118.5	24.9	24.9
CLL 125 (2)	10	0.4 - 0.7	91.1	14.17	2.7	2.57	49	109	58	51	MH	3.57	3.25	3.01	2.32	50	91.16	25.9	25
Castellana	11	0.3 - 0.5	61.6	15.02	2.64	1.78	40	97	55	42	MH	3.14	2.67	2.35	2.03	100	-	21.6	21.7
ECI	12	0.5 - 0.8	45.1	17.28	2.71	1.23	-	82	24	58	CH	3.14	2.61	2.88	2.85	94	-	38.5	38.6
ECI	13	0.5 - 0.8	50.8	17.59	2.71	1.27	-	81	25	56	CH	3.05	2.5	2.53	2.44	96	-	35.7	35.7
ECI	14	0.5 - 0.8	45.2	17.03	2.68	1.24	-	82	24	57	CH	3.75	3.14	3.05	3.02	61	-	32.1	32.6
ECI	15	0.5 - 0.8	42.5	17.27	2.65	1.14	-	76	27	49	CH	3.57	3.02	3.23	2.9	73	-	34.6	34.7
ECI	16	0.5 - 0.8	43.8	17.1	2.75	1.26	-	78	27	51	CH	3.23	2.73	2.7	2.27	87	-	35	35
ECI	17	0.5 - 0.8	45.5	16.76	2.63	1.24	-	69	24	45	CH	3.23	2.73	3.05	2.56	86	-	22.1	22.2
ECI	18	0.5 - 0.8	45.6	17.21	2.71	1.24	-	79	27	53	CH	3.75	3.02	3.4	3.02	72	-	38.2	38.2
ECI	19	0.5 - 0.8	46.4	17.11	2.73	1.29	-	75	27	48	CH	2.7	2.15	2.53	2.15	107	-	40.9	40.9
ECI	20	0.5 - 0.8	44	17.3	2.69	1.19	-	75	28	48	CH	2.88	2.38	2.35	2.15	99	-	32.6	32.6
ECI	21	0.5 - 0.8	47.5	16.93	2.67	1.28	-	76	28	48	CH	3.75	3.14	2.88	2.67	60	-	41.1	41.1

Notas: Las muestras donde no se presenta el porcentaje de arena es en aquellas donde se obtuvieron valores menores al 1%.
Las muestras donde no se presenta el valor de la resistencia al corte es en aquellas donde la muestra falló antes de los 15 ciclos en el ensayo de Mr.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior se puede observar que los valores de CBR (condición natural menor a 5% y luego de inmersión entre 2 y 4%) coinciden con los existentes en la base datos de LFO y con los valores típicos en la zona lacustre de la ciudad de Bogotá. De igual manera, los valores elevados del número dinámico son consecuentes con los valores bajos de CBR. Es importante aclarar que el procedimiento empleado para el Mr en todas las muestras fue el propuesto en Bojacá Torres, (2019) y que es descrito en el numeral de revisión bibliográfica, buscando evitar la falla en los primeros 15 ciclos del ensayo.

Las muestras de limo de alta compresibilidad (MH) presentaron valores bajos de peso unitario lo cual podría indicar presencia de material orgánico, lo anterior está alineado con la alta presencia de raíces observada durante los sondeos. El lote de San José de Bavaria fue utilizado durante muchos años como cultivo de flores.

En las muestras en las que se realizó el ensayo rápido de corte se obtuvieron valores de $\Delta\sigma f$ bajos, las muestras con mayor cantidad de raíces resultaron en menores resistencias. De igual forma, las muestras con raíces fallaron de acuerdo con la superficie de falla generada por las raíces, y las muestras con menor cantidad de raíces fallaron por deformación como se puede observar en la Figura 5-1.

Figura 5-1. Fallas generadas en el ensayo rápido de corte.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la resistencia al corte no drenada (q_u) es posible determinar la consistencia del material ensayado, de acuerdo con la Tabla 5-2 las muestras analizadas son de consistencia media a firme. Sin embargo, esta clasificación se realiza de acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo de compresión inconfinada (sin presión de cámara), con base en lo anterior se puede decir que el aumento en la resistencia se puede deber a la presión de cámara aplicada y que realmente estas muestras tienen una consistencia muy blanda o blanda.

Tabla 5-2: Consistencia de los suelos en función de la compresión inconfinada

Consistencia del suelo	Resistencia al corte no drenada (Su), kPa
Muy Blanda	< 25
Blanda	25 - 50
Media	50 - 100
Firme	100 -200
Muy firme	200 -400
Dura	> 400

Fuente: Adaptado de Terzaghi et al., (1996)

5.2 Correlaciones entre los ensayos tradicionales de resistencia al corte

A partir de los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos tradicionales de resistencia al corte se buscó establecer correlaciones entre ellos. Teniendo en cuenta que en la ECI se extrajeron 10 muestras y en San José de Bavaria se extrajeron 7 muestras, se decidió realizar 4 grupos de análisis: Muestras de la ECI, muestras de San José de Bavaria, todas las muestras clasificadas como MH y finalmente todas las muestras (MH y CH).

Para la interpretación de los coeficientes de correlación (R^2) se utilizará el criterio presentado en Rehman et al., (2017) y que se presenta en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Ajuste de parámetros estadísticos

Criterio	R^2
Excelente	> 0.9
Bueno	0.7 - 0.89
Aceptable	0.4 - 0.69
Pobre	0.2 - 0.39
Muy pobre	< 0.2

Fuente: Adaptado de Rehman et al., (2017)

5.2.1. Relación entre el CBR a humedad natural y el DN

De acuerdo con lo presentado en el capítulo de revisión bibliográfica, el CBR y el DN tienen una relación inversamente proporcional de forma potencial.

En las gráficas de la Figura 5-2 se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los grupos analizados.

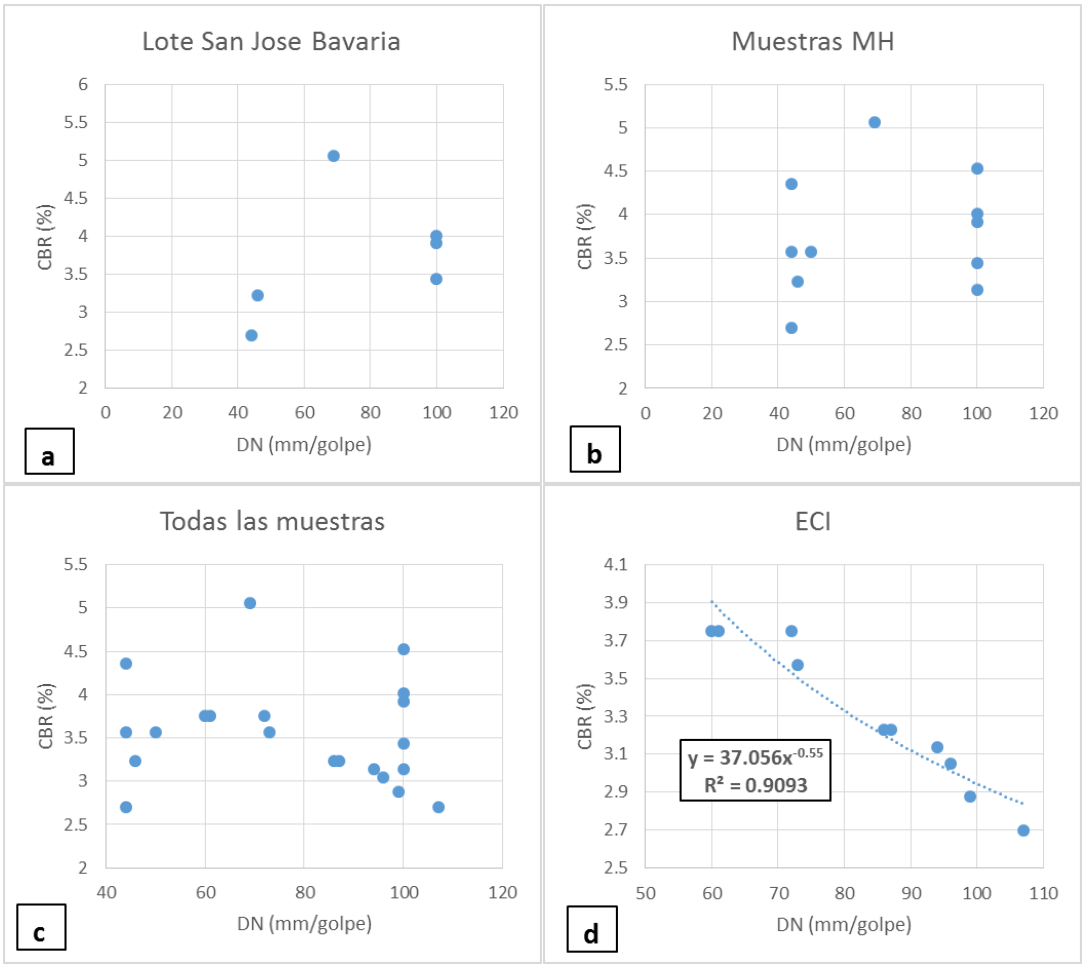


Figura 5-2: Correlaciones CBR a humedad natural y DN. (a) Lote San José de Bavaria, (b) Muestras MH, (c) Todas las muestras y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

Es importante aclarar que, dadas las características de los materiales ensayados, se está trabajando en la zona donde la curva teórica de DN vs CBR empieza a aplanarse, donde se tienen valores de CBR bajos y valores de DN altos, lo anterior se puede observar de mejor manera en la Figura 5-3.

Al evaluar los resultados en los cuatro grupos se puede observar que no existe correlación alguna en: San José de Bavaria, muestras MH y todas las muestras. Analizando únicamente las muestras de la ECI se obtiene un ajuste excelente (R^2= 0.9093).

De acuerdo con lo anterior, se puede presentar una correlación entre el ensayo CBR a humedad natural (%) y el DN (mm/golpe) para las arcillas de alta compresibilidad (CH) de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito de la siguiente forma:

$$CBR\ (\%) = 37.056 * DN\left(\frac{mm}{golpe}\right)^{-0.55}, R^2 = 0.9093$$

Ecuación 5-1

La ecuación presentada en la presente investigación fue comparada con otras obtenidas anteriormente para suelos de características similares (suelos finos y suelos CH), en la Figura 5-3 se presentan gráficamente las ecuaciones más pertinentes para este tipo de suelo en el rango de CBR entre 0 y 5% (Valores típicos de la zona lacustre de Bogotá). Es importante tener en cuenta que muchas de las variaciones existentes entre las clasificaciones se deben a que el suelo de subrasante típico para las estructuras de pavimento en el país no es el mismo, se pueden encontrar suelos tipo CL, ML, CH, MH con diferentes propiedades físicas lo cual cambia las condiciones in-situ de cada una de las muestras y por consecuencia su resistencia al corte.

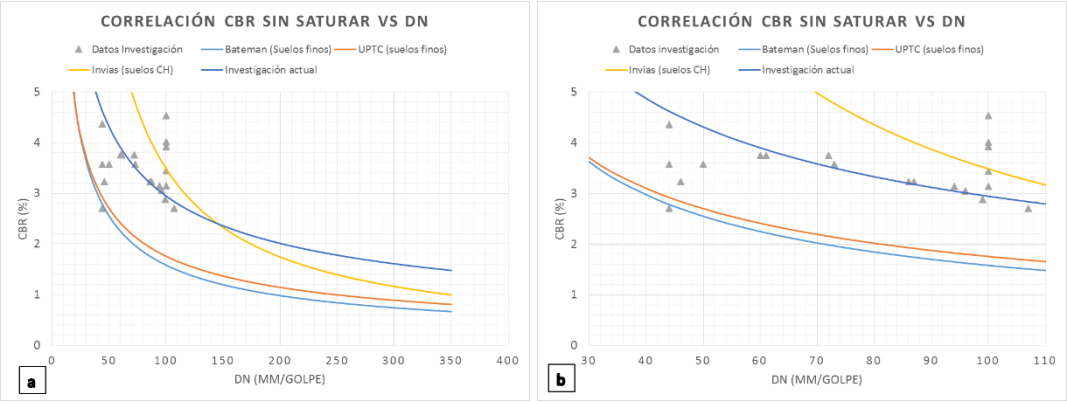


Figura 5-3 Comparación entre las correlaciones existentes entre CBR y DN con la investigación actual. (a): Gráfica completa, (b): Zona con CBR menor a 5.0%

Fuente: Elaboración propia a partir de INVIAS (2012) *y* Martinez et al., (2013)

Tal y como se puede apreciar en la gráfica, todas las muestras ensayadas presentan variaciones máximas de CBR del orden del 1%. Al analizar la gráfica presentada, se puede observar que en el rango comprendido entre 50 y 150 mm/golpe es donde se presenta una mayor diferencia entre las ecuaciones presentadas. Adicionalmente, la ecuación determinada en la presente investigación resulta en valores de CBR mayores a los de la literatura.

Es importante aclarar que la utilización de las diferentes correlaciones existentes en la literatura se debe hacer con responsabilidad y criterio teniendo en cuenta las características de los suelos empleados para su obtención.

5.2.2. Relación entre CBR a humedad natural y la resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$)

Teniendo en cuenta que la prueba rápida de corte en el ensayo de Mr no se realizó en todas las muestras (algunas fallaron durante los 15 ciclos de carga) no es posible evaluar los 4 grupos de análisis, para este numeral solamente se van a evaluar las muestras de San José de Bavaria y las muestras clasificadas como MH, tal y como se muestra en la Figura 5-4.

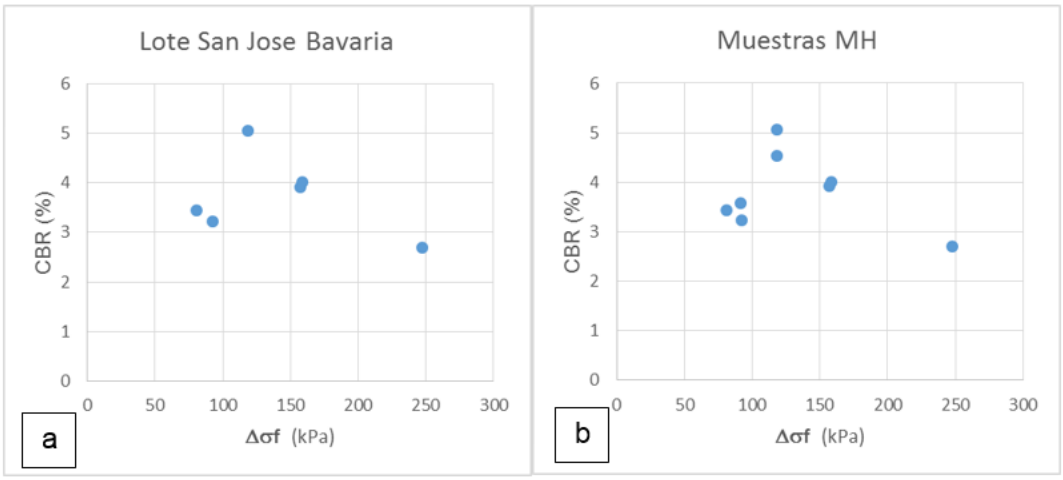


Figura 5-4: Correlaciones entre el CBR a humedad natural y $\Delta\sigma_f$. (a) Lote San José Bavaria y (b) suelos tipo MH.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las gráficas anteriores se puede observar que, debido a la dispersión de los datos obtenidos, no es posible establecer una correlación entre las variables analizadas.

5.2.3. Relación entre DN y resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$)

Tal y como se mencionó en el numeral anterior, esta correlación se realiza únicamente para las muestras de San José de Bavaria y los suelos tipo MH, en la Figura 5-5 se presentan los resultados obtenidos.

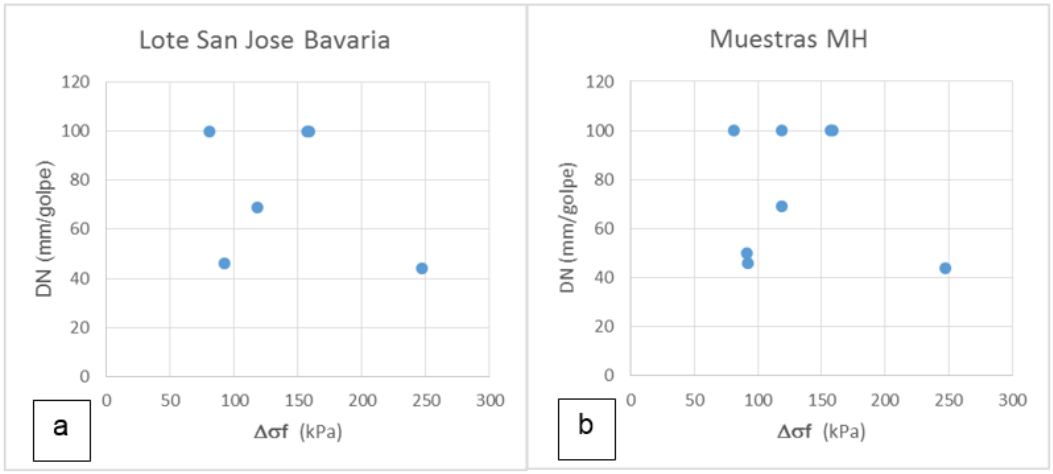


Figura 5-5: Correlaciones entre el DN y $\Delta\sigma_f$. (a) Lote San José Bavaria y (b) suelos tipo MH.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las gráficas anteriores se puede observar que, debido a la dispersión de los datos obtenidos, no es posible establecer una correlación entre las variables analizadas.

5.3 Correlaciones entre los ensayos tradicionales de resistencia al corte y las propiedades físicas.

Al igual que se hizo para las correlaciones entre ensayos de resistencia, se efectuaron los análisis entre ensayos y propiedades físicas para los 4 grupos de ensayo, el criterio de ajuste estadístico será el presentado por Rehman et al., (2017).

5.3.1. Relación entre el CBR con las propiedades físicas.

A continuación, se presentan las gráficas y los análisis de los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros físicos y el ensayo de CBR.

5.3.1.1 *Humedad natural vs CBR*

En la Figura 5-6 se presentan los resultados obtenidos para la condición de humedad natural.

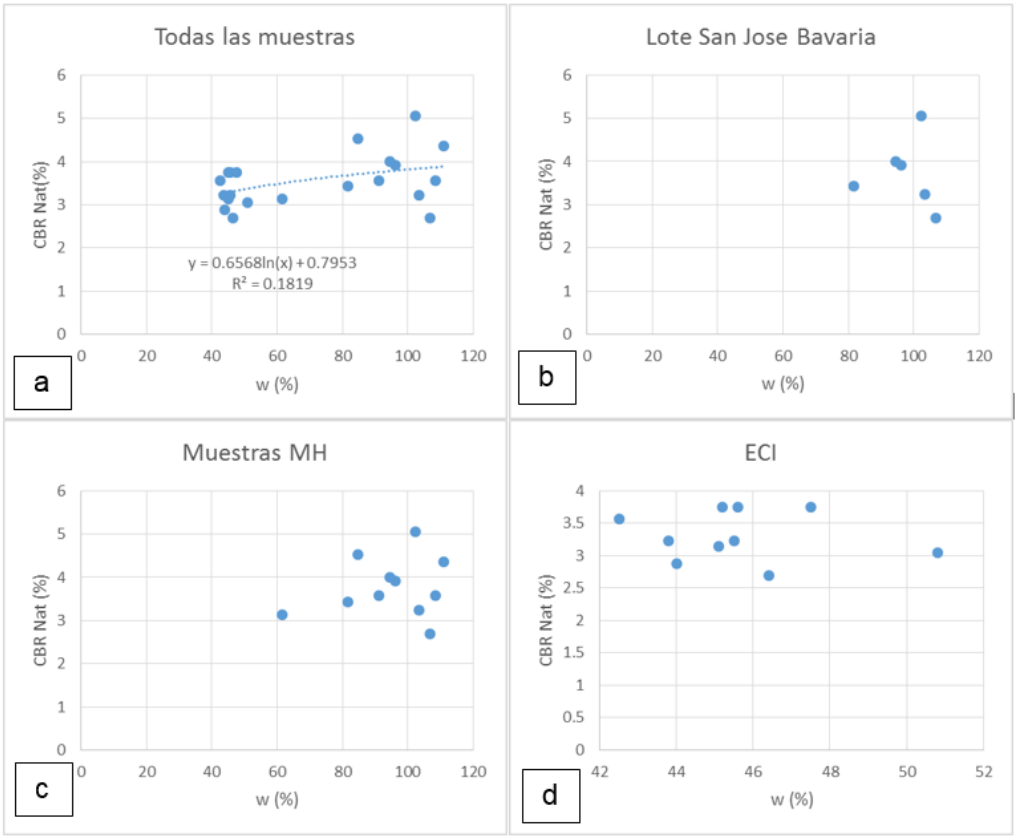


Figura 5-6: Correlaciones CBR a humedad natural y humedad natural. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica anterior se observa que la dispersión de los puntos en todos los grupos no permite tener ninguna correlación aceptable entre el CBR en condición natural y la humedad natural.

5.3.1.1 *Límite Líquido vs CBR*

En la Figura 5-7 se presentan los resultados obtenidos para la condición de humedad natural.

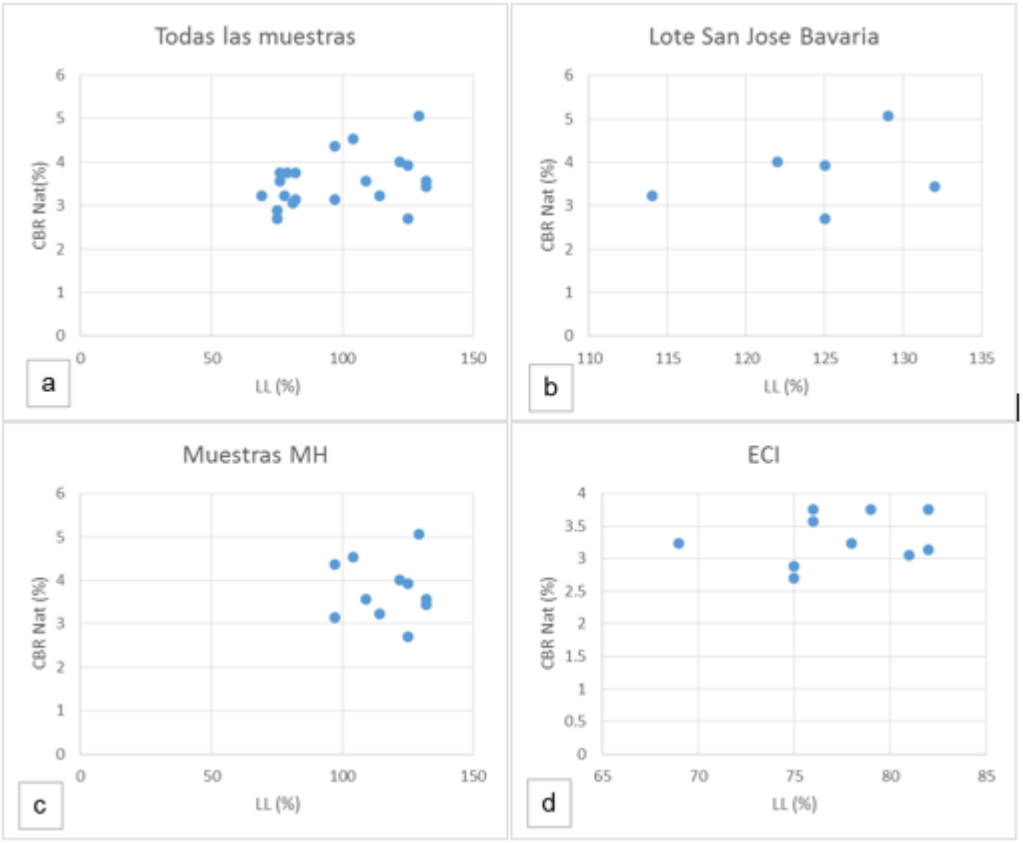


Figura 5-7: Correlaciones CBR a humedad natural y límite líquido. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica anterior se observa que la dispersión de los puntos en todos los grupos no permite tener ninguna correlación aceptable entre el CBR en condición natural y el límite líquido.

5.3.1.1 *Índice de Plasticidad vs CBR*

En la Figura 5-8 se presentan los resultados obtenidos para la condición de humedad natural.

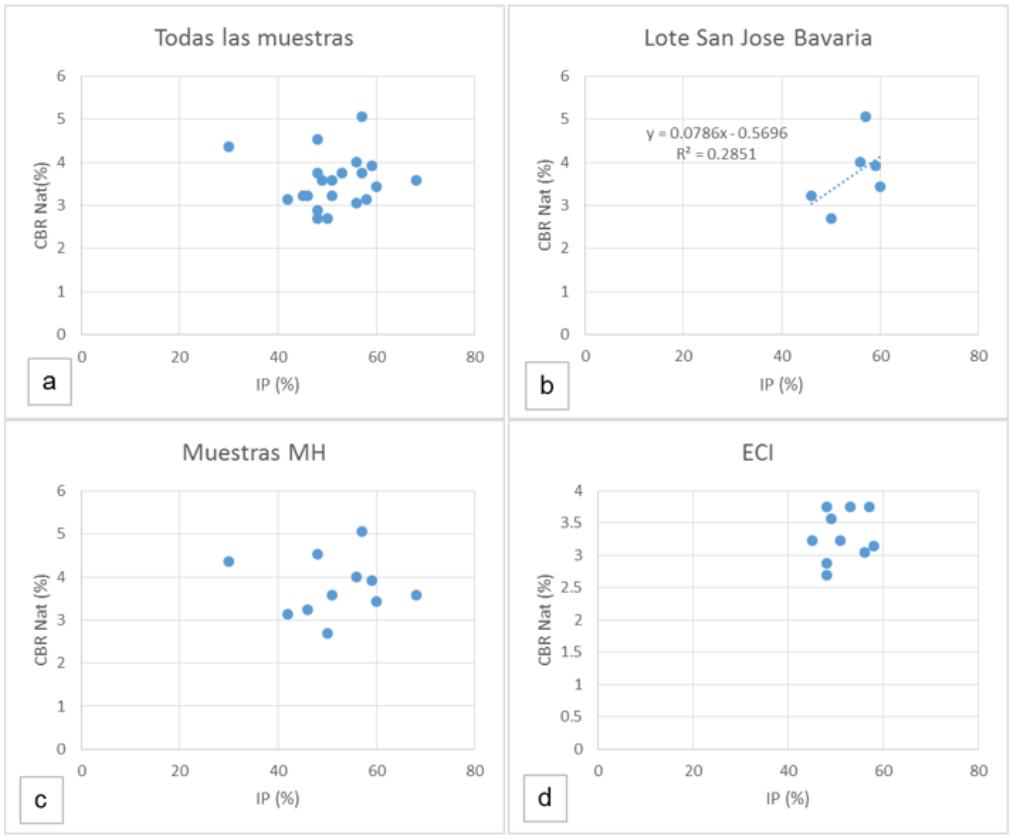


Figura 5-8: Correlaciones CBR a humedad natural y el índice de plasticidad. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica anterior se observa que la dispersión de los puntos en todos los grupos no permite tener ninguna correlación aceptable entre el CBR en condición natural y el índice de plasticidad.

5.3.2. Relación entre el ND (Número dinámico del ensayo PDC) con las propiedades físicas.

A continuación, se presentan las gráficas y los análisis de los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros físicos y el número dinámico.

5.3.2.1 *Humedad natural vs ND*

En la Figura 5-9 se presentan los resultados obtenidos para la correlación entre el número dinámico y la humedad natural.

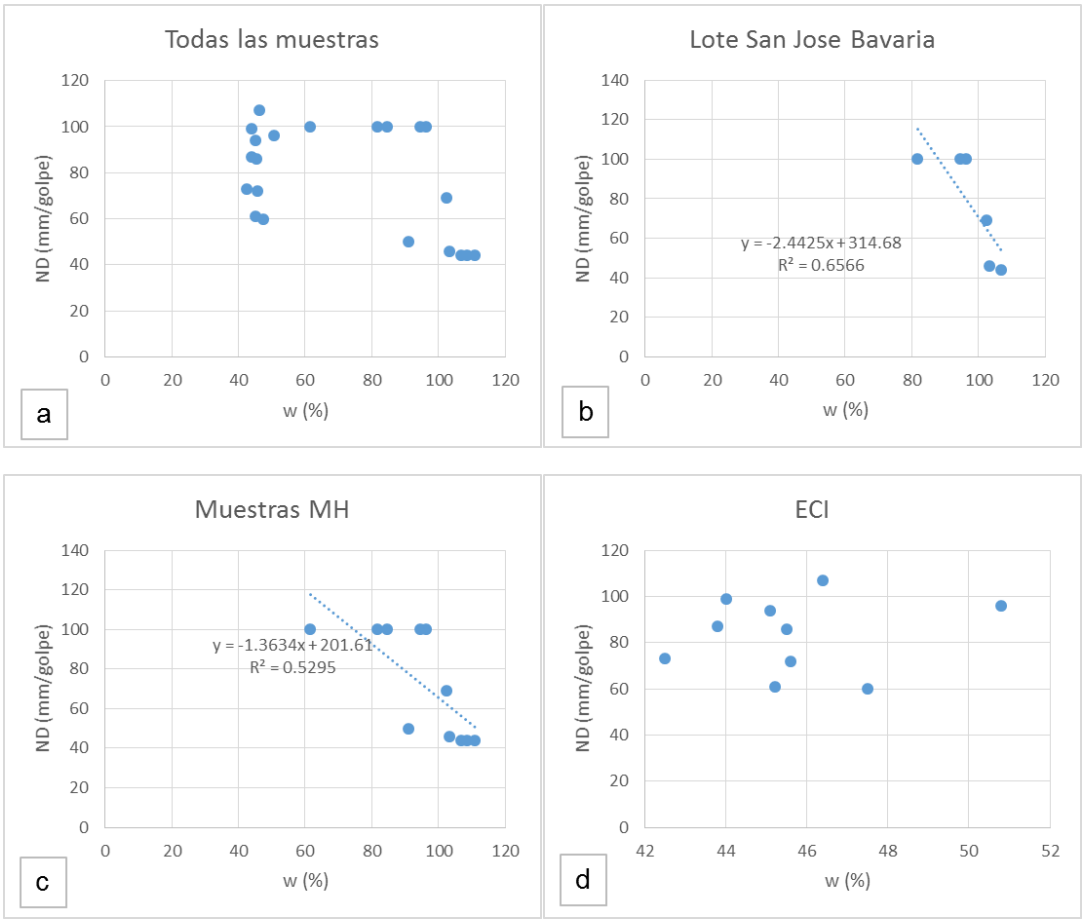


Figura 5-9: Correlaciones ND y la humedad natural. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica presentada no existe correlación para las muestras de la ECI ni para todas las muestras en conjunto, se obtuvieron correlaciones aceptables

para el lote de San José de Bavaria (R^2=0.6566) y para las muestras MH (R^2= 0.5295). A continuación se presentan las ecuaciones correspondientes:

$$ND\left(\frac{mm}{golpe}\right) = -2.4425 * w(\%) + 314.68, R^2 = 0.6566, Lote\ San\ José\ de\ Bavaria$$

Ecuación 5-2

$$ND\left(\frac{mm}{golpe}\right) = -1.3634 * w(\%) + 201.61, R^2 = 0.5295, Muestras\ MH$$

Ecuación 5-3

5.3.2.1 *Límite líquido vs ND*

En la Figura 5-10 se presentan los resultados obtenidos para la correlación entre el número dinámico y el límite líquido.

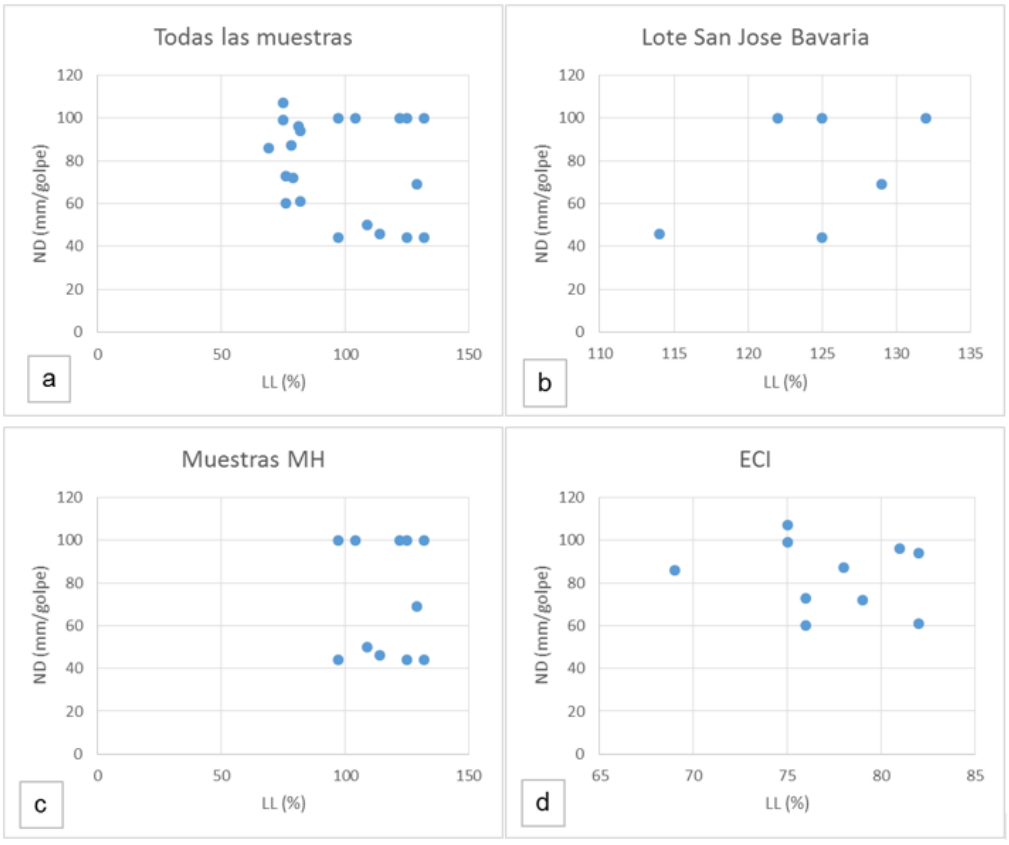


Figura 5-10: Correlaciones ND y el límite líquido. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica anterior se observa que la dispersión de los puntos en todos los grupos no permite tener ninguna correlación aceptable entre el ND y el límite líquido.

5.3.2.1 *Índice de plasticidad vs ND*

En la Figura 5-11 se presenta los resultados obtenidos para la correlación entre el número dinámico y el índice de plasticidad.

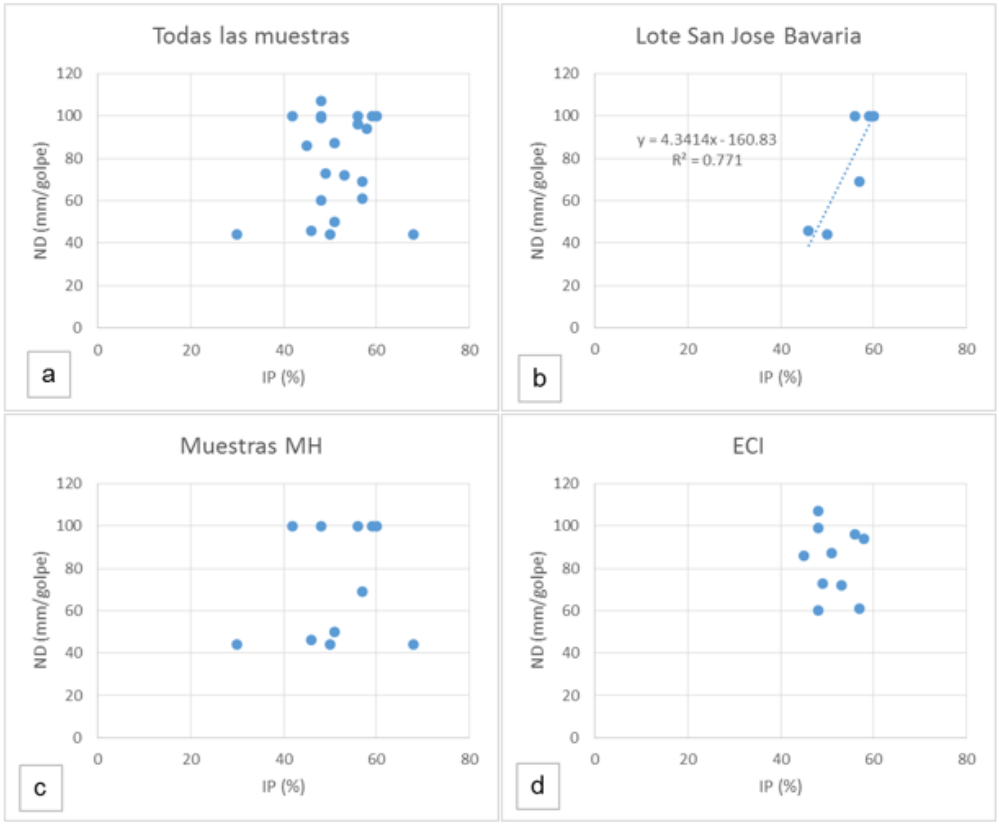


Figura 5-11: Correlaciones ND y el índice de plasticidad. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica presentada no existe correlación para los siguientes grupos: todas las muestras, muestras MH y las muestras de la ECI. Para las muestras de San José de Bavaria se obtuvo una correlación buena (R^2=0.771).

A continuación, se presenta la ecuación correspondiente:

$$ND\left(\frac{mm}{golpe}\right) = 4.3414 * IP(\%) - 160.83, R^2 = 0.771$$

Ecuación 5-4

5.3.3. Relación entre resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$) con las propiedades físicas.

A continuación, se presentan las gráficas y los análisis de los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros físicos y la resistencia al corte obtenida en el ensayo de corte rápido.

Como se ha mencionado, esta prueba solo se realizó en algunas muestras de suelo tipo MH, por tal motivo solo hay dos grupos de análisis: Muestras MH y Muestras de San José de Bavaria.

5.3.3.1 *Humedad natural vs resistencia al corte no drenada*

En la Figura 5-12 se presenta los resultados obtenidos para la correlación entre la resistencia al corte no drenada y la humedad natural.

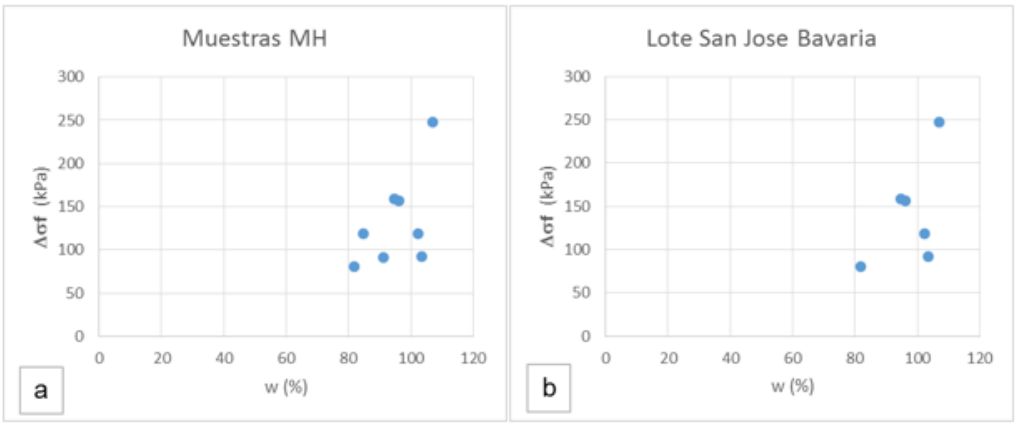


Figura 5-12: Correlaciones $\Delta\sigma_f$ y la humedad natural. (a) Muestras MH, (b) Lote San José de Bavaria.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica anterior se observa que la dispersión de los puntos en todos los grupos no permite tener ninguna correlación aceptable entre la resistencia al corte no drenada y la humedad natural.

5.3.3.1 *Límite líquido vs resistencia al corte no drenada*

En la Figura 5-13 se presentan los resultados obtenidos para la correlación entre la resistencia al corte no drenada y el límite líquido.

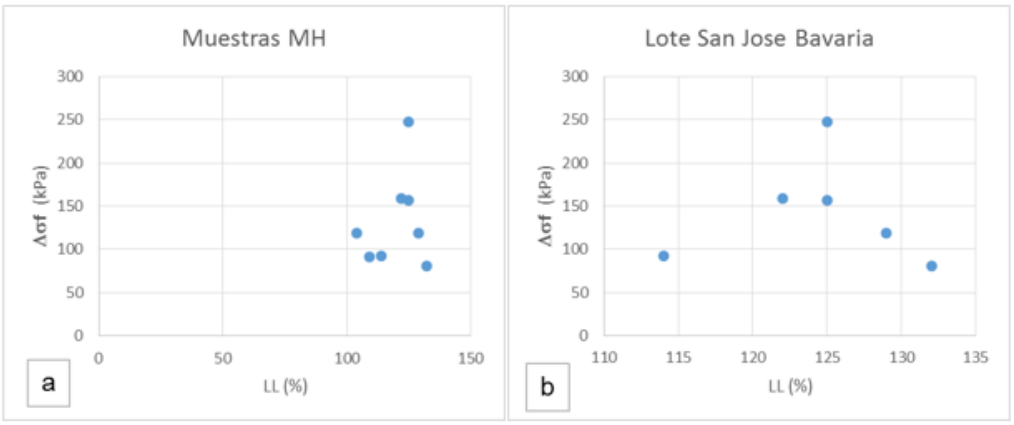


Figura 5-13: Correlaciones $\Delta\sigma_f$ y el límite líquido. (a) Muestras MH, (b) Lote San José de Bavaria.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica anterior se observa que la dispersión de los puntos en todos los grupos no permite tener ninguna correlación aceptable entre la resistencia al corte no drenada y el límite líquido.

5.3.3.1 *Índice de plasticidad vs resistencia al corte no drenada*

En la Figura 5-14 se presentan los resultados obtenidos para la correlación entre la resistencia al corte no drenada y el límite líquido.

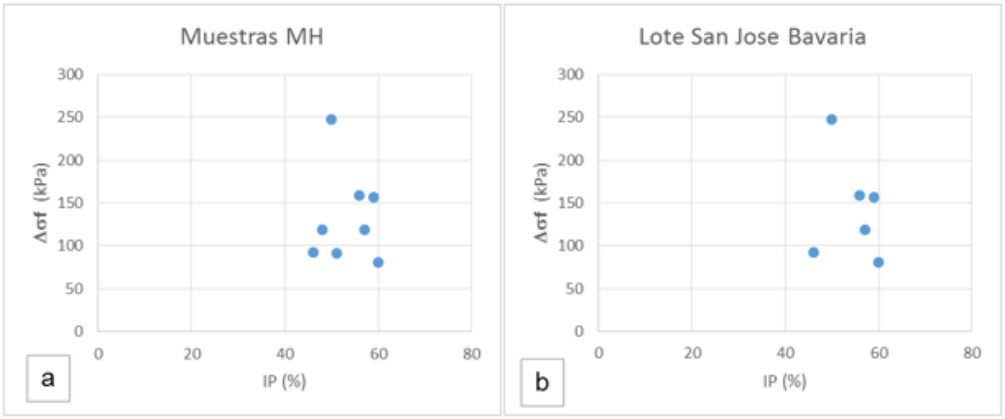


Figura 5-14: Correlaciones $\Delta\sigma_f$ y el índice de plasticidad. (a) Muestras MH, (b) Lote San José de Bavaria.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica anterior se observa que la dispersión de los puntos en todos los grupos no permite tener ninguna correlación aceptable entre la resistencia al corte no drenada y la humedad natural.

5.4 Resultados del ensayo de Módulo Resiliente (Mr)

En la Tabla 5-4 se presentan los valores del Mr para todas las exploraciones realizadas en esta investigación, durante las 15 secuencias de carga y los estados de esfuerzos establecidos por la norma.

Tabla 5-4: Mr (MPa) para diferentes estados de esfuerzos

Módulos resilientes a diferentes estados de esfuerzos (MPa)																	
Secuencia		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	USCS
σ_3 (kPa)		12.4	24.8	37.3	49.7	62	12.4	24.8	37.3	49.7	62	12.4	24.8	37.3	49.7	62	
σ_d (kPa)		41.4	41.4	41.4	41.4	41.4	27.6	27.6	27.6	27.6	27.6	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	
S.J. Bavaria	1	29.3	27.2	26.2	22.2	18.5	27.6	24.2	23.0	22.4	19.4	27.3	25.4	25.2	23.7	21.5	MH
S.J. Bavaria	2	30.0	29.1	25.7	23.5	19.4	29.5	26.9	25.2	19.1	17.0	29.5	26.0	22.7	19.9	15.2	MH
S.J. Bavaria	3	43.8	39.7	38.4	34.3	30.0	40.6	35.7	33.5	29.9	26.5	37.2	32.9	31.1	31.2	29.2	MH
S.J. Bavaria	4	59.5	53.5	49.9	39.7	38.0	50.5	37.4	33.9	33.5	37.6	56.1	40.5	38.8	35.2	34.9	MH
S.J. Bavaria	5	42.4	37.4	30.2	29.4	19.8	41.9	35.8	30.8	28.5	28.2	42.4	40.4	31.9	25.7	24.1	MH
S.J. Bavaria	6	36.4	34.6	30.7	29.6	28.1	31.9	29.4	28.4	29.8	26.8	31.3	28.7	27.6	30.0	26.5	MH
Cll 134 (1)	7	40.5	36.2	35.3	34.9	32.0	34.8	33.8	33.1	31.3	31.3	39.2	35.2	34.4	29.7	26.0	MH
CLL 134 (2)	8	38.0	30.4	28.3	27.2	26.7	31.4	28.6	28.5	27.7	27.5	38.9	25.7	25.3	23.9	23.5	MH
CLL 125 (1)	9	41.3	31.5	30.8	27.7	25.9	40.1	29.5	28.2	25.5	26.8	32.1	32.0	30.6	28.4	25.9	MH
CLL 125 (2)	10	43.9	31.9	32.1	28.6	26.9	38.1	31.0	28.8	26.4	27.6	33.5	33.2	31.3	29.5	26.5	MH
Castellana	11	27.2	26.3	25.9	22.0	21.1	26.5	25.8	25.9	25.5	21.4	26.6	27.7	26.3	24.1	25.2	MH
ECI	12	56.4	47.4	53.9	47.2	40.2	55.9	46.8	47.3	43.4	40.5	79.4	47.4	49.6	42.9	36.9	CH
ECI	13	55.6	52.8	49.7	44.7	41.7	56.1	45.2	50.9	44.9	41.0	64.9	44.2	37.8	32.9	37.2	CH
ECI	14	46.5	43.1	36.0	44.8	39.5	53.4	46.9	35.6	34.1	38.6	73.1	49.9	41.9	34.2	36.7	CH
ECI	15	56.5	46.7	40.9	37.0	40.8	44.1	38.2	42.8	40.0	40.1	57.8	47.9	37.5	36.3	38.5	CH
ECI	16	57.2	48.1	40.3	38.4	36.4	45.9	42.9	42.8	39.5	37.2	55.1	43.4	43.9	33.0	36.8	CH
ECI	17	36.0	27.0	25.9	24.9	23.8	43.5	33.5	29.8	24.6	34.1	49.3	39.8	31.9	32.6	23.9	CH
ECI	18	56.7	48.2	48.7	46.6	44.4	50.2	47.5	41.4	41.7	39.5	55.1	45.8	41.5	38.0	34.8	CH
ECI	19	60.5	51.4	51.9	49.7	47.4	53.5	50.6	44.2	44.5	42.1	58.7	48.8	44.2	40.6	37.1	CH
ECI	20	53.5	42.1	33.7	40.1	35.1	46.8	36.1	42.1	39.1	36.9	61.4	38.3	43.1	38.7	38.5	CH
ECI	21	59.3	49.7	39.8	45.7	41.6	53.6	51.2	47.4	47.2	42.1	53.3	45.6	43.2	44.4	42.7	CH

Fuente: Elaboración propia.

De la anterior tabla se puede observar que los Mr obtenidos para los suelos de subrasante analizados varían entre 15.2 MPa y 79.4 MPa, con un promedio de 37.0 MPa y una desviación estándar de 10.3 MPa. Al analizar únicamente las muestras de arcilla con alta compresibilidad (CH) de la ECI se obtienen Mr que varían entre 23.8 MPa y 79.4 MPa, con un promedio de 44.0 MPa y una desviación estándar de 8.7 MPa. Finalmente, las muestras de limo de alta compresibilidad (MH) se calcularon Mr que varían entre 15.2 MPa y 59.5 MPa, con un promedio de 30.7 MPa y una desviación estándar de 7.0 MPa.

5.4.1. Ecuaciones constitutivas

Dentro de la revisión bibliográfica se presentaron las diferentes expresiones existentes para suelos blandos y que buscan representar el comportamiento del Mr.

Algunos autores consideran de gran importancia el esfuerzo desviador para el cálculo del Mr, Andrei et al., (2004) considera que es necesario que se tenga en cuenta el esfuerzo bulk y el esfuerzo desviador; adicionalmente, presenta otras consideraciones tales como: los modelos log-log presentan mejores correlaciones que los semi-log y que las ecuaciones normalizadas a la presión atmosférica

presentan la ventaja que las constantes experimentales sean adimensionales (Bojacá Torres, 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior y la información recopilada en la revisión bibliográfica se consideró conveniente trabajar con dos ecuaciones constitutivas, la primera es del modelo *k* - σ_d presentado por Moossazadeh & Witczak, (1981) que tiene al esfuerzo desviador como único parámetro de diseño.

$$Mr = k1 * \left(\frac{\sigma_d}{Pa}\right)^{k2}$$

Ecuación 5-5

Donde M_r es el módulo resiliente, P_a es la presión atmosférica (102 kPa), σ_d el esfuerzo desviador y k_1 y k_2 constantes experimentales.

La segunda ecuación es la presentada por el Long Term Pavement Performance Study – FHWA (Yau & Quintus, 2002), la cual tiene en cuenta el esfuerzo bulk y el cortante octaédrico que es conocida como el Modelo Universal.

$$Mr = k1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k2} * \left[\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right]^{k3}$$

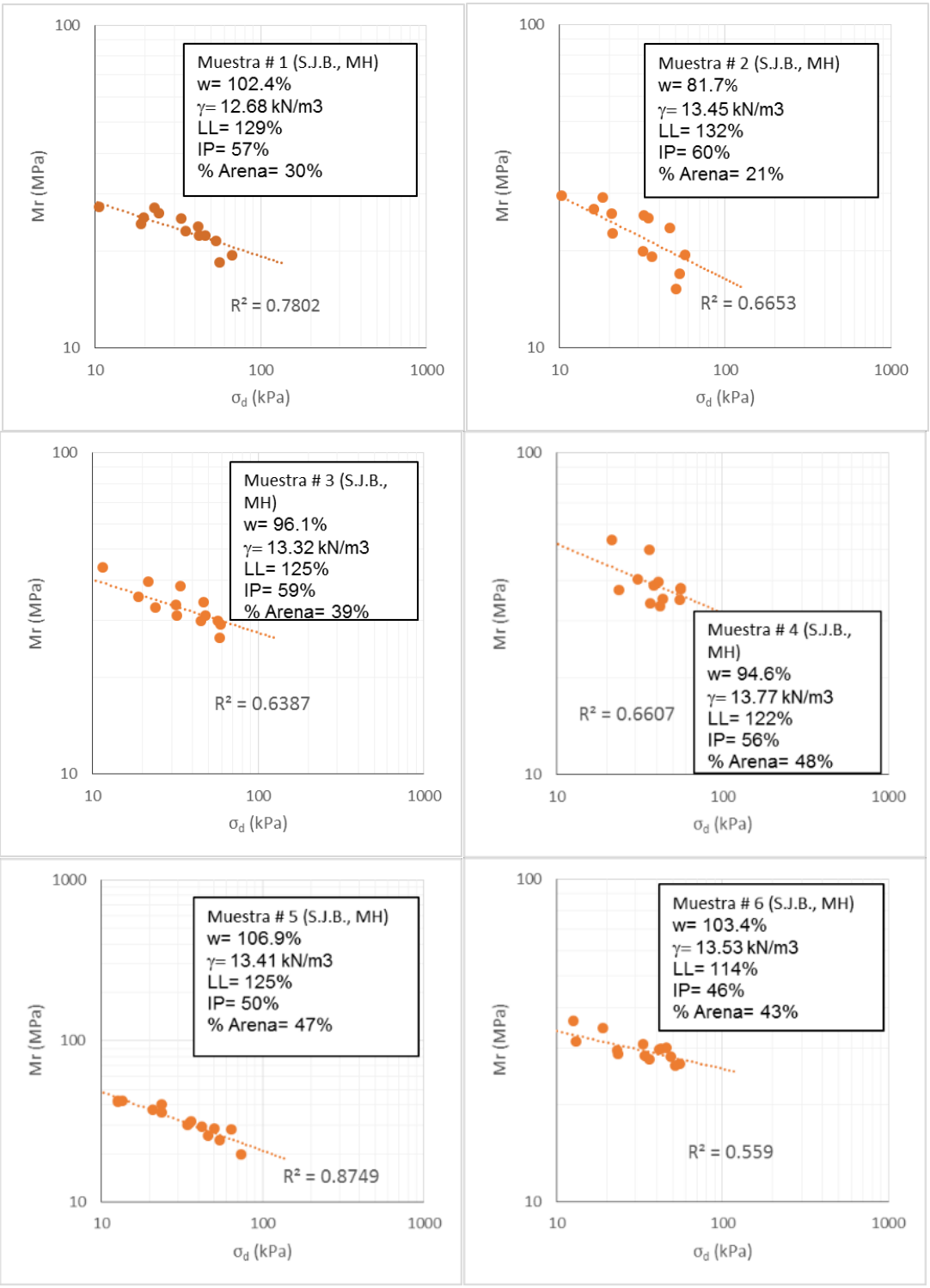
Ecuación 5-6

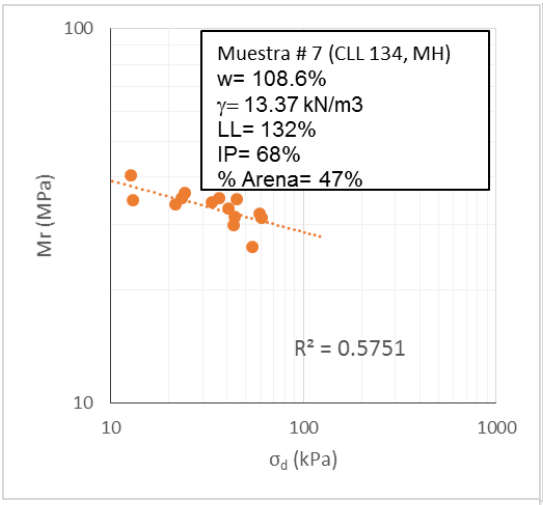
Donde M_r es el módulo resiliente, P_a es la presión atmosférica (102 kPa), θ el esfuerzo bulk y τ_{oct} el cortante octaédrico.

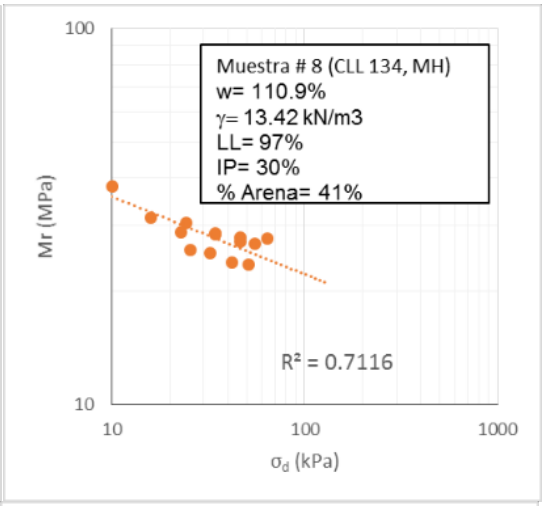
A continuación. se presenta el desarrollo de cada una de las ecuaciones mencionadas para las exploraciones de la presente investigación.

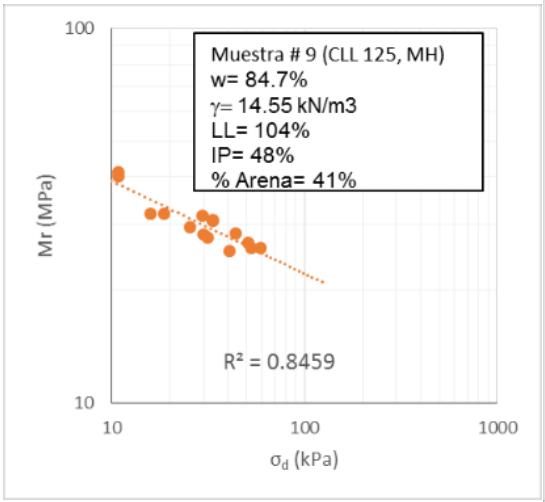
5.4.1.1 *Modelo k - σ_d*

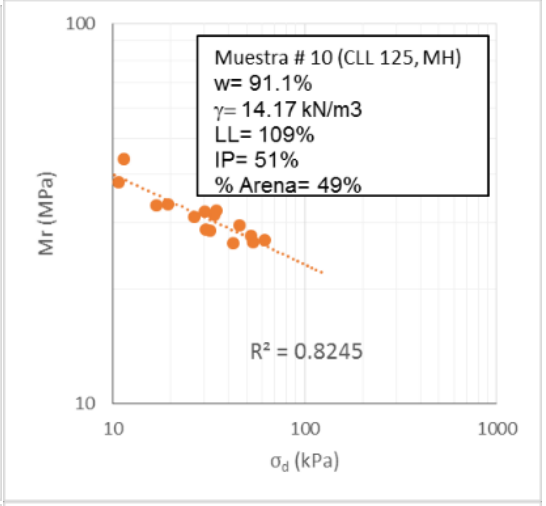
En la Figura 5-15 se presentará la variación del Mr frente al esfuerzo desviador con el fin de demostrar que esta ecuación es adecuada para este tipo de suelos de subrasante a pesar de tener un único parámetro (σ_d).

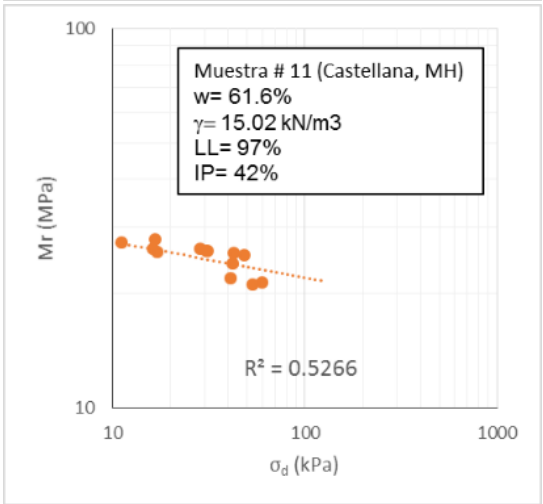

Muestra # 1 (S.J.B., MH)
w= 102.4%
γ= 12.68 kN/m3
LL= 129%
IP= 57%
% Arena= 30%
R² = 0.7802
Muestra # 2 (S.J.B., MH)
w= 81.7%
γ= 13.45 kN/m3
LL= 132%
IP= 60%
% Arena= 21%
R² = 0.6653
Muestra # 3 (S.J.B., MH)
w= 96.1%
γ= 13.32 kN/m3
LL= 125%
IP= 59%
% Arena= 39%
R² = 0.6387
Muestra # 4 (S.J.B., MH)
w= 94.6%
γ= 13.77 kN/m3
LL= 122%
IP= 56%
% Arena= 48%
R² = 0.6607
Muestra # 5 (S.J.B., MH)
w= 106.9%
γ= 13.41 kN/m3
LL= 125%
IP= 50%
% Arena= 47%
R² = 0.8749
Muestra # 6 (S.J.B., MH)
w= 103.4%
γ= 13.53 kN/m3
LL= 114%
IP= 46%
% Arena= 43%
R² = 0.559
Mr (MPa)
σd (kPa)
10
100
1000

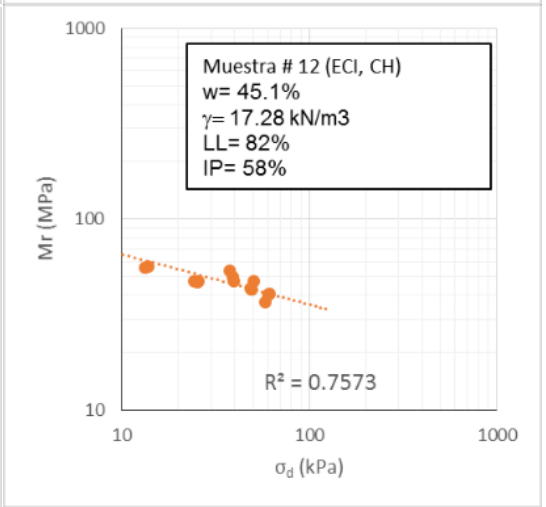

Muestra # 7 (CLL 134, MH)
w= 108.6%
γ= 13.37 kN/m3
LL= 132%
IP= 68%
% Arena= 47%
R² = 0.5751
Mr (MPa)
σd (kPa)
100
10
10
100
1000

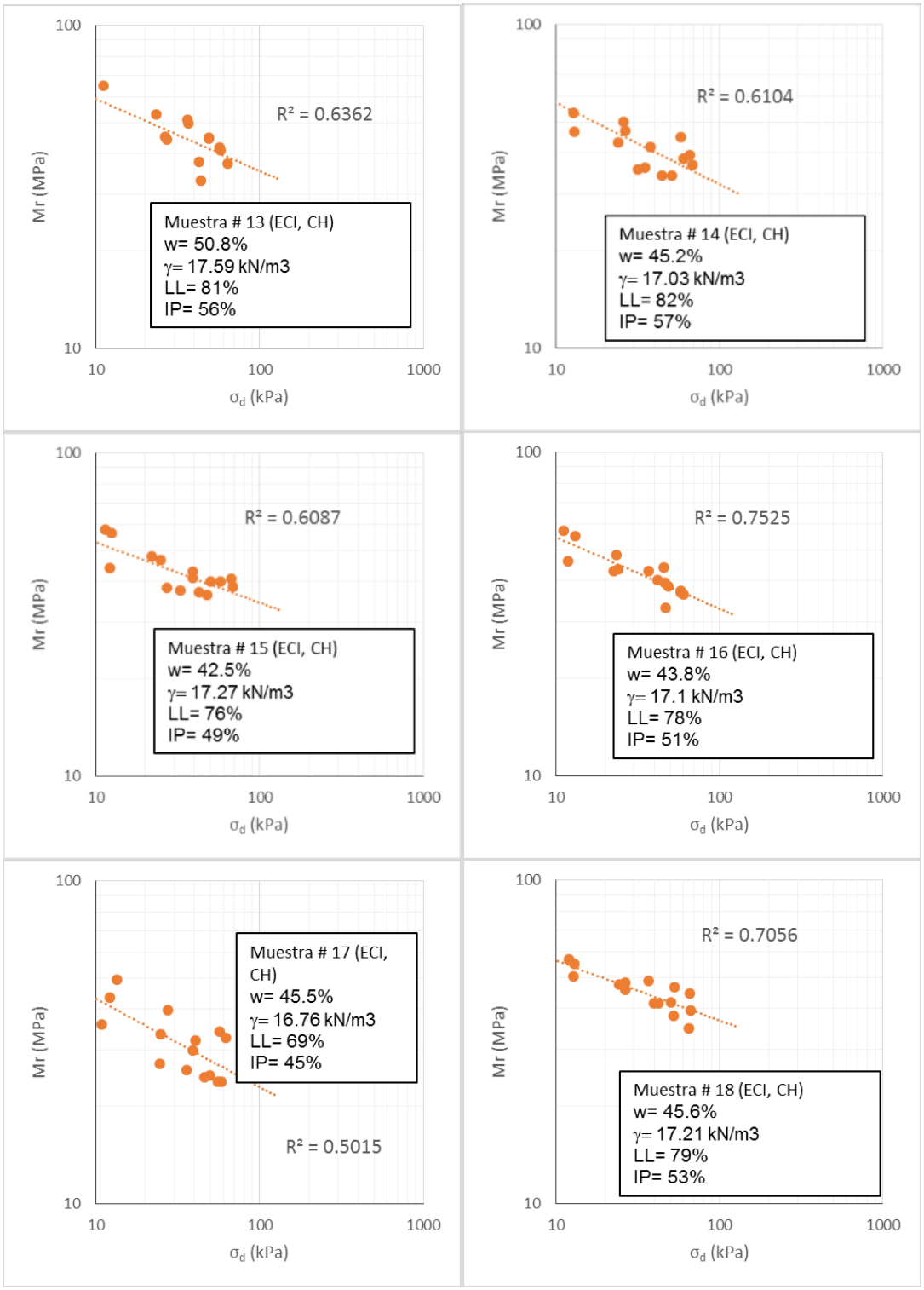

Muestra # 8 (CLL 134, MH)
w= 110.9%
γ= 13.42 kN/m3
LL= 97%
IP= 30%
% Arena= 41%
R² = 0.7116
Mr (MPa)
σd (kPa)
100
10
10
100
1000


Muestra # 9 (CLL 125, MH)
w= 84.7%
γ= 14.55 kN/m3
LL= 104%
IP= 48%
% Arena= 41%
R² = 0.8459
Mr (MPa)
σd (kPa)
100
10
10
100
1000


Muestra # 10 (CLL 125, MH)
w= 91.1%
γ= 14.17 kN/m3
LL= 109%
IP= 51%
% Arena= 49%
R² = 0.8245
Mr (MPa)
σd (kPa)
100
10
10
100
1000


Muestra # 11 (Castellana, MH)
w= 61.6%
γ= 15.02 kN/m3
LL= 97%
IP= 42%
R² = 0.5266
Mr (MPa)
σd (kPa)
100
10
10
100
1000


Muestra # 12 (ECI, CH)
w= 45.1%
γ= 17.28 kN/m3
LL= 82%
IP= 58%
R² = 0.7573
Mr (MPa)
σd (kPa)
1000
100
10
10
100
1000


100
10
Mr (MPa)
R² = 0.6362
Muestra # 13 (ECI, CH)
w= 50.8%
γ= 17.59 kN/m3
LL= 81%
IP= 56%
10
100
1000
σd (kPa)
R² = 0.6104
Muestra # 14 (ECI, CH)
w= 45.2%
γ= 17.03 kN/m3
LL= 82%
IP= 57%
R² = 0.6087
Muestra # 15 (ECI, CH)
w= 42.5%
γ= 17.27 kN/m3
LL= 76%
IP= 49%
R² = 0.7525
Muestra # 16 (ECI, CH)
w= 43.8%
γ= 17.1 kN/m3
LL= 78%
IP= 51%
Muestra # 17 (ECI, CH)
w= 45.5%
γ= 16.76 kN/m3
LL= 69%
IP= 45%
R² = 0.5015
R² = 0.7056
Muestra # 18 (ECI, CH)
w= 45.6%
γ= 17.21 kN/m3
LL= 79%
IP= 53%

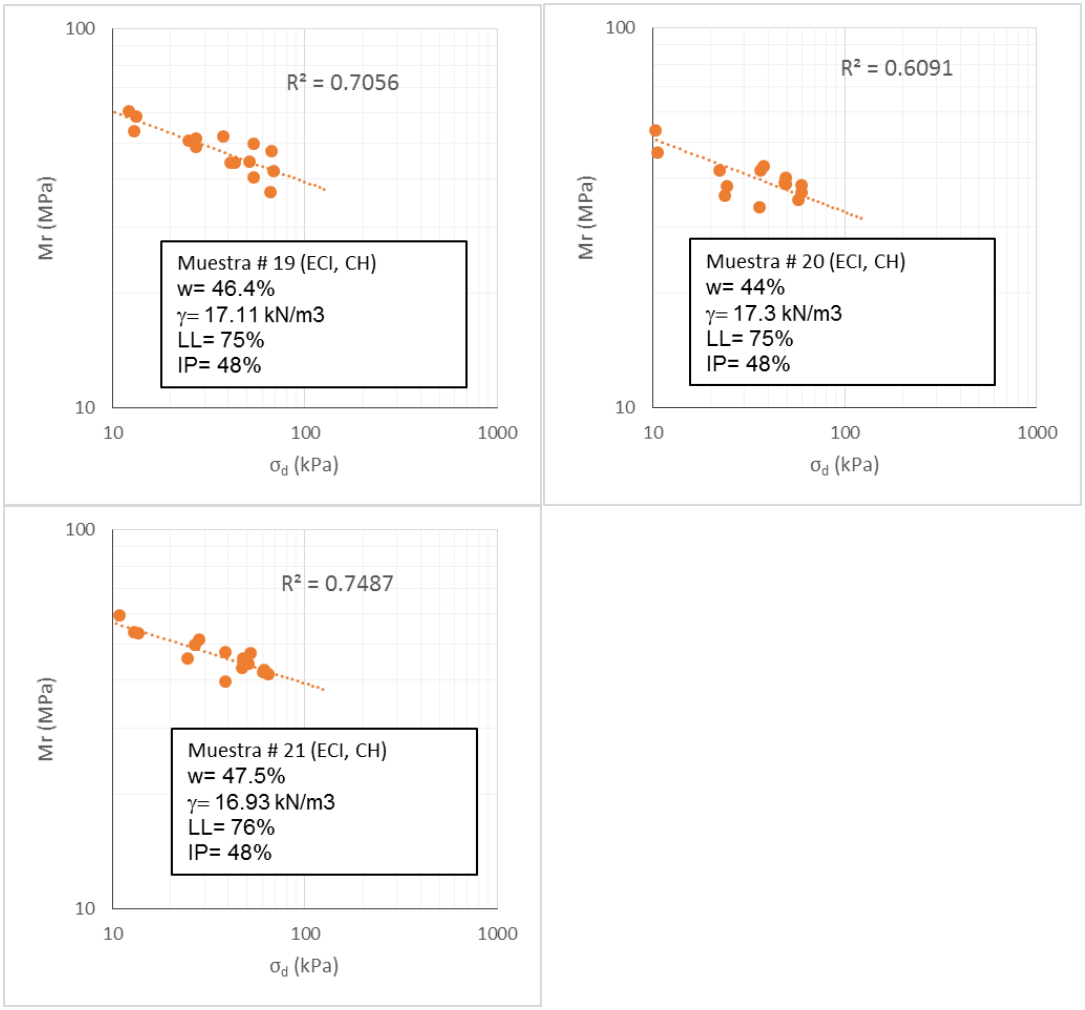


Figura 5-15: Verificación Dependencia del MR con el σ_d

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las gráficas presentadas, se puede observar que existe una dependencia del módulo respecto a esta variable ya que resultan valores de R^2>0.65 en la mayoría de los casos sin importar la variación en las propiedades físicas de las muestras ensayadas.

A partir de los resultados obtenidos y una vez demostrado que el modelo k-σ_d representa adecuadamente el comportamiento del Mr para los suelos ensayados, es posible determinar las constantes experimentales k1 y k2 del modelo a partir de un análisis estadístico y el cálculo de mínimas diferencias cuadradas. En la Tabla 5-5 se presenta para cada una de las muestras el resumen de las constantes obtenidas

junto con el coeficiente de ajuste (R^2) del Mr calculado por este modelo frente al Mr de laboratorio (Figura 5-16).

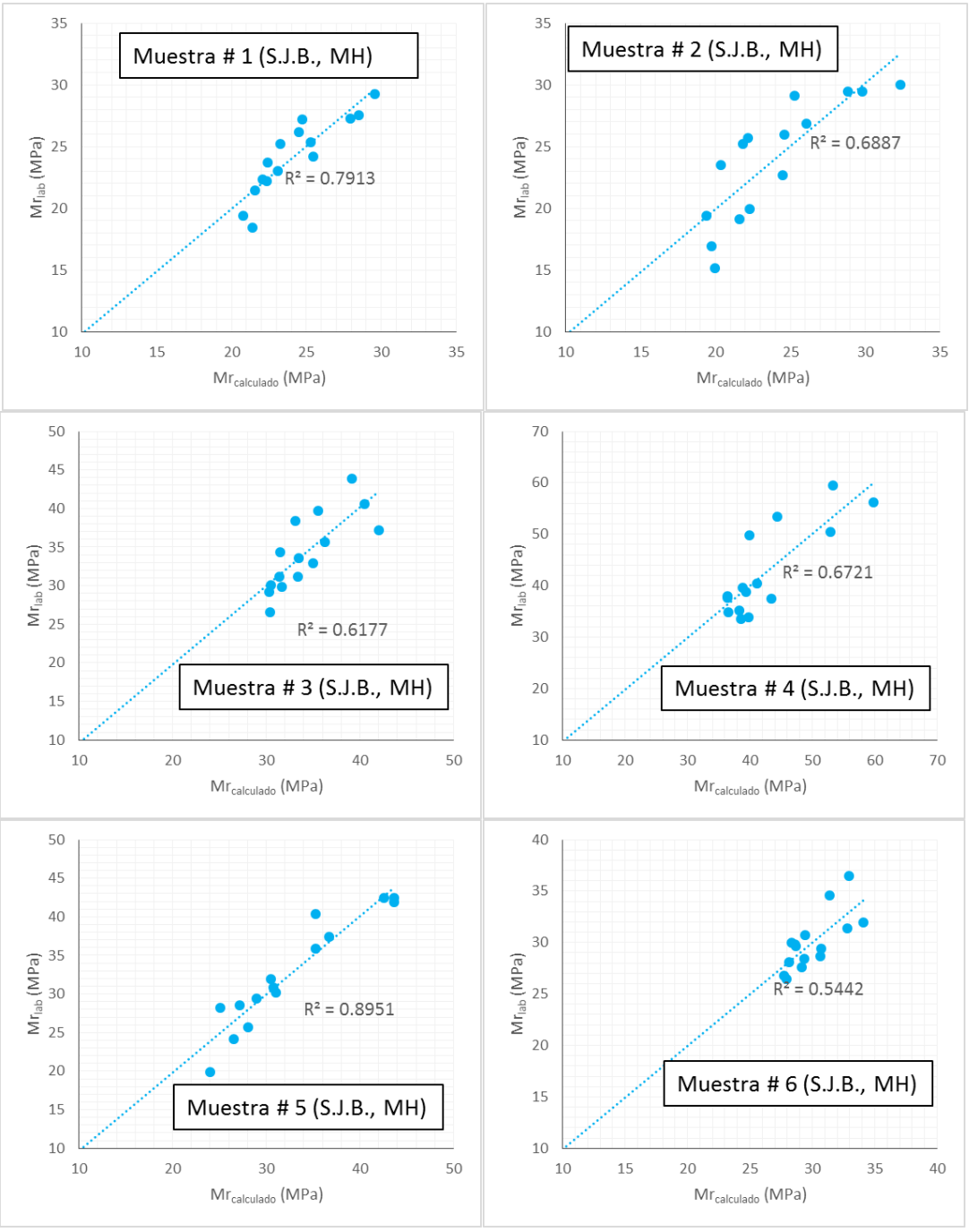
Tabla 5-5: Resultados de las constantes experimentales para el modelo k-σ_d.

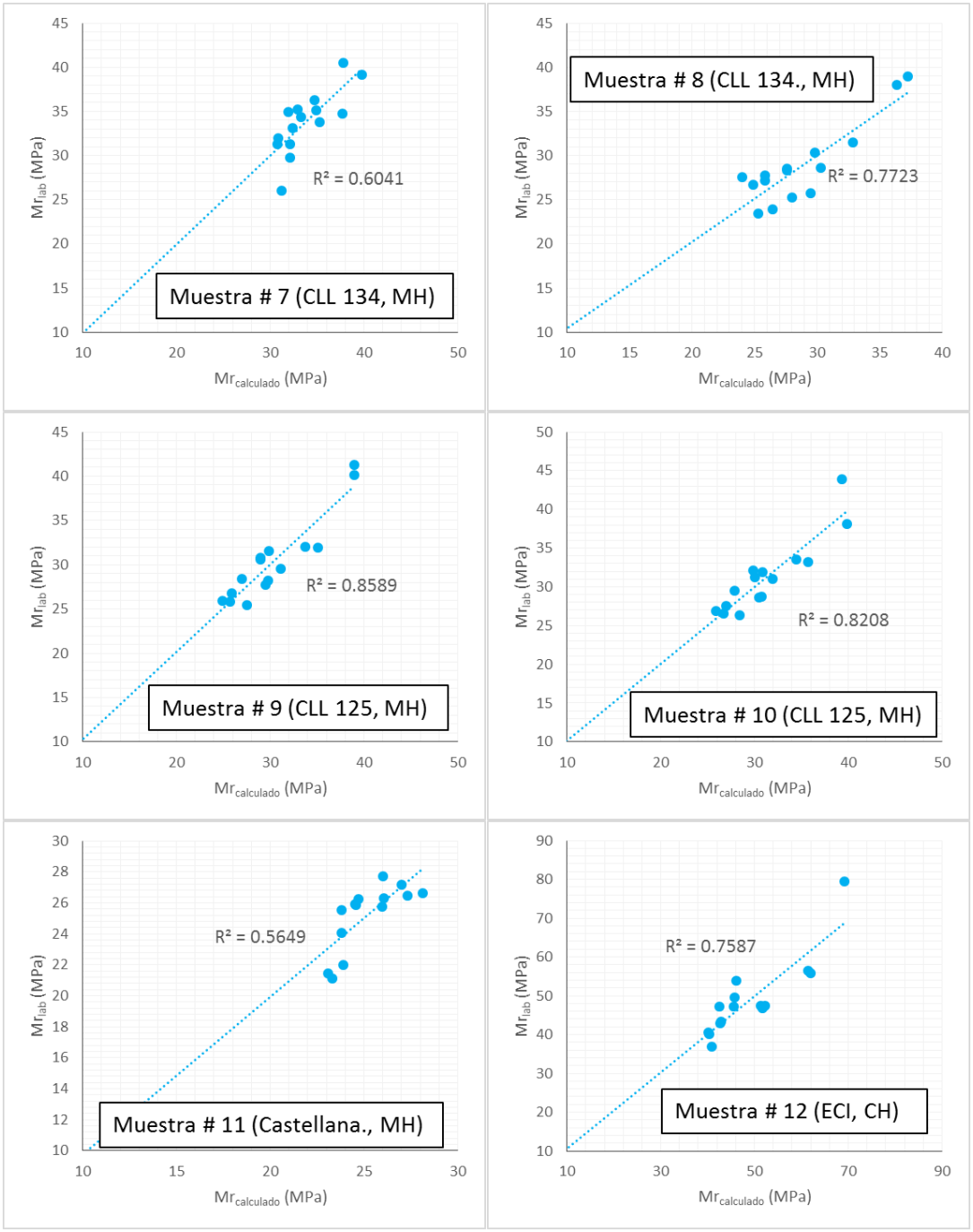
Exploración		k_1	k_2	R^2	USCS
S.J. Bavaria	**1**	19.462	-0.159	0.791	MH
S.J. Bavaria	**2**	16.985	-0.232	0.689	MH
S.J. Bavaria	**3**	27.859	-0.156	0.618	MH
S.J. Bavaria	**4**	32.168	-0.207	0.672	MH
S.J. Bavaria	**5**	21.396	-0.342	0.895	MH
S.J. Bavaria	**6**	25.841	-0.116	0.544	MH
Cll 134 (1)	**7**	28.695	-0.132	0.604	MH
CLL 134 (2)	**8**	21.642	-0.225	0.772	MH
CLL 125 (1)	**9**	21.647	-0.261	0.859	MH
CLL 125 (2)	**10**	22.861	-0.247	0.821	MH
Castellana	**11**	21.946	-0.093	0.565	MH
ECI	**12**	34.771	-0.283	0.759	CH
ECI	**13**	35.607	-0.218	0.675	CH
ECI	**14**	30.644	-0.29	0.656	CH
ECI	**15**	33.753	-0.202	0.636	CH
ECI	**16**	32.714	-0.222	0.760	CH
ECI	**17**	21.482	-0.349	0.609	CH
ECI	**18**	36.811	-0.183	0.735	CH
ECI	**19**	39.395	-0.183	0.735	CH
ECI	**20**	31.863	-0.214	0.645	CH
ECI	**21**	39.07	-0.164	0.775	CH

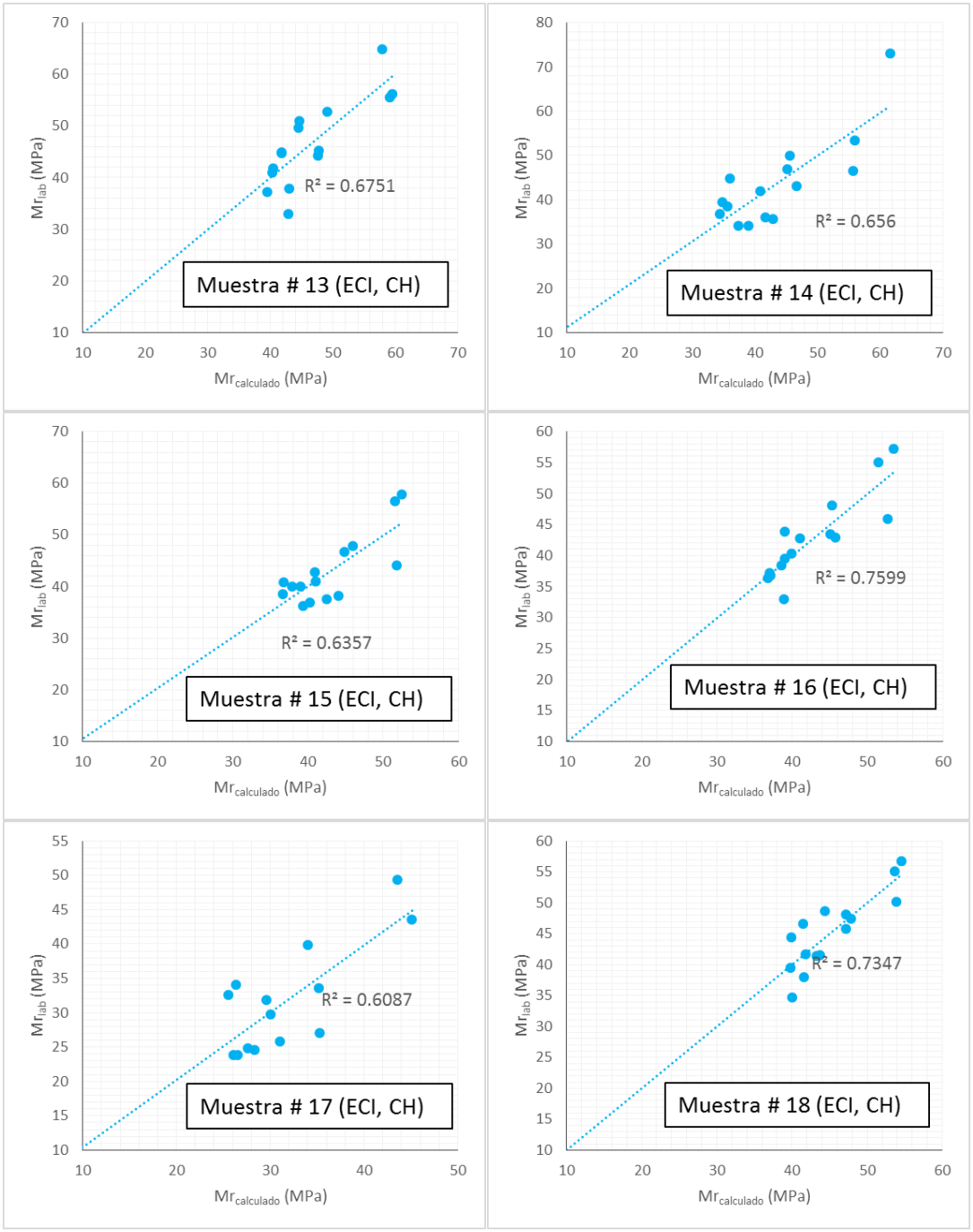
Fuente: Elaboración propia.

Los valores de k1 son mayores a la unidad y los valores k2 son negativos, lo anterior cumple con lo encontrado en la literatura y representa una relación inversamente proporcional entre el Mr y el esfuerzo desviador (Bojacá Torres, 2019).

En las gráficas de la Figura 5-16 se puede observar que el coeficiente de ajuste (R^2) para la comparación de los Mr varía entre 0.54 y 0.89. Sin embargo, 15 de las muestras obtuvieron buenas correlaciones (R^2>0.65).


Muestra # 1 (S.J.B., MH)
R² = 0.7913
Muestra # 2 (S.J.B., MH)
R² = 0.6887
Muestra # 3 (S.J.B., MH)
R² = 0.6177
Muestra # 4 (S.J.B., MH)
R² = 0.6721
Muestra # 5 (S.J.B., MH)
R² = 0.8951
Muestra # 6 (S.J.B., MH)
R² = 0.5442
Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (MPa)


Muestra # 7 (CLL 134, MH)
R² = 0.6041
Muestra # 8 (CLL 134., MH)
R² = 0.7723
Muestra # 9 (CLL 125, MH)
R² = 0.8589
Muestra # 10 (CLL 125, MH)
R² = 0.8208
Muestra # 11 (Castellana., MH)
R² = 0.5649
Muestra # 12 (ECI, CH)
R² = 0.7587
Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (MPa)


Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (MPa)
R² = 0.6751
Muestra # 13 (ECI, CH)
R² = 0.656
Muestra # 14 (ECI, CH)
R² = 0.6357
Muestra # 15 (ECI, CH)
R² = 0.7599
Muestra # 16 (ECI, CH)
R² = 0.6087
Muestra # 17 (ECI, CH)
R² = 0.7347
Muestra # 18 (ECI, CH)

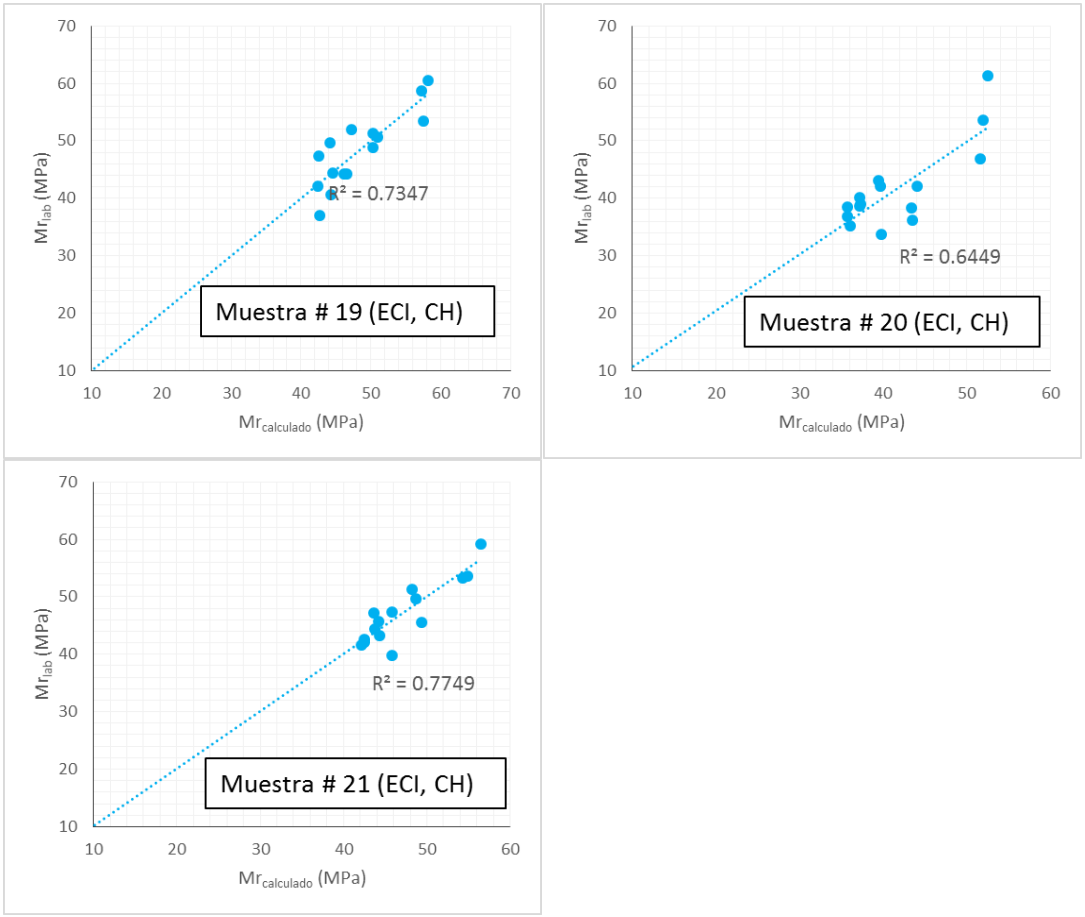


Figura 5-16: Comparación Mr obtenido en laboratorio Vs. Mr calculado por el modelo k-σ_d

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se buscó determinar una ecuación única aplicable a los suelos de subrasante de la zona lacustre de la ciudad de Bogotá, para ello se analizaron 3 grupos: Todas las muestras, muestras MH y muestras CH. En la Figura 5-17 se presenta la nube de puntos y su respectiva línea de tendencia.

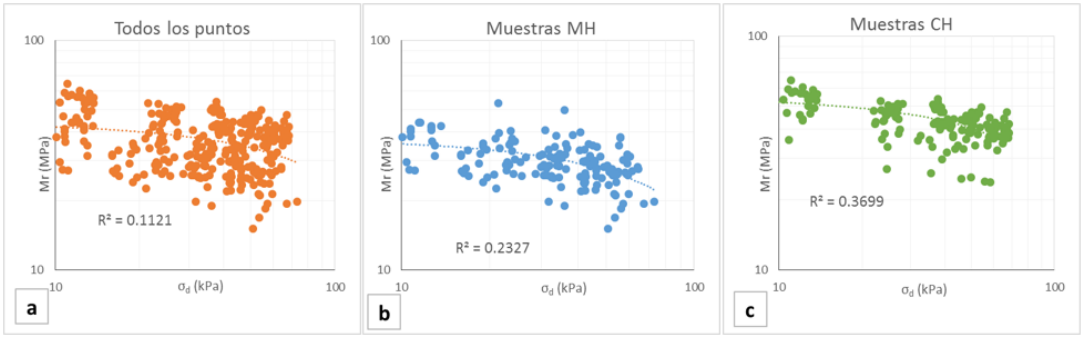


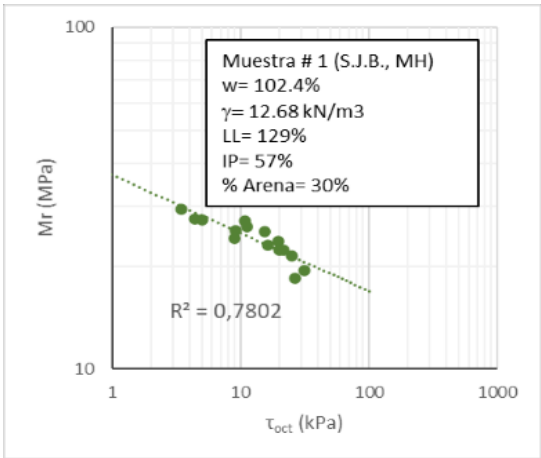
Figura 5-17: Resultados Mr Vs σ_d. (a) todos los puntos, (b) muestras MH y (c) muestras CH.

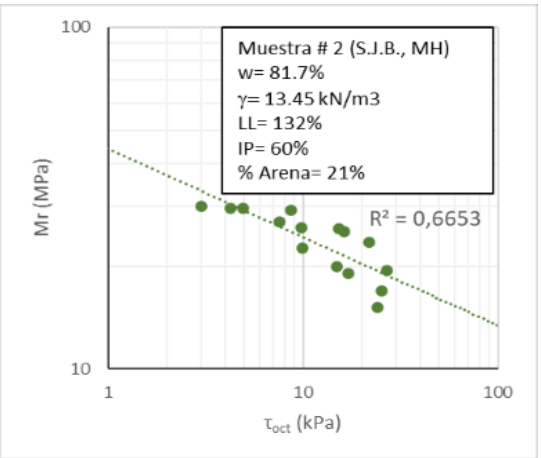
Fuente: Elaboración propia.

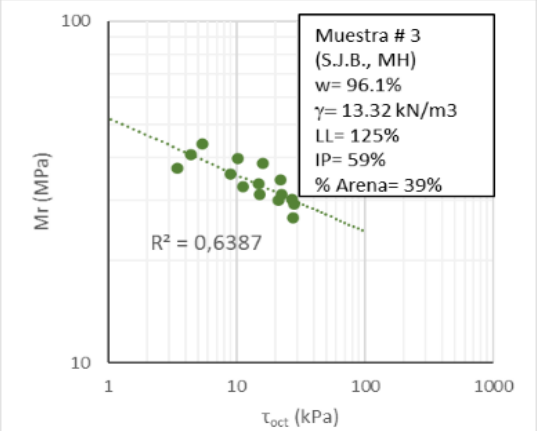
De acuerdo con las gráficas presentadas se puede observar que al analizar los tres grupos (todas las muestras, muestras MH y muestras CH) se obtienen coeficientes de correlación (R2) muy bajos. Por tal motivo no es posible determinar una ecuación constitutiva única para estos suelos lacustres en función únicamente del esfuerzo desviador.

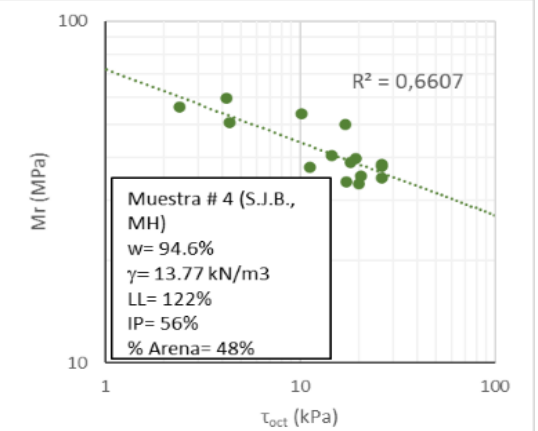
5.4.1.1 *Modelo Universal*

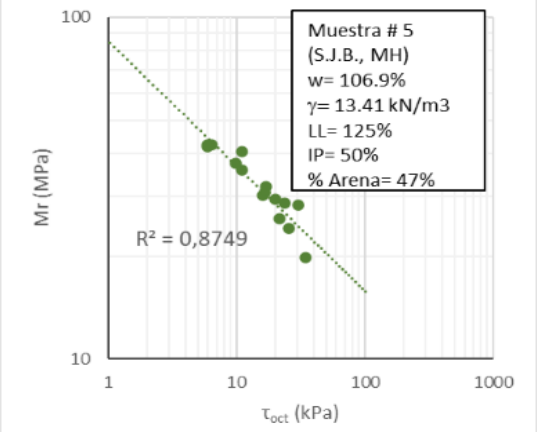
En la Figura 5-18 se presentará la variación del Mr frente al cortante octaédrico (τ_{oct}) con el fin de demostrar que esta ecuación es adecuada para este tipo de suelos de subrasante.

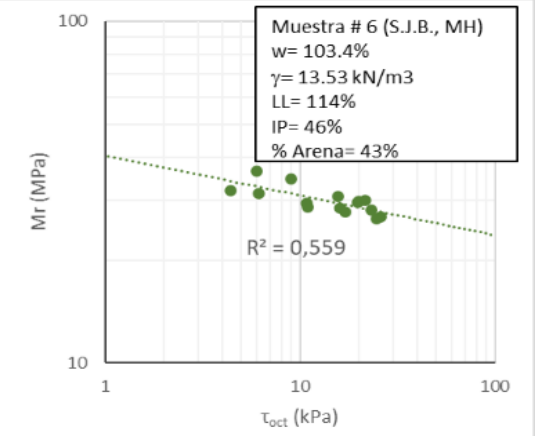

Muestra # 1 (S.J.B., MH)
w= 102.4%
γ= 12.68 kN/m3
LL= 129%
IP= 57%
% Arena= 30%
R² = 0,7802
Mr (MPa)
τoct (kPa)
100
10
1
10
100
1000

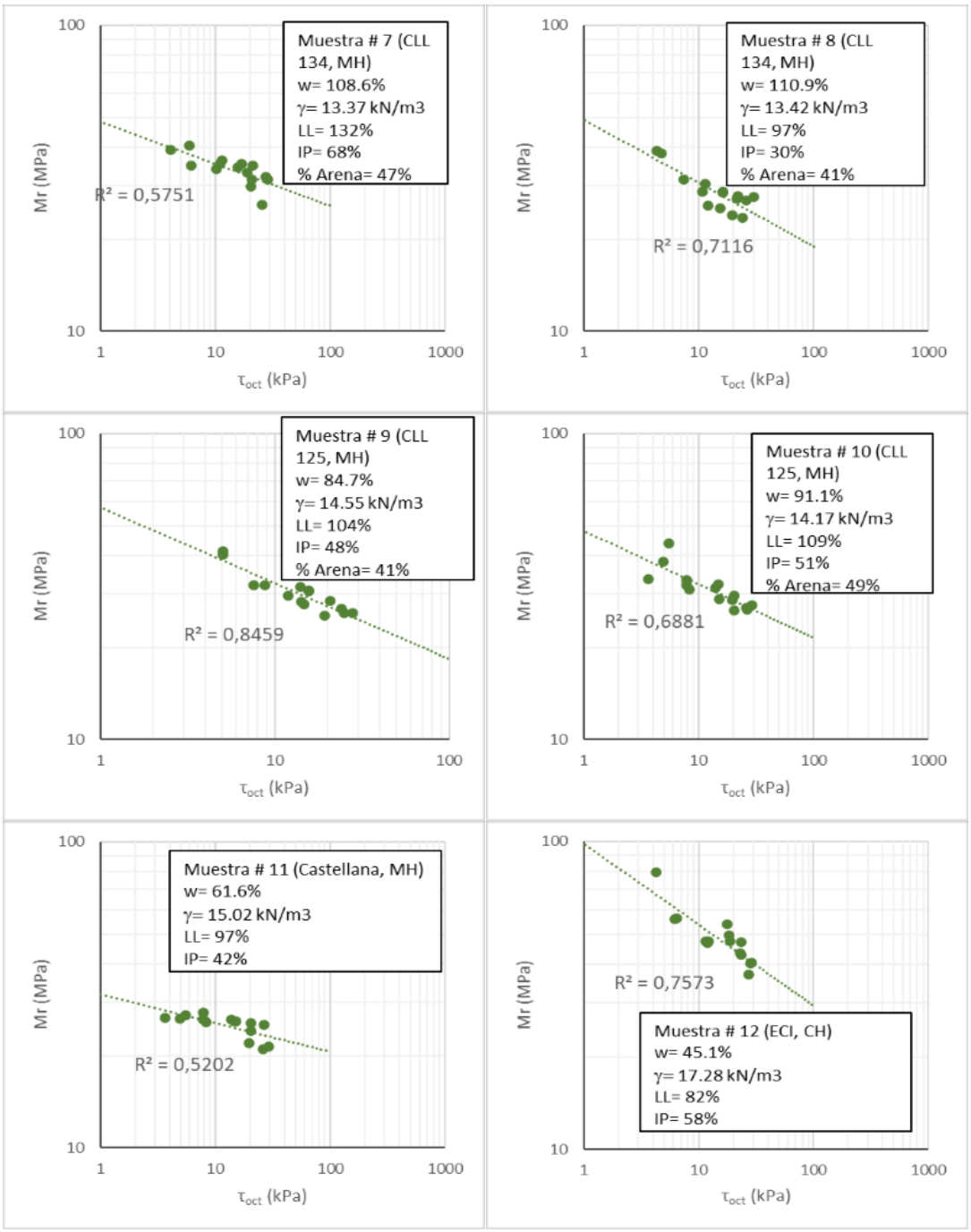

Muestra # 2 (S.J.B., MH)
w= 81.7%
γ= 13.45 kN/m3
LL= 132%
IP= 60%
% Arena= 21%
R² = 0,6653
Mr (MPa)
τoct (kPa)
100
10
1
10
100

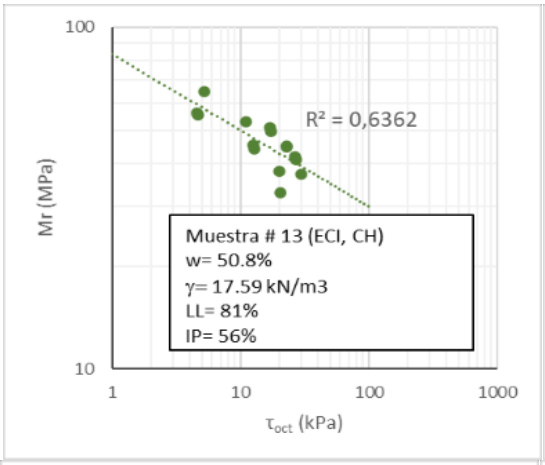

Muestra # 3
(S.J.B., MH)
w= 96.1%
γ= 13.32 kN/m3
LL= 125%
IP= 59%
% Arena= 39%
R² = 0,6387
Mr (MPa)
τoct (kPa)
100
10
1
10
100
1000

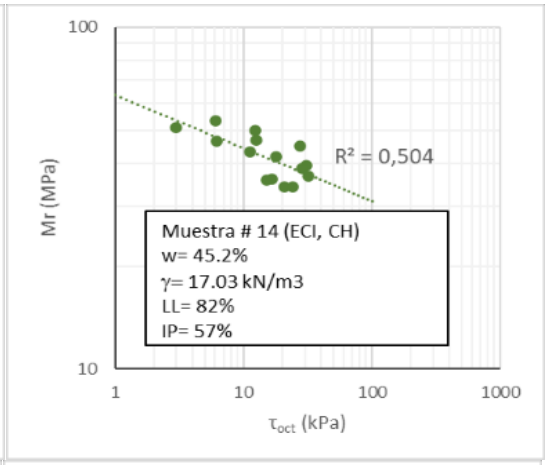

R² = 0,6607
Muestra # 4 (S.J.B., MH)
w= 94.6%
γ= 13.77 kN/m3
LL= 122%
IP= 56%
% Arena= 48%
Mr (MPa)
τoct (kPa)
100
10
1
10
100

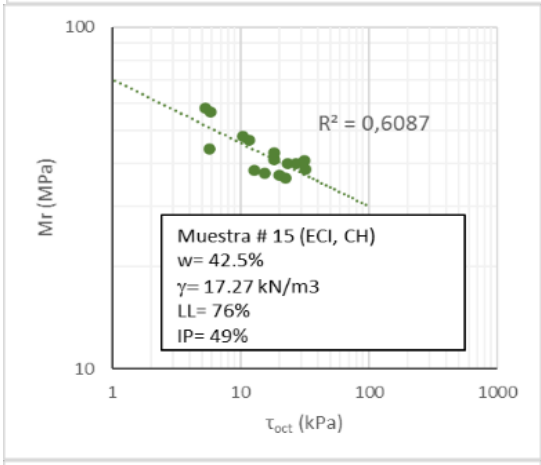

Muestra # 5
(S.J.B., MH)
w= 106.9%
γ= 13.41 kN/m3
LL= 125%
IP= 50%
% Arena= 47%
R² = 0,8749
Mr (MPa)
τoct (kPa)
100
10
1
10
100
1000

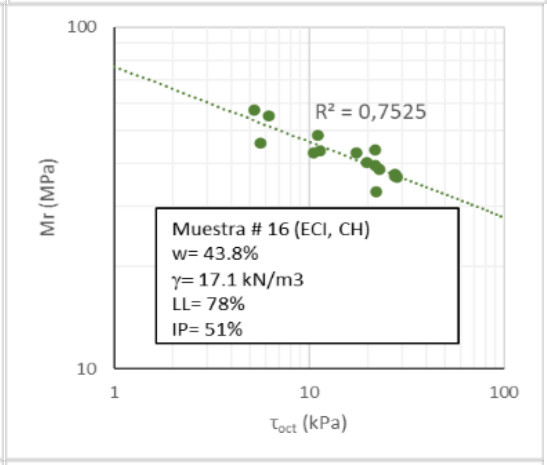

Muestra # 6 (S.J.B., MH)
w= 103.4%
γ= 13.53 kN/m3
LL= 114%
IP= 46%
% Arena= 43%
R² = 0,559
Mr (MPa)
τoct (kPa)
100
10
1
10
100

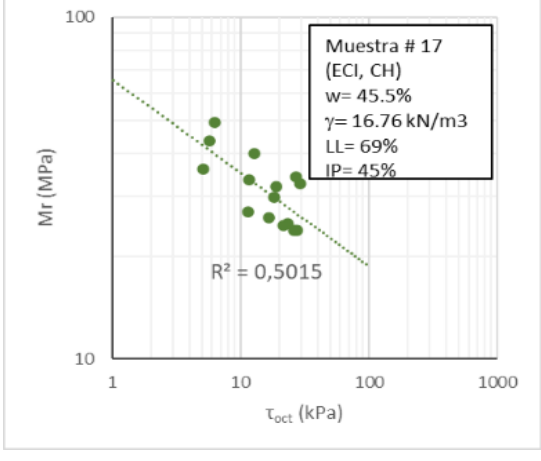

Muestra # 7 (CLL 134, MH)
w= 108.6%
γ= 13.37 kN/m3
LL= 132%
IP= 68%
% Arena= 47%
R² = 0,5751
Muestra # 8 (CLL 134, MH)
w= 110.9%
γ= 13.42 kN/m3
LL= 97%
IP= 30%
% Arena= 41%
R² = 0,7116
Muestra # 9 (CLL 125, MH)
w= 84.7%
γ= 14.55 kN/m3
LL= 104%
IP= 48%
% Arena= 41%
R² = 0,8459
Muestra # 10 (CLL 125, MH)
w= 91.1%
γ= 14.17 kN/m3
LL= 109%
IP= 51%
% Arena= 49%
R² = 0,6881
Muestra # 11 (Castellana, MH)
w= 61.6%
γ= 15.02 kN/m3
LL= 97%
IP= 42%
R² = 0,5202
R² = 0,7573
Muestra # 12 (ECI, CH)
w= 45.1%
γ= 17.28 kN/m3
LL= 82%
IP= 58%
Mr (MPa)
τoct (kPa)
100
10
1
10
100
1000

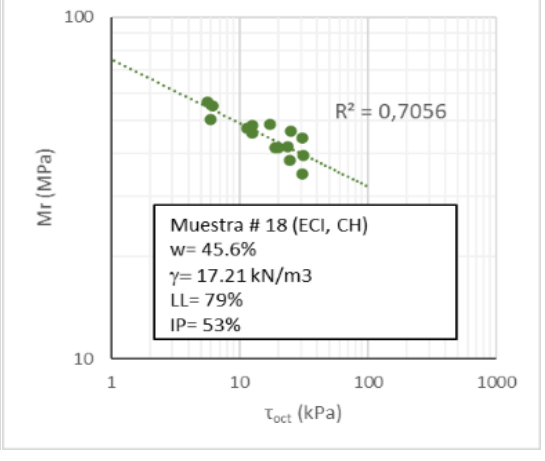

100
10
Mr (MPa)
R² = 0,6362
Muestra # 13 (ECI, CH)
w= 50.8%
γ= 17.59 kN/m3
LL= 81%
IP= 56%
1
10
100
1000
τoct (kPa)


100
10
Mr (MPa)
R² = 0,504
Muestra # 14 (ECI, CH)
w= 45.2%
γ= 17.03 kN/m3
LL= 82%
IP= 57%
1
10
100
1000
τoct (kPa)


100
10
Mr (MPa)
R² = 0,6087
Muestra # 15 (ECI, CH)
w= 42.5%
γ= 17.27 kN/m3
LL= 76%
IP= 49%
1
10
100
1000
τoct (kPa)


100
10
Mr (MPa)
R² = 0,7525
Muestra # 16 (ECI, CH)
w= 43.8%
γ= 17.1 kN/m3
LL= 78%
IP= 51%
1
10
100
τoct (kPa)


100
10
Mr (MPa)
Muestra # 17
(ECI, CH)
w= 45.5%
γ= 16.76 kN/m3
LL= 69%
IP= 45%
R² = 0,5015
1
10
100
1000
τoct (kPa)


100
10
Mr (MPa)
R² = 0,7056
Muestra # 18 (ECI, CH)
w= 45.6%
γ= 17.21 kN/m3
LL= 79%
IP= 53%
1
10
100
1000
τoct (kPa)

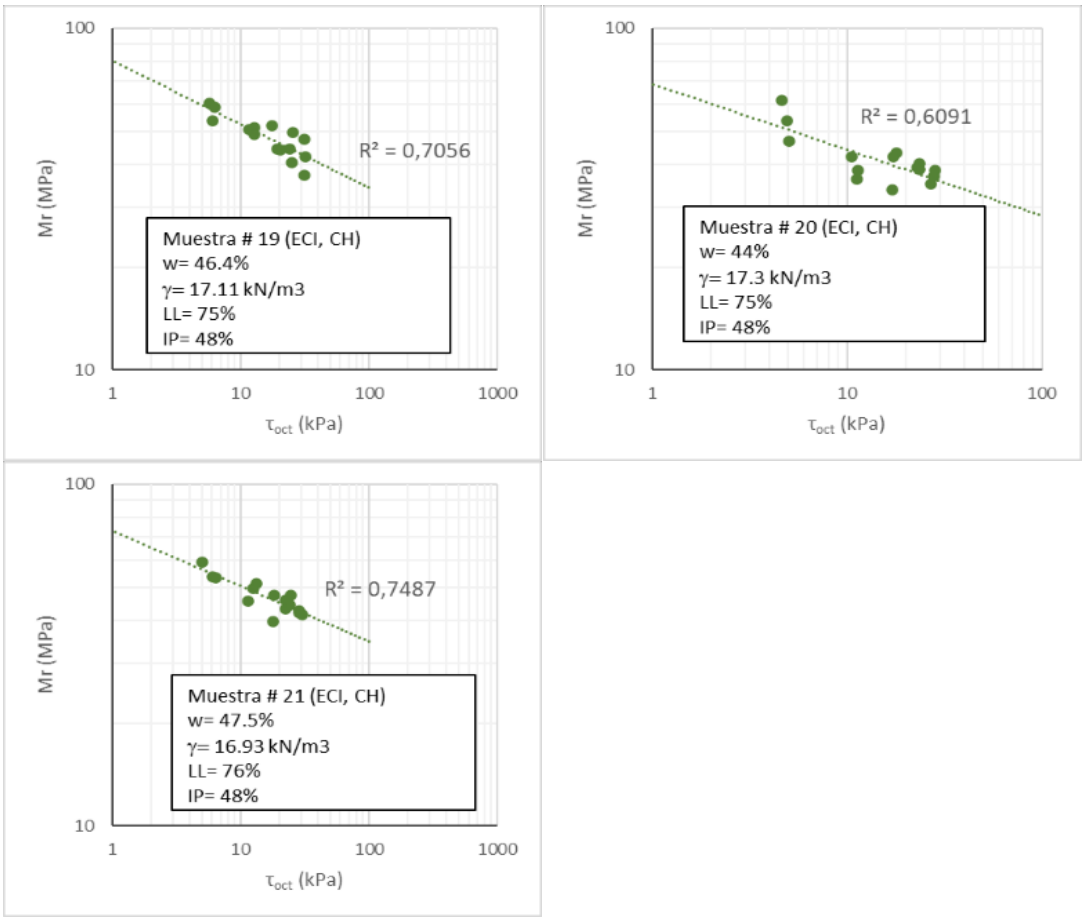


Figura 5-18: Verificación Dependencia del MR con el τ_{oct}

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las gráficas presentadas, se puede observar que existe una dependencia del módulo respecto al cortante octaédrico ya que resultan valores de R^2>0.60 en la mayoría de los casos sin importar la variación en las propiedades físicas de las muestras ensayadas.

A partir de los resultados obtenidos y una vez demostrado que el modelo universal representa adecuadamente el comportamiento del Mr para los suelos ensayados, es posible determinar las constantes experimentales k_1, k_2 y k_3 del modelo a partir de un análisis estadístico y el cálculo de mínimas diferencias cuadradas. En la Tabla 5-6 se presenta para cada una de las muestras el resumen de las constantes obtenidas junto con el coeficiente de ajuste (R^2) del Mr calculado por este modelo frente al Mr de laboratorio (Figura 5-19).

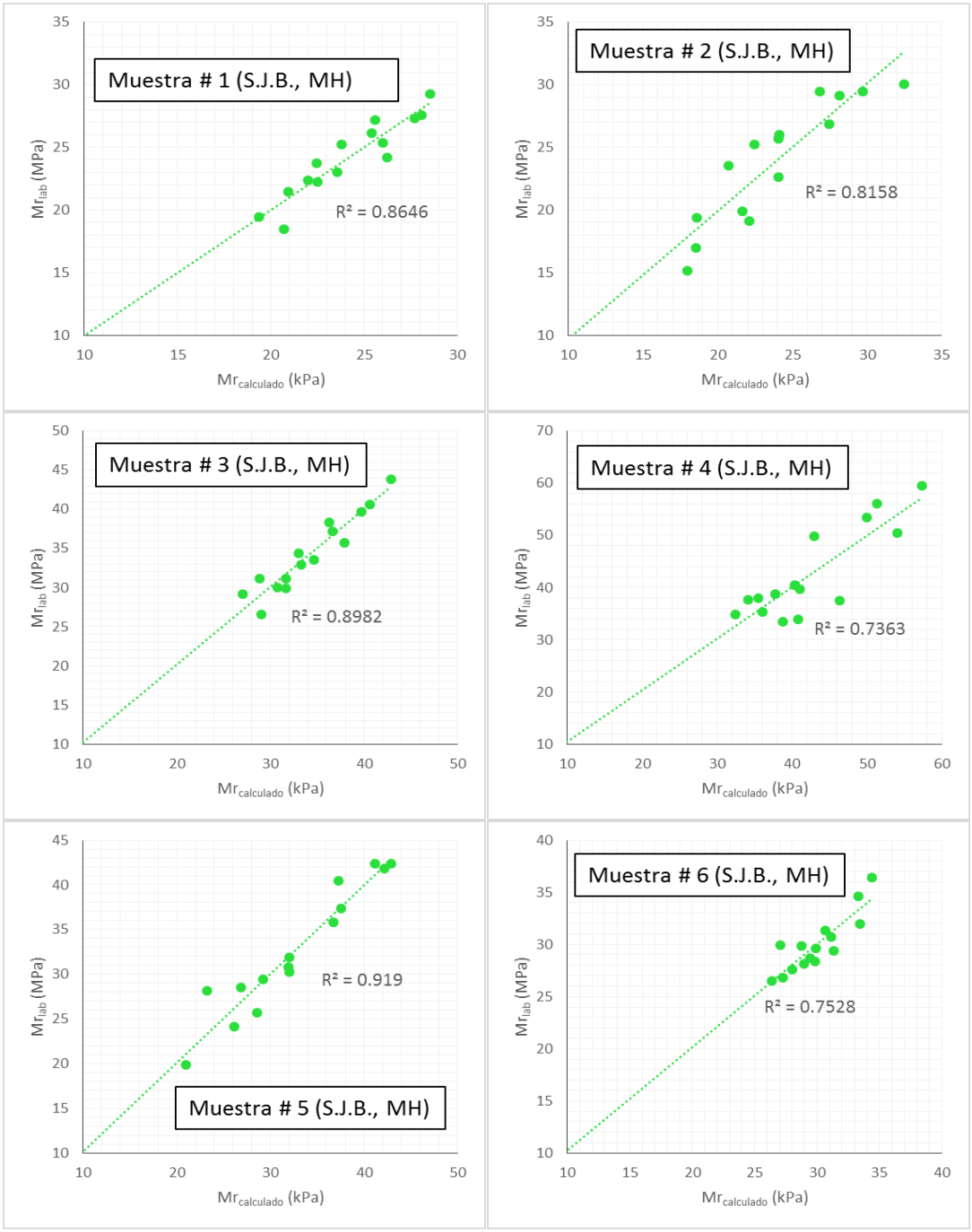
Tabla 5-6: Resultados de las constantes experimentales para el modelo universal

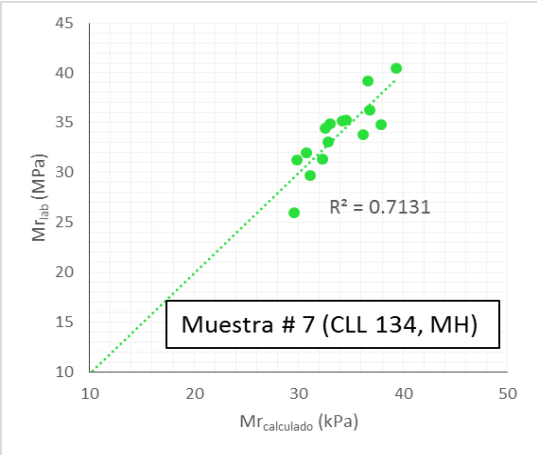
Exploración		k_1	k_2	k_3	R^2	USCS
S.J. Bavaria	**1**	0.295	0.007	-1.645	0.865	MH
S.J. Bavaria	**2**	0.334	0.15	-2.957	0.816	MH
S.J. Bavaria	**3**	0.444	0.193	-2.128	0.898	MH
S.J. Bavaria	**4**	0.604	0.15	-2.777	0.736	MH
S.J. Bavaria	**5**	0.485	-0.031	-2.87	0.895	MH
S.J. Bavaria	**6**	0.351	0.123	-1.367	0.753	MH
Cll 134 (1)	**7**	0.408	0.098	-1.493	0.713	MH
CLL 134 (2)	**8**	0.378	0.098	-2.128	0.641	MH
CLL 125 (1)	**9**	0.415	0.085	-2.514	0.782	MH
CLL 125 (2)	**10**	0.303	-0.01	-1.323	0.616	MH
Castellana	**11**	0.278	-0.031	-0.952	0.740	MH
ECI	**12**	0.661	-0.122	-2.065	0.688	CH
ECI	**13**	0.628	0.07	-2.195	0.680	CH
ECI	**14**	0.559	-0.249	-1.654	0.455	CH
ECI	**15**	0.533	-0.001	-1.559	0.521	CH
ECI	**16**	0.564	0.033	-2.004	0.741	CH
ECI	**17**	0.41	-0.38	-1.285	0.768	CH
ECI	**18**	0.577	0.124	-1.731	0.795	CH
ECI	**19**	0.616	0.125	-1.706	0.794	CH
ECI	**20**	0.512	-0.13	-1.476	0.572	CH
ECI	**21**	0.577	0.044	-1.436	0.729	CH

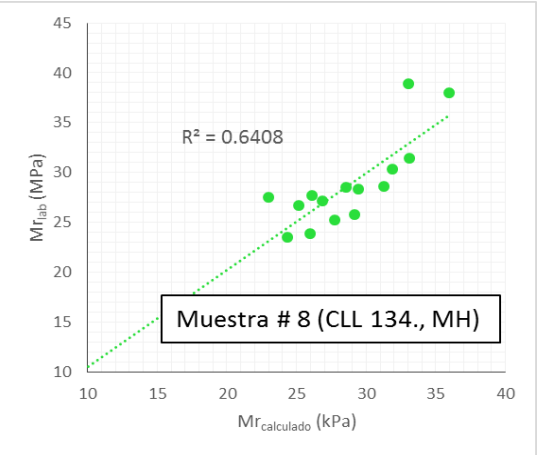
Fuente: Elaboración propia.

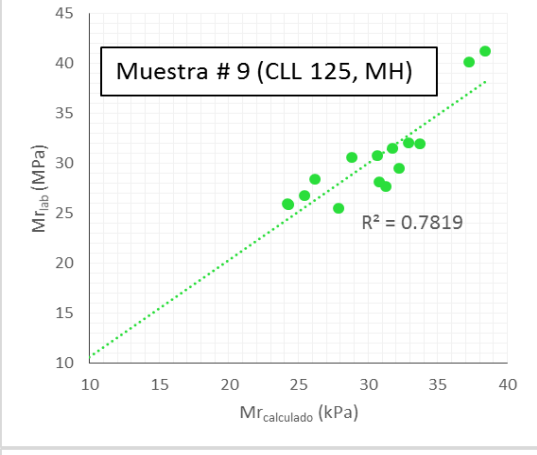
De acuerdo con la literatura, el valor de k_1 es positivo, el valor de k_2 también debería ser positivo ya que al aumentar el esfuerzo de confinamiento se incrementa el módulo resiliente y el valor de k_3 negativo por la relación inversamente proporcional entre el módulo y el cortante octaédrico (Bojacá Torres, 2019). Al revisar los valores presentados en la Tabla 5-6 se observa que la constante k_2 arrojó valores negativos en algunas muestras, sin embargo, resultaron en valores muy cercanos a 0 (excepto las muestras 14 y 17).

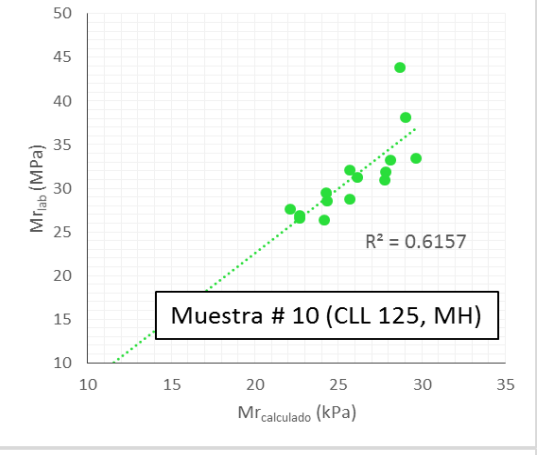
En las gráficas de la Figura 5-19 se puede observar que el coeficiente de ajuste (R^2) para la comparación de los Mr varía entre 0.46 y 0.89. Sin embargo, 16 de las muestras obtuvieron buenas correlaciones (R^2>0.60).

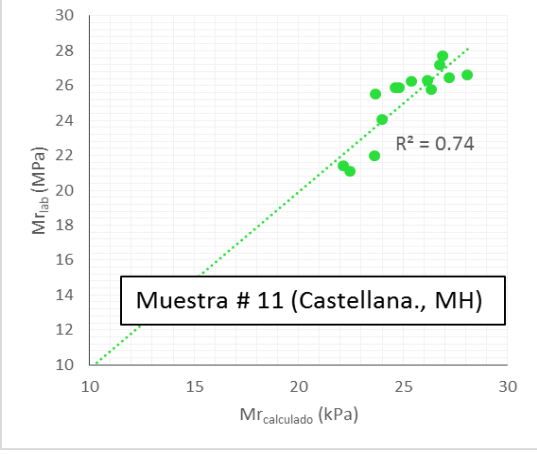

Muestra # 1 (S.J.B., MH)
R² = 0.8646
Muestra # 2 (S.J.B., MH)
R² = 0.8158
Muestra # 3 (S.J.B., MH)
R² = 0.8982
Muestra # 4 (S.J.B., MH)
R² = 0.7363
Muestra # 5 (S.J.B., MH)
R² = 0.919
Muestra # 6 (S.J.B., MH)
R² = 0.7528
Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)

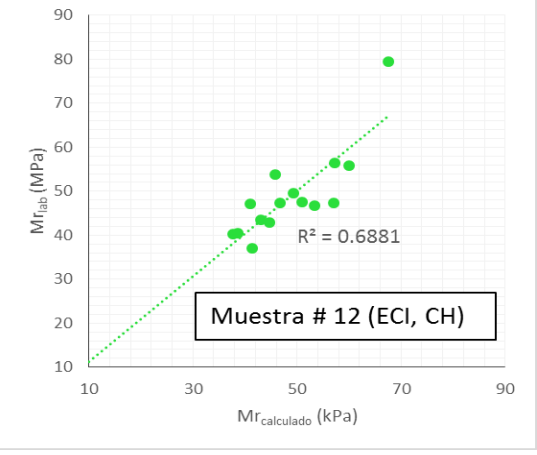

Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.7131
Muestra # 7 (CLL 134, MH)

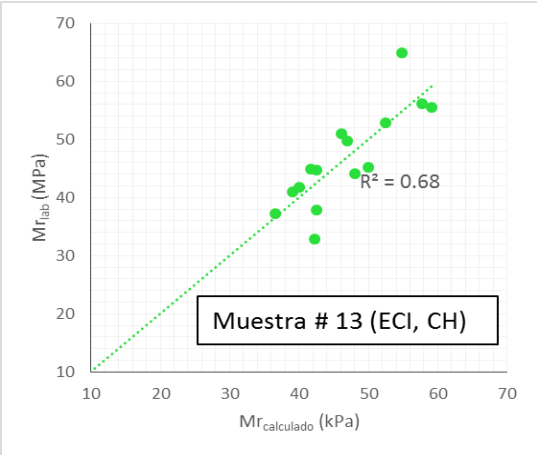

Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.6408
Muestra # 8 (CLL 134., MH)

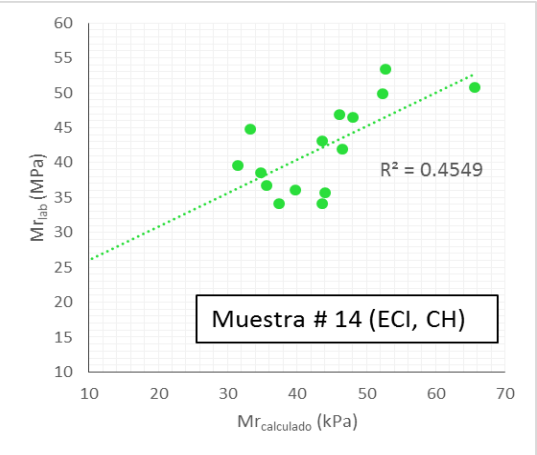

Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
Muestra # 9 (CLL 125, MH)
R² = 0.7819

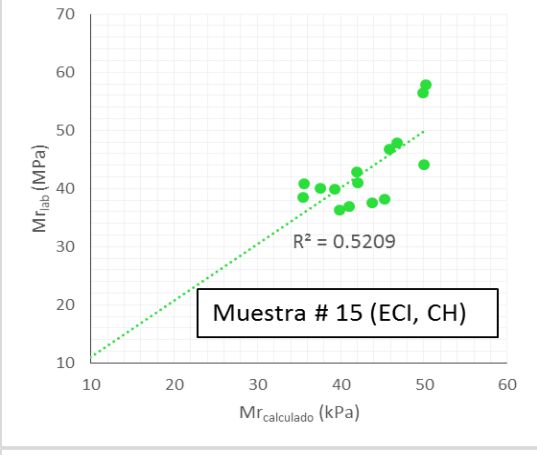

Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.6157
Muestra # 10 (CLL 125, MH)

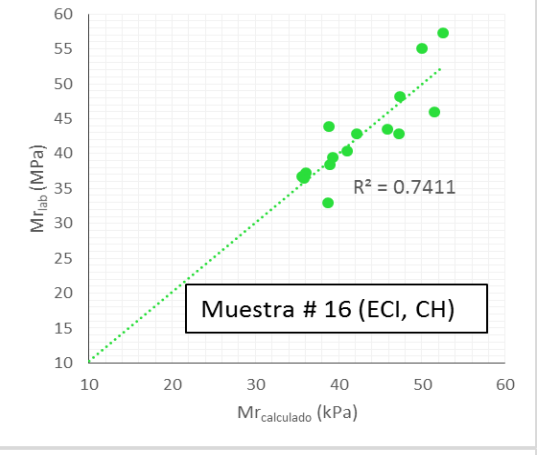

Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.74
Muestra # 11 (Castellana., MH)

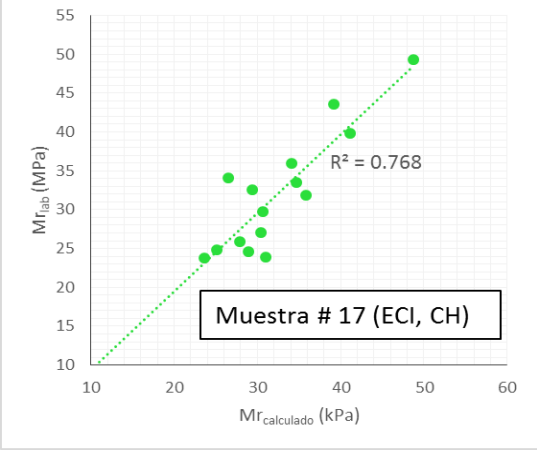

Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.6881
Muestra # 12 (ECI, CH)

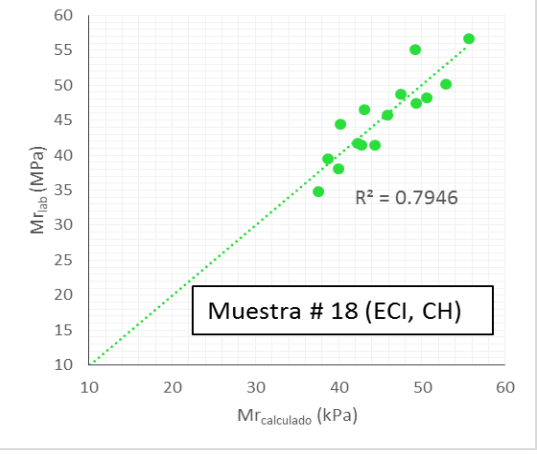

Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.68
Muestra # 13 (ECI, CH)


Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.4549
Muestra # 14 (ECI, CH)


Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.5209
Muestra # 15 (ECI, CH)


Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.7411
Muestra # 16 (ECI, CH)


Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.768
Muestra # 17 (ECI, CH)


Mr_lab (MPa)
Mr_calculado (kPa)
R² = 0.7946
Muestra # 18 (ECI, CH)

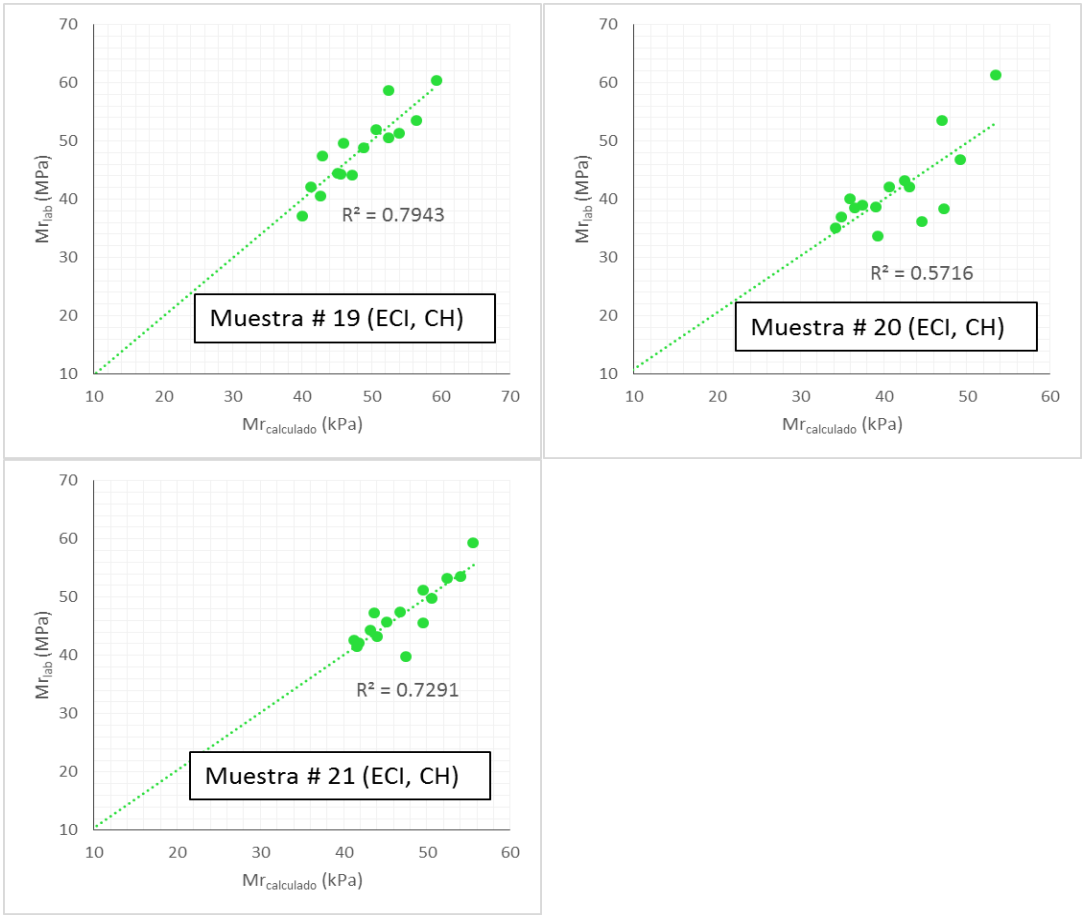


Figura 5-19: Comparación Mr obtenido en laboratorio Vs. Mr calculado por el modelo universal

Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se realizó para el modelo k-σ_d, con el modelo universal se buscó determinar una ecuación única aplicable a los suelos de subrasante de la zona lacustre de la ciudad de Bogotá, para ello se analizaron 3 grupos: Todas las muestras, muestras MH y muestras CH. En la Figura 5-20 se presenta la nube de puntos y su respectiva línea de tendencia.

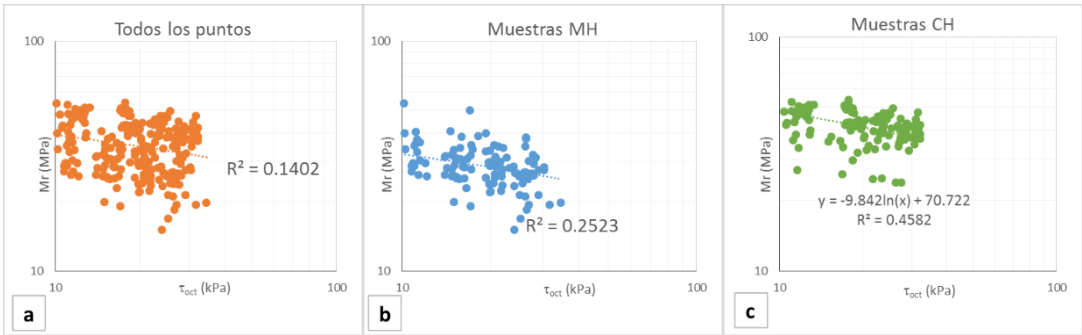


Figura 5-20: Resultados Mr Vs τ_{oct}. (a) todos los puntos, (b) muestras MH y (c) muestras CH.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las gráficas presentadas se puede observar que al analizar los tres grupos de muestras se obtienen coeficientes de correlación (R^2) muy bajos, Por tal motivo no es posible determinar una ecuación constitutiva única para estos suelos lacustres en función únicamente del cortante octaédrico.

5.4.2. Determinación del módulo resiliente (Mr) para un estado de esfuerzos.

El Mr es una medida que sirve para representar el comportamiento resiliente de los suelos bajo los diferentes estados de esfuerzos, sin embargo, las metodologías de diseño tradicionales que trabajan asumiendo la linealidad del módulo, requieren un único valor de este, así como las correlaciones con otros valores de resistencia. Por tal motivo es necesario establecer un estado de esfuerzos que asemeje de la mejor manera las solicitaciones a las que está expuesto el suelo de subrasante al tener tráfico sobre la estructura de pavimento (Bojacá Torres, 2019; Garnica, P. Pérez, N. Gómez, 2001; Moossazadeh & Witczak, 1981).

La literatura recomienda emplear el módulo resiliente para las capas de subrasante a un esfuerzo de confinamiento de 14 kPa y un esfuerzo desviador de 41.3 kPa para pavimentos flexibles (The Asphalt Institute, 1989). Del mismo modo, Mohammad et al., (2007) propuso el mismo nivel de esfuerzos en sus análisis. Teniendo en cuenta lo anterior, se empleó para la presente investigación un esfuerzo desviador de 41.3 kPa y un esfuerzo de confinamiento de 14 kPa para la determinación de un único valor de Mr.

5.4.2.1 *Confiabilidad en el cálculo del Mr.*

Teniendo en cuenta el grado de incertidumbre existente en el cálculo del Mr puesto que los modelos constitutivos son determinados a partir de herramientas de regresión, es recomendable determinar el Mr a un grado de confiabilidad establecido.

Siguiendo lo establecido por Wonnacott & Wonnacott (1993) es necesario establecer los intervalos de predicción, para su conformación se emplea la Ecuación 5-7.

$$y_i(\pm) = m * x_i + p \pm z * s * \sqrt{\frac{(x_i - \overline{x})^2}{\sum(x_i - \overline{x})^2} + \frac{1}{n} + 1}$$

Ecuación 5-7

Donde,

m: Pendiente de la regresión.

Xi: Nivel de esfuerzo $_{(i)}$.

p: Intercepto con el eje Y.

n: Total de datos (21 muestras analizadas).

z: Nivel de confianza (se asume para esta investigación un 95% de confiabilidad, por lo tanto z=1.645).

$\overline{x}$: Promedio de los valores del nivel de esfuerzo.

S: constante calculada a partir de la Ecuación 5-8.

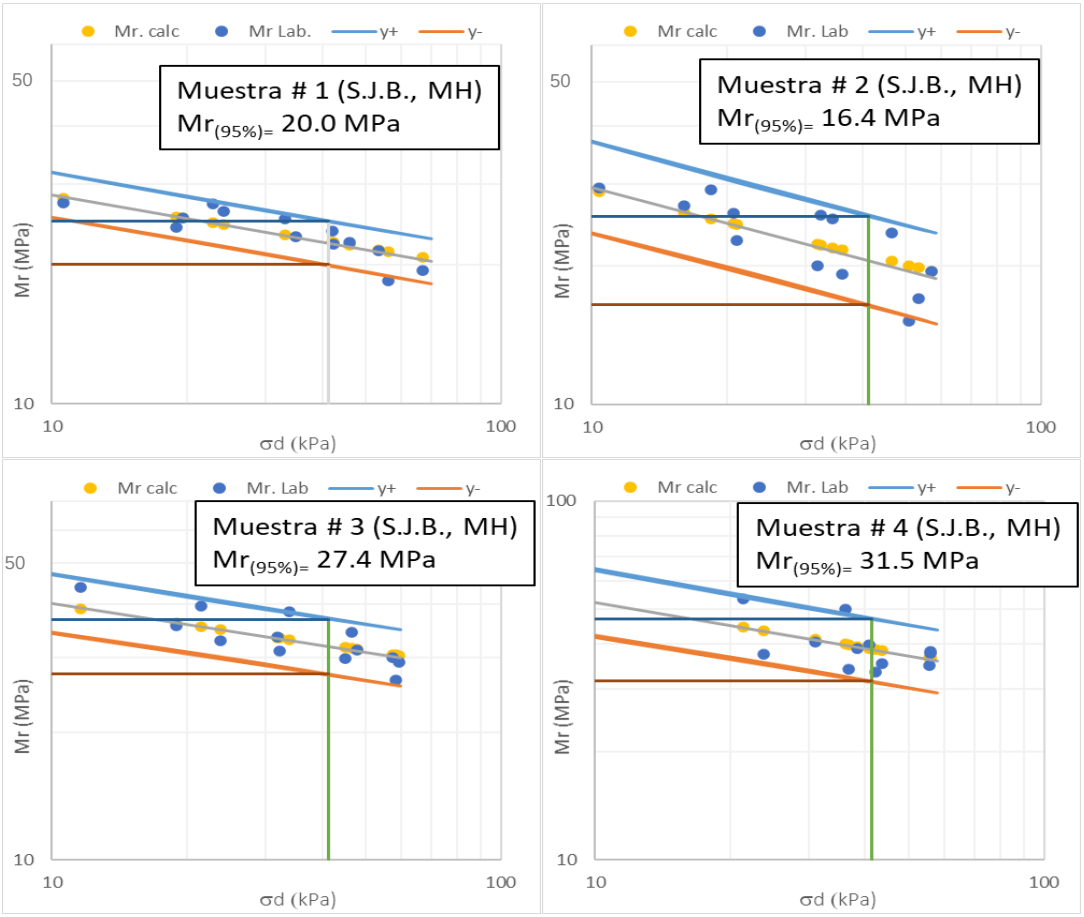
$$s = \sqrt{\frac{\sum\left(y_i - (m * x_i + p)\right)^2}{n - 2}}$$

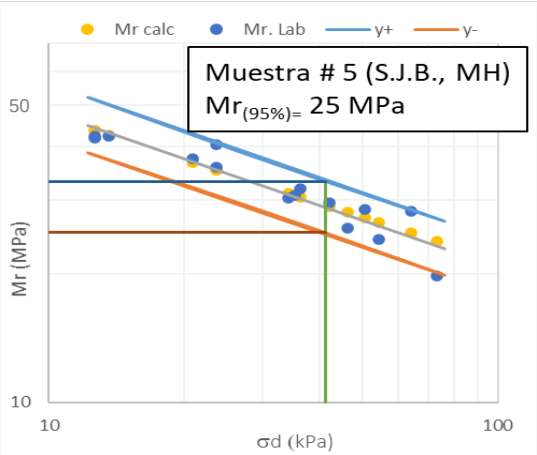
Ecuación 5-8

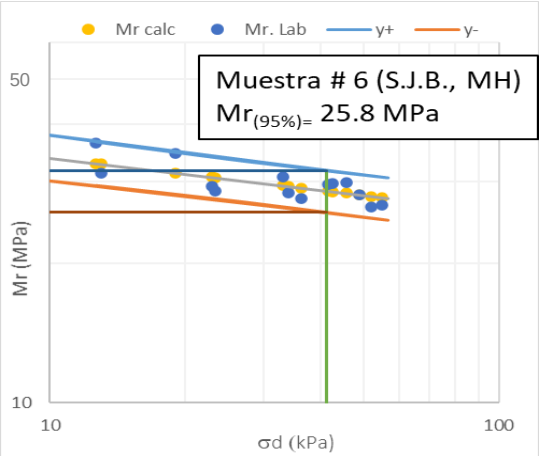
5.4.2.1.1 Confiabilidad Modelo k-σ_d

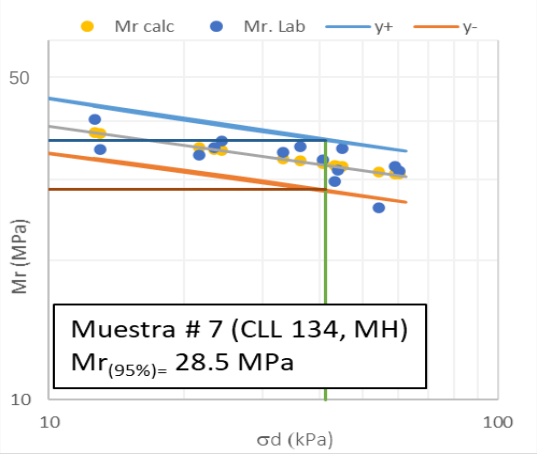
A partir de la Ecuación 5-7 y la Ecuación 5-8 se presentan los intervalos de predicción para un 95% de confianza y los valores de Mr calculado y de laboratorio empleando el modelo k-σ_d.

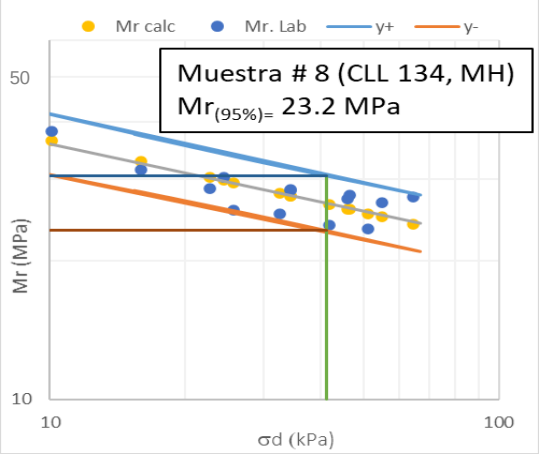
En las gráficas de la Figura 5-21 se presentan los resultados obtenidos para cada una de las 21 muestras ensayadas.

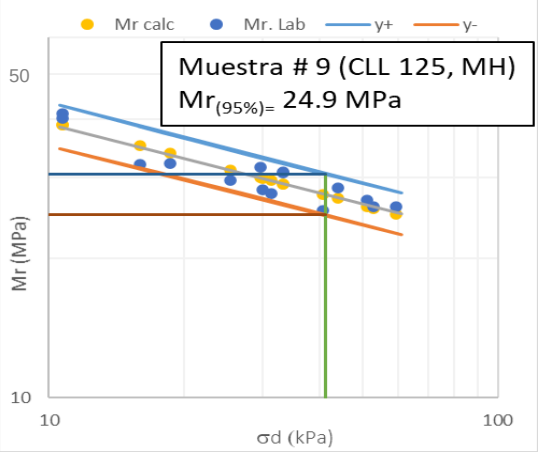


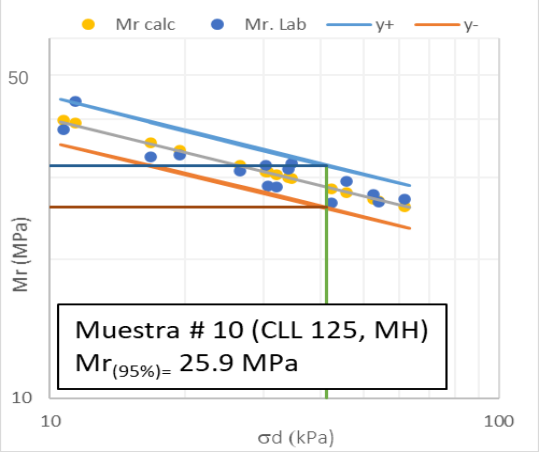

Mr calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 5 (S.J.B., MH)
Mr(95%)= 25 MPa
Mr (MPa)
50
10
10
100
σd (kPa)

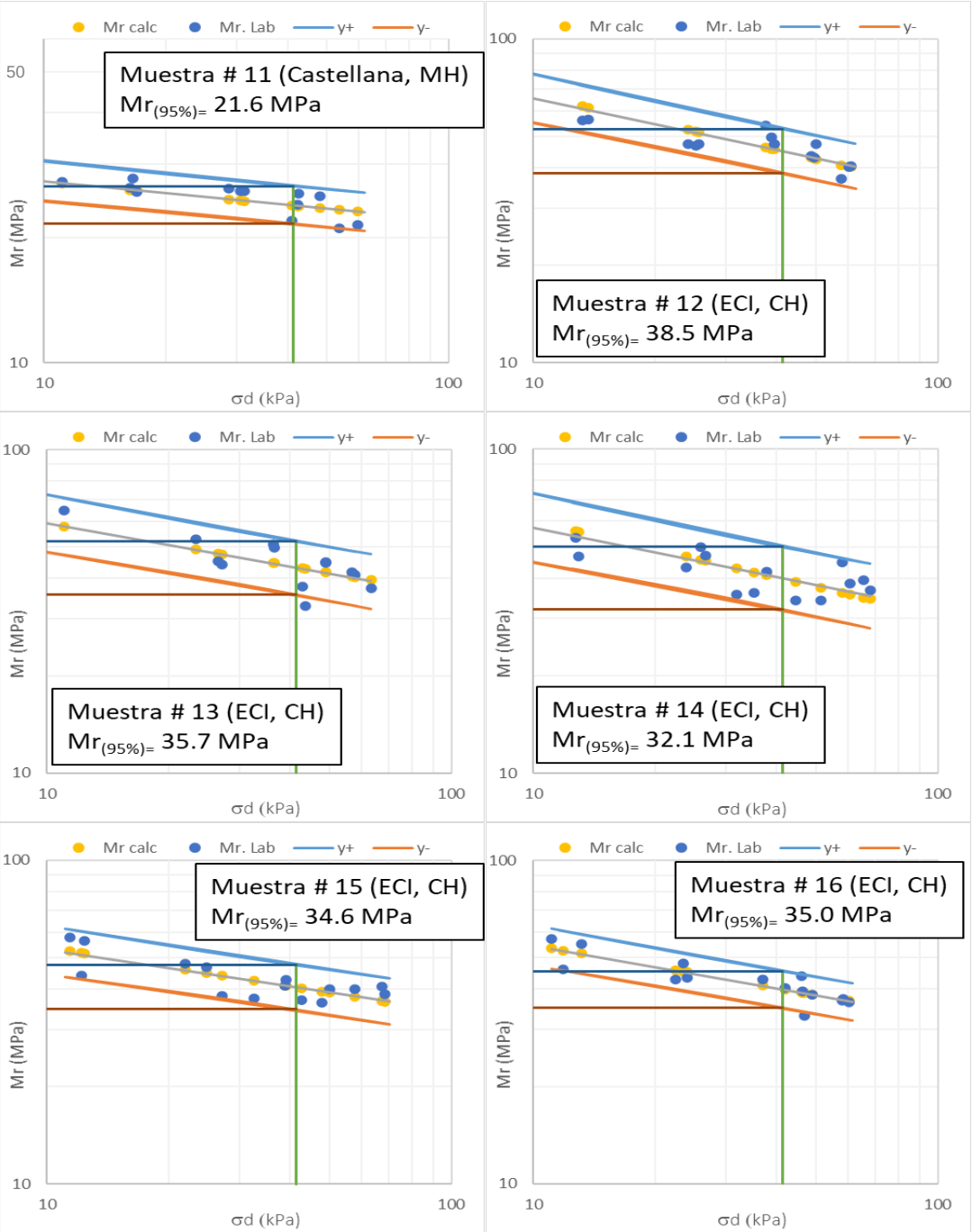

Mr calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 6 (S.J.B., MH)
Mr(95%)= 25.8 MPa
Mr (MPa)
50
10
10
100
σd (kPa)


Mr calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 7 (CLL 134, MH)
Mr(95%)= 28.5 MPa
Mr (MPa)
50
10
10
100
σd (kPa)


Mr calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 8 (CLL 134, MH)
Mr(95%)= 23.2 MPa
Mr (MPa)
50
10
10
100
σd (kPa)


Mr calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 9 (CLL 125, MH)
Mr(95%)= 24.9 MPa
Mr (MPa)
50
10
10
100
σd (kPa)


Mr calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 10 (CLL 125, MH)
Mr(95%)= 25.9 MPa
Mr (MPa)
50
10
10
100
σd (kPa)


Mr calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 11 (Castellana, MH)
Mr(95%)= 21.6 MPa
Muestra # 12 (ECI, CH)
Mr(95%)= 38.5 MPa
Muestra # 13 (ECI, CH)
Mr(95%)= 35.7 MPa
Muestra # 14 (ECI, CH)
Mr(95%)= 32.1 MPa
Muestra # 15 (ECI, CH)
Mr(95%)= 34.6 MPa
Muestra # 16 (ECI, CH)
Mr(95%)= 35.0 MPa
Mr (MPa)
σd (kPa)
10
50
100

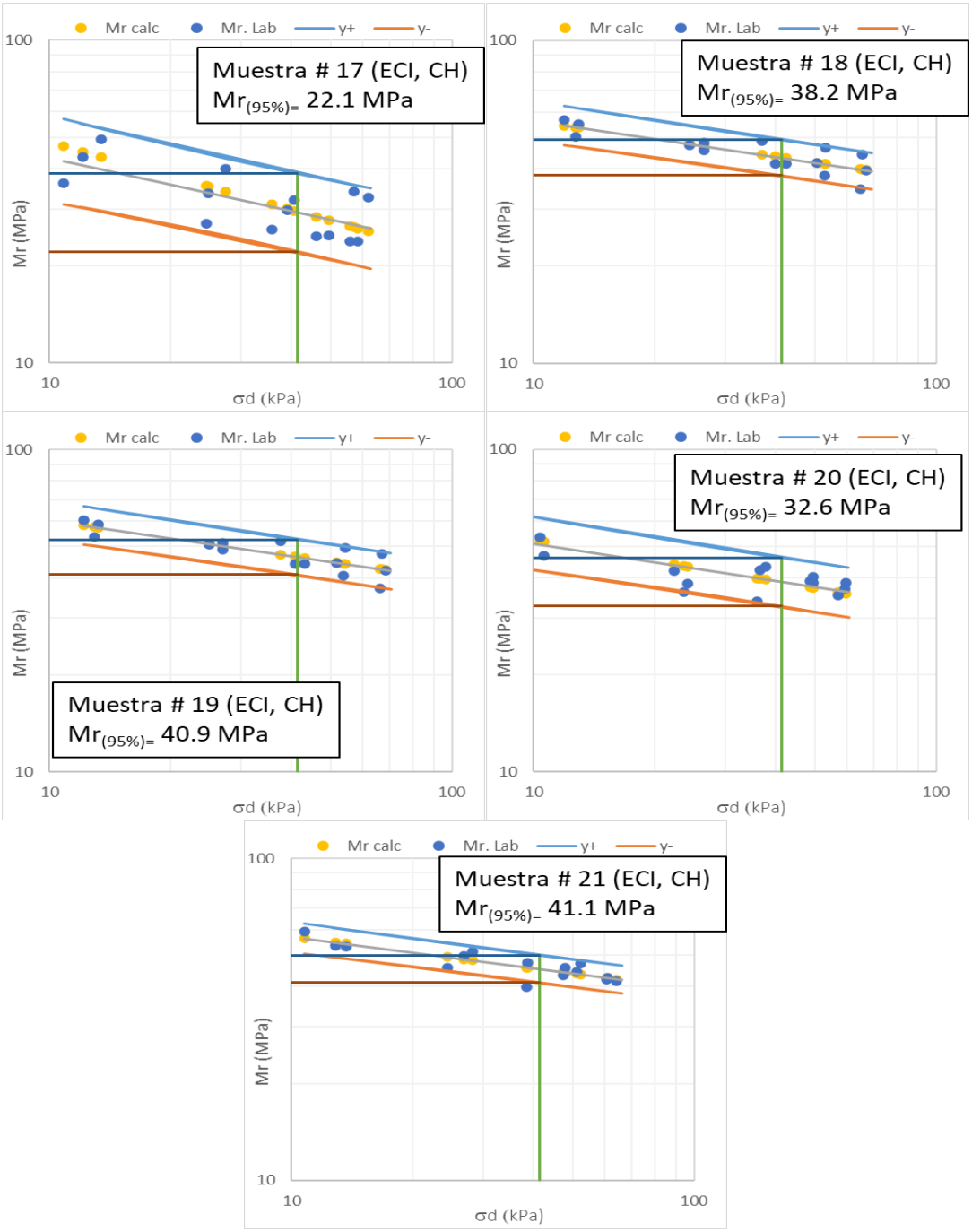


Figura 5-21: Determinación del Mr al 95% de confiabilidad mediante el modelo k-σ_d

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.1.1 Confiabilidad Modelo Universal

Teniendo en cuenta que el modelo universal es dependiente de dos variables para el cálculo del Mr y que la metodología de intervalos de predicción solo es aplicable para una variable dependiente, es necesario realizar algunas simplificaciones para convertir el modelo universal a un modelo dependiente únicamente de un esfuerzo.

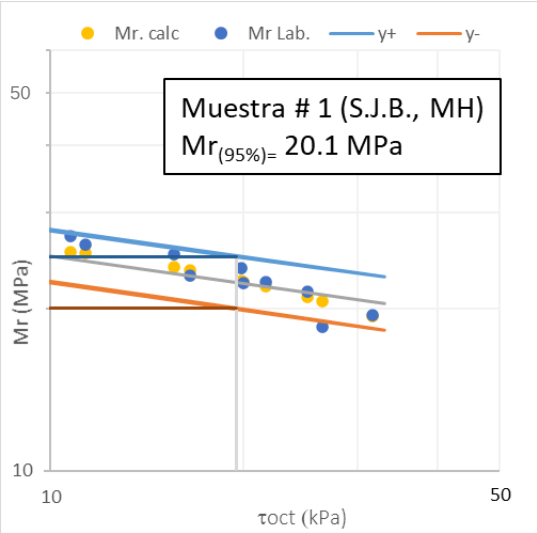
Como se mostró anteriormente, existe una buena dependencia del módulo resiliente con el cortante octaédrico, por tal motivo, se decide fijar el valor del esfuerzo de confinamiento (σ_3) a 14 kPa tal y como se presentó anteriormente.

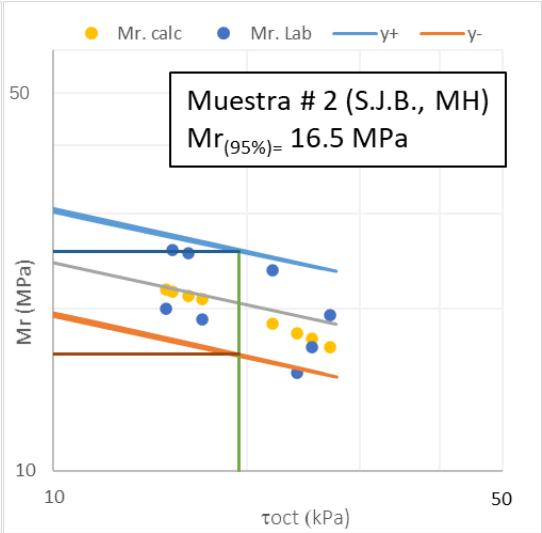
$$\theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3 = \sigma_d + 42$$

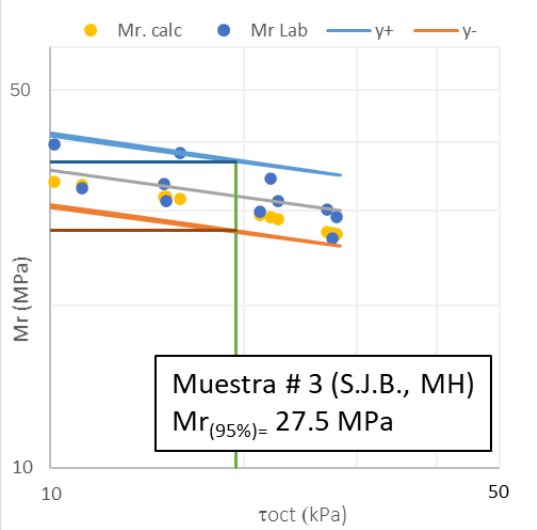
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d$$

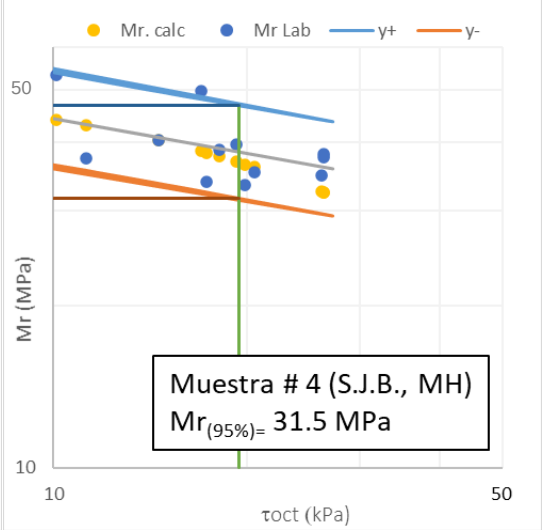
A partir de la Ecuación 5-7 y la Ecuación 5-8 se presentan los intervalos de predicción para un 95% de confianza y los valores de Mr calculado y de laboratorio empleando el modelo universal.

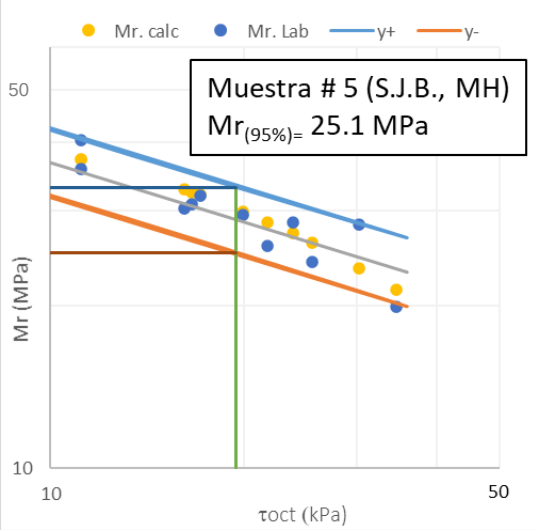
En las gráficas de la Figura 5-22 se presentan los resultados obtenidos para cada una de las 21 muestras ensayadas.

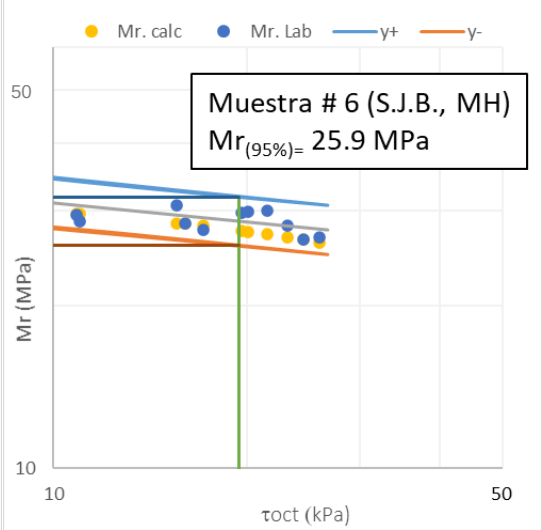

Mr. calc
Mr Lab.
y+
y-
Muestra # 1 (S.J.B., MH)
Mr(95%)= 20.1 MPa
50
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)

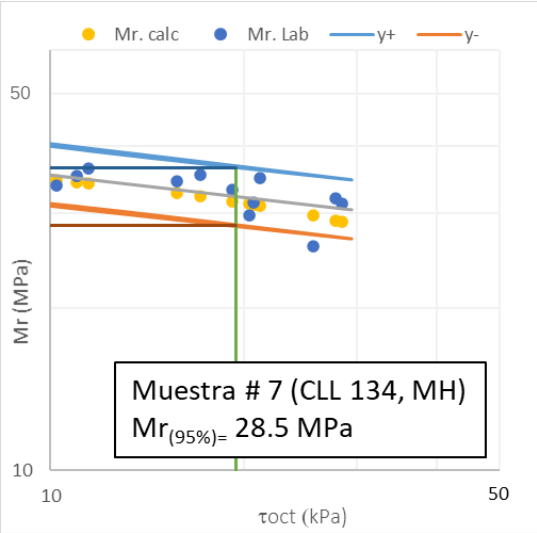

Mr. calc
Mr Lab
y+
y-
Muestra # 2 (S.J.B., MH)
Mr(95%)= 16.5 MPa
50
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)

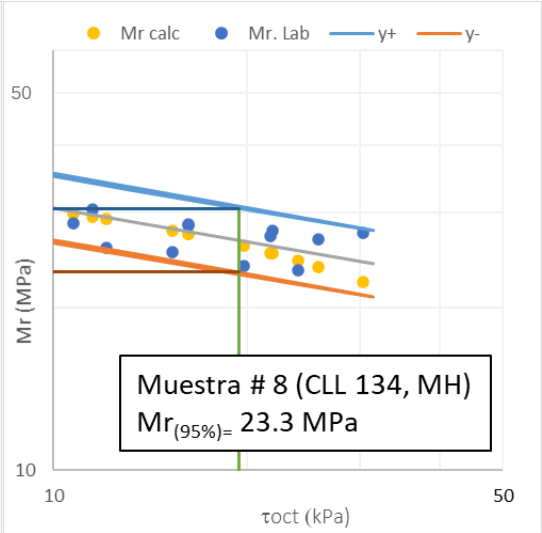

Mr. calc
Mr Lab
y+
y-
Muestra # 3 (S.J.B., MH)
Mr(95%)= 27.5 MPa
50
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)

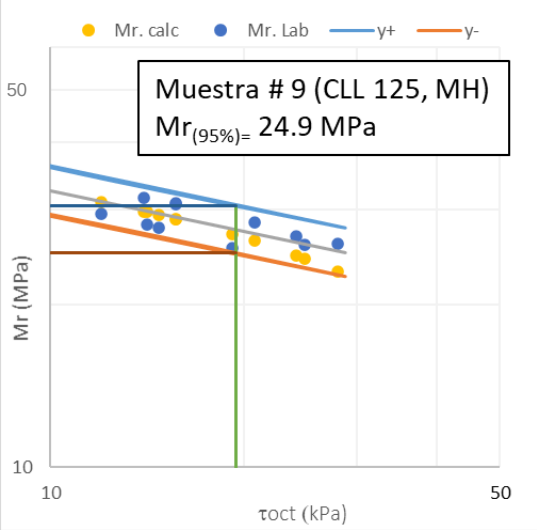

Mr. calc
Mr Lab
y+
y-
Muestra # 4 (S.J.B., MH)
Mr(95%)= 31.5 MPa
50
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)

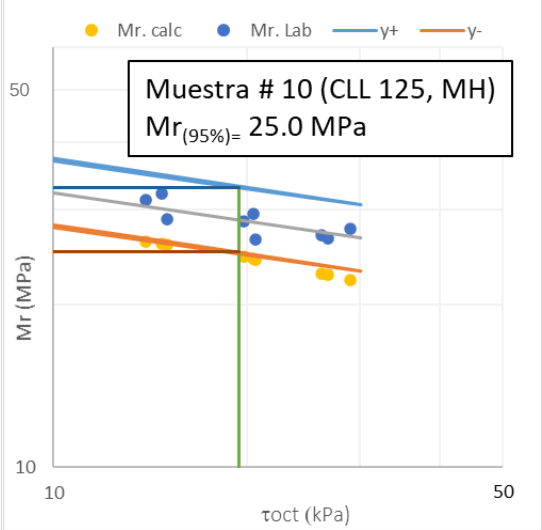

Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 5 (S.J.B., MH)
Mr(95%)= 25.1 MPa
50
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)

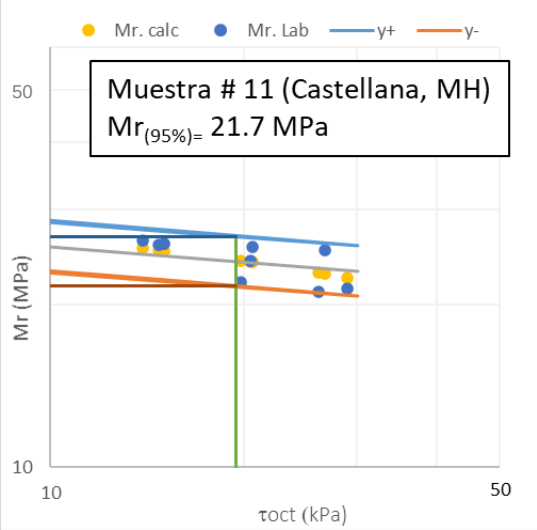

Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 6 (S.J.B., MH)
Mr(95%)= 25.9 MPa
50
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)

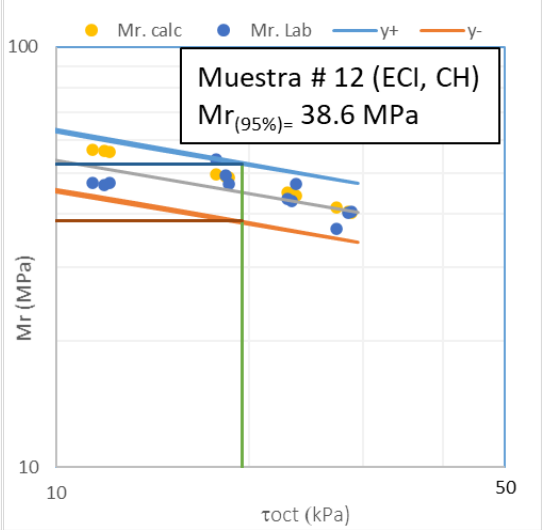

Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
50
Mr (MPa)
10
Muestra # 7 (CLL 134, MH)
Mr(95%)= 28.5 MPa
10
50
τoct (kPa)

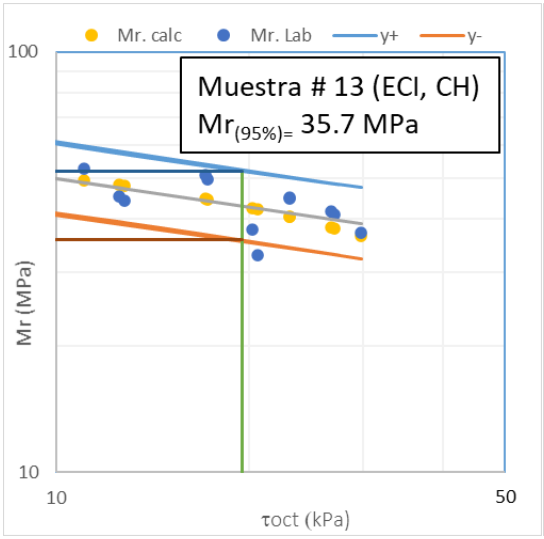

Mr calc
Mr. Lab
y+
y-
50
Mr (MPa)
10
Muestra # 8 (CLL 134, MH)
Mr(95%)= 23.3 MPa
10
50
τoct (kPa)

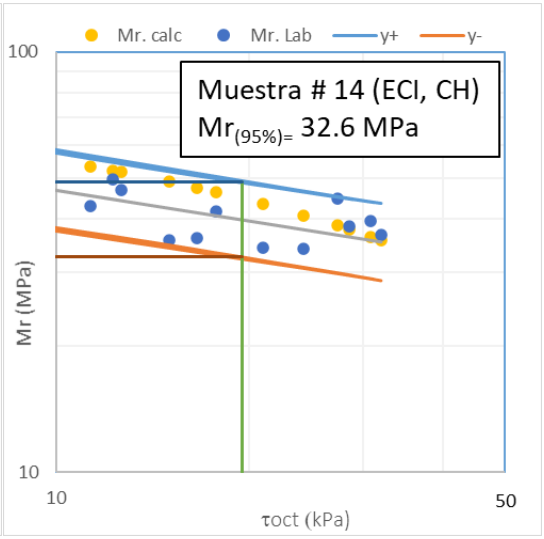

Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
50
Mr (MPa)
10
Muestra # 9 (CLL 125, MH)
Mr(95%)= 24.9 MPa
10
50
τoct (kPa)

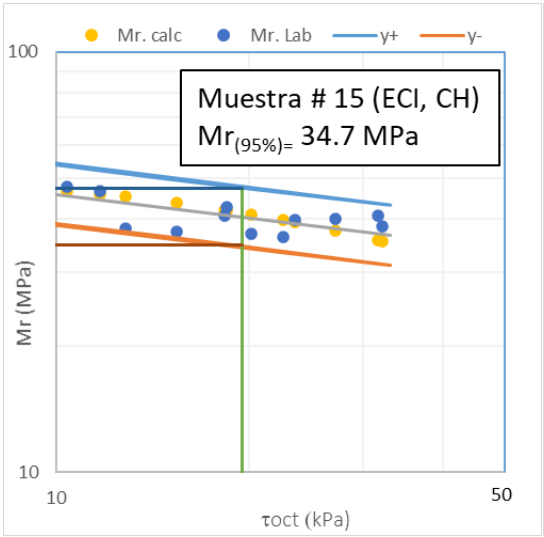

Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
50
Mr (MPa)
10
Muestra # 10 (CLL 125, MH)
Mr(95%)= 25.0 MPa
10
50
τoct (kPa)

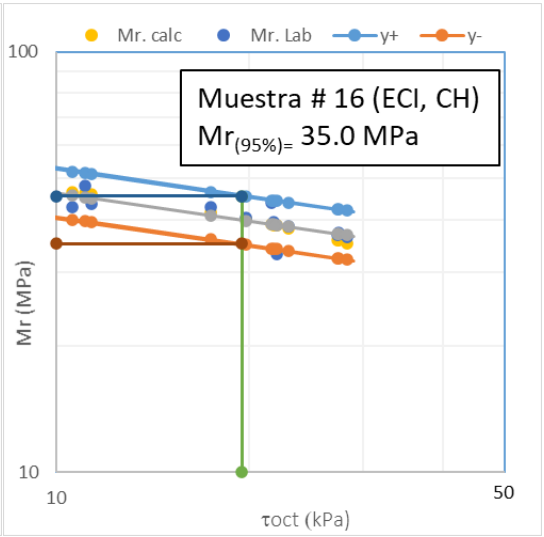

Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
50
Mr (MPa)
10
Muestra # 11 (Castellana, MH)
Mr(95%)= 21.7 MPa
10
50
τoct (kPa)

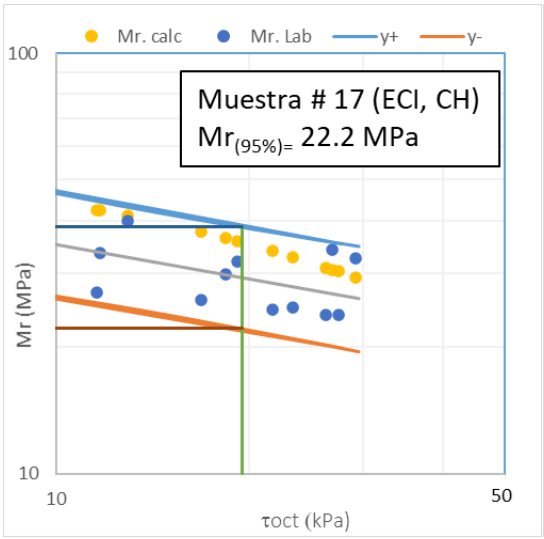

Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
100
Mr (MPa)
10
Muestra # 12 (ECI, CH)
Mr(95%)= 38.6 MPa
10
50
τoct (kPa)

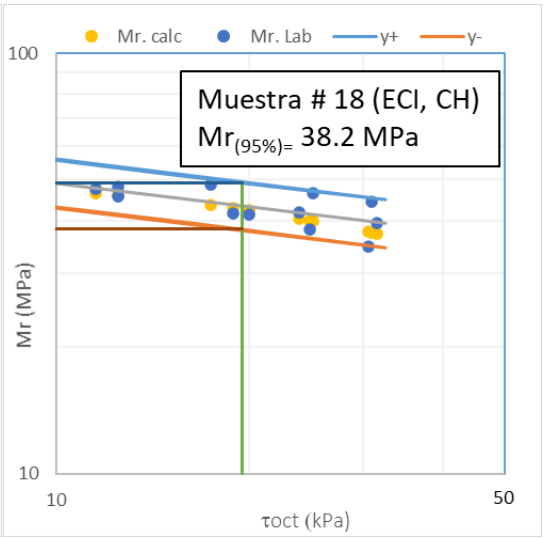

Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 13 (ECI, CH)
Mr(95%)= 35.7 MPa
100
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)


Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 14 (ECI, CH)
Mr(95%)= 32.6 MPa
100
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)


Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 15 (ECI, CH)
Mr(95%)= 34.7 MPa
100
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)


Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 16 (ECI, CH)
Mr(95%)= 35.0 MPa
100
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)


Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 17 (ECI, CH)
Mr(95%)= 22.2 MPa
100
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)


Mr. calc
Mr. Lab
y+
y-
Muestra # 18 (ECI, CH)
Mr(95%)= 38.2 MPa
100
10
Mr (MPa)
10
50
τoct (kPa)

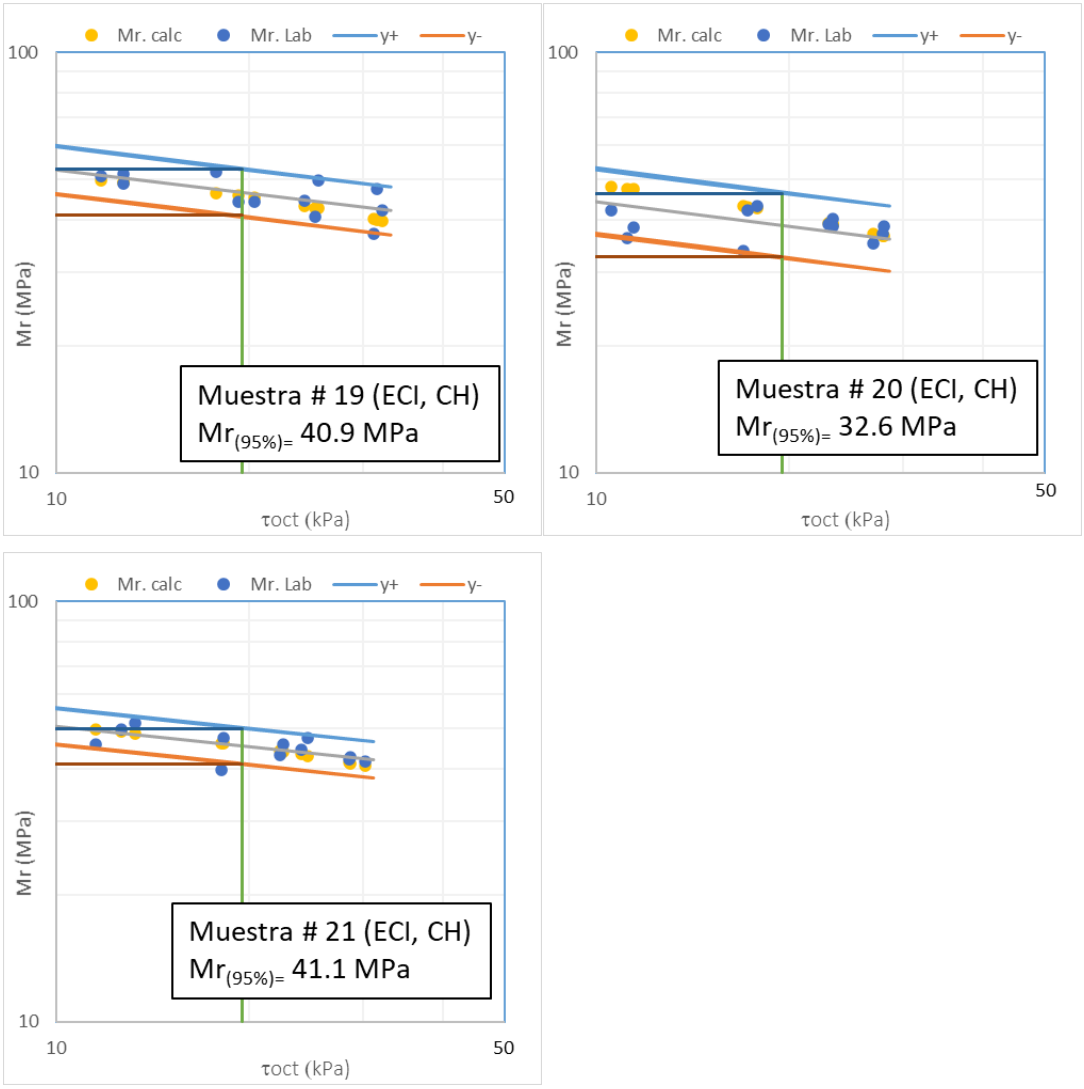


Figura 5-22: Determinación del Mr al 95% de confiabilidad mediante el modelo universal

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.1.1 Comparación Mr obtenido por el modelo universal y por el modelo k-σs.

En la Tabla 5-7 se presentan los valores de Mr obtenidos con el 95% de confiabilidad por cada uno de los dos modelos constitutivos evaluados en la presente investigación. Los resultados observados son similares y comprueban la influencia del esfuerzo desviador en el comportamiento resiliente de los suelos blandos.

Teniendo en cuenta que se tiene un valor máximo y un valor mínimo en los intervalos de confianza, se considera apropiado emplear el valor mínimo dada la heterogeneidad del suelo representada en la variabilidad de los resultados. Del mismo modo, empleando el valor mínimo se asegura un diseño que va a cumplir las solicitaciones futuras dentro del periodo de diseño estipulado.

Con base en lo anterior se puede decir que para los suelos blandos lacustres analizados ambos modelos son válidos teniendo en cuenta las consideraciones aquí mencionadas. Adicionalmente, es de vital importancia ser conscientes de las características propias de los suelos en donde se van a aplicar los diferentes modelos y ensayos, lo anterior teniendo en cuenta la gran variabilidad de los valores de Mr presentados en este informe aun cuando todas las muestras fueron extraídas en una zona homogénea que compartía gran cantidad de propiedades geotécnicas.

Tabla 5-7: Comparación Mr con 95% de confiabilidad para los dos modelos.

Exploración		SUCS	$Mr._{(95\%)}$ (MPa)	
			k-σ_d	Universal
S.J. Bavaria	**1**	MH	20	20.1
S.J. Bavaria	**2**	MH	16.4	16.5
S.J. Bavaria	**3**	MH	27.4	27.5
S.J. Bavaria	**4**	MH	31.5	31.5
S.J. Bavaria	**5**	MH	25	25.1
S.J. Bavaria	**6**	MH	25.8	25.9
Cll 134 (1)	**7**	MH	28.5	28.5
CLL 134 (2)	**8**	MH	23.2	23.3
CLL 125 (1)	**9**	MH	24.9	24.9
CLL 125 (2)	**10**	MH	25.9	25
Castellana	**11**	MH	21.6	21.7
ECI	**12**	CH	38.5	38.6
ECI	**13**	CH	35.7	35.7
ECI	**14**	CH	32.1	32.6
ECI	**15**	CH	34.6	34.7
ECI	**16**	CH	35	35
ECI	**17**	CH	22.1	22.2
ECI	**18**	CH	38.2	38.2
ECI	**19**	CH	40.9	40.9
ECI	**20**	CH	32.6	32.6
ECI	**21**	CH	41.1	41.1

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3. Relación entre el Mr con las propiedades físicas.

El módulo resiliente en los suelos no es un valor constante ya que depende de varios factores tales como el estado de esfuerzos y el tipo de suelo. Las propiedades físicas tales como la humedad, peso unitario, límite líquido e índice de plasticidad tienen una gran influencia sobre el valor del módulo resiliente en suelos finos. Sin embargo, no es recomendable generar una correlación con un solo parámetro físico ya que como se ha mencionado anteriormente el comportamiento resiliente está afectado por todas las propiedades del suelo y el estado de esfuerzos (Dai & Zollars, 2002; Garnica, P. Pérez, N. Gómez, 2001; George, 2004; Zhou et al., 2015)

A continuación, se presentan las gráficas y los análisis de los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros físicos y el ensayo de Mr para ambos modelos constitutivos.

5.4.3.1 *Humedad natural vs Mr.*

En la Figura 5-23 se presentan los resultados obtenidos para la correlación entre el módulo resiliente y la humedad natural.

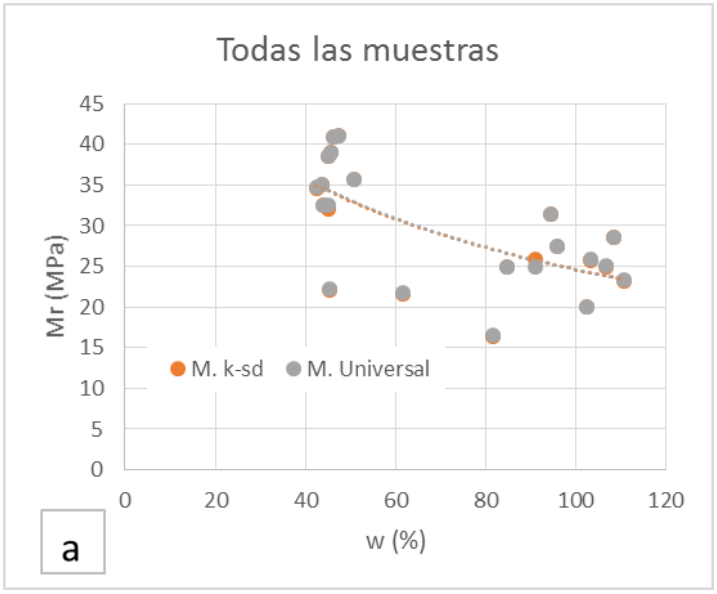


Figura 5-23: Correlaciones Mr (ambos modelos) y la humedad natural. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el módulo resiliente aumenta a medida que el contenido de humedad en el suelo disminuye tal y como lo presenta George, (2004).

5.4.3.1 *Limite líquido vs Mr.*

En la Figura 5-24 se presentan los resultados obtenidos para la correlación entre el módulo resiliente y el límite líquido.

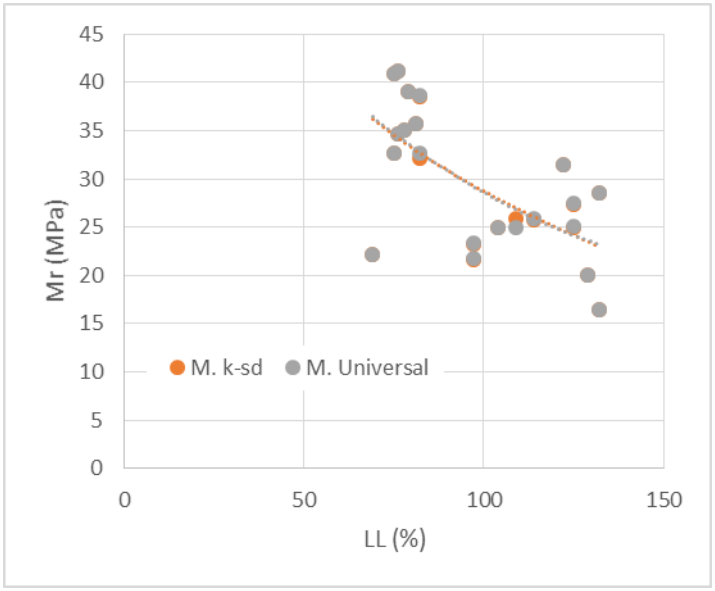


Figura 5-24: Correlaciones Mr (ambos modelos) y el límite líquido.

Fuente: Elaboración propia.

Un aumento en el límite líquido produce una disminución en el módulo resiliente calculado (Cabrera, 2012; Khasawneh & Al-jamal, 2019), este comportamiento es concordante con los resultados obtenidos en esta investigación.

5.4.3.1 *Índice de Plasticidad vs Mr.*

En la Figura 5-25 se presenta los resultados obtenidos para la correlación entre el módulo resiliente y el índice de plasticidad.

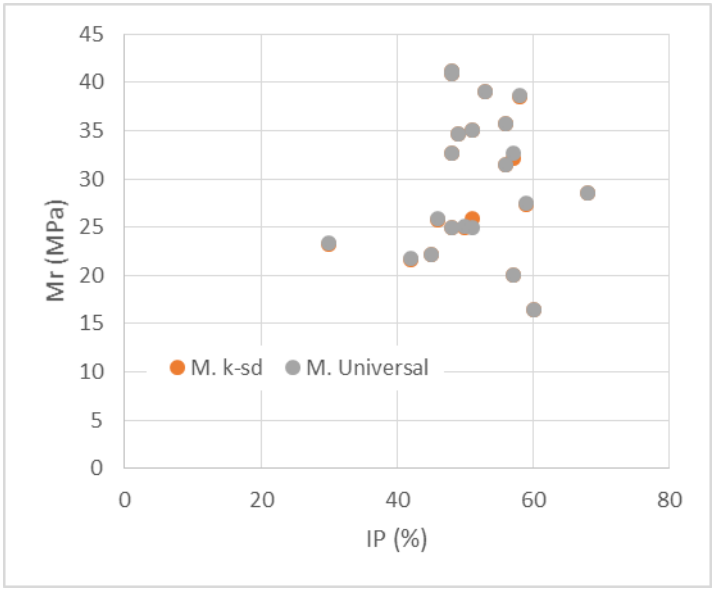


Figura 5-25: Correlaciones Mr (ambos modelos) y el índice de plasticidad. (a) Todas las muestras, (b) Lote San José de Bavaria, (c) Muestras MH y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

Índices de plasticidad bajos producen una disminución en el módulo resiliente obtenido (Cabrera, 2012; Khasawneh & Al-jamal, 2019). Sin embargo, para las muestras ensayadas en esta investigación, esa relación no es clara.

5.4.3.1 *Peso unitario vs Mr.*

En la Figura 5-26 se presentan los resultados obtenidos para la correlación entre el módulo resiliente y el peso unitario.

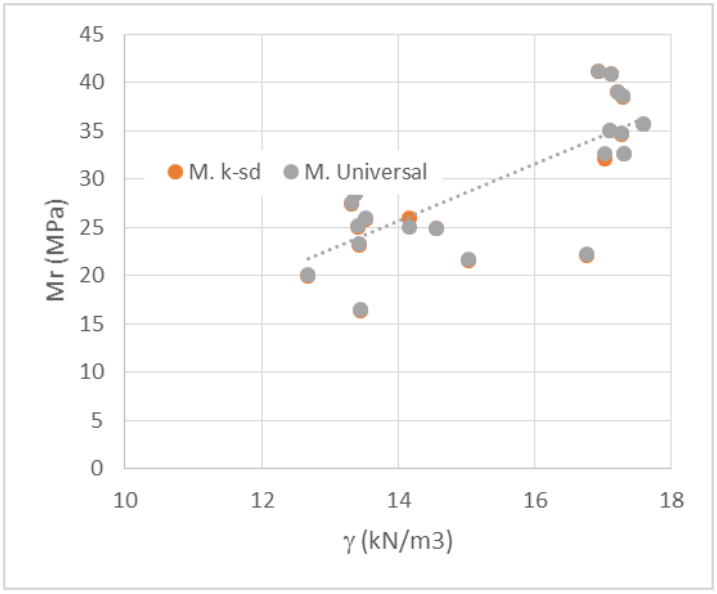


Figura 5-26: Correlaciones Mr (ambos modelos) y el peso unitario.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que hay una relación directamente proporcional entre el peso unitario de las muestras ensayadas y el Mr, lo cual es acorde con lo presentado en la literatura (George, 2004).

5.4.4. Relación del Mr con el CBR y el ND.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al comparar los resultados del Mr para ambos métodos y los resultados del CBR y el PDC.

5.4.4.1 *Mr vs CBR*

En la Figura 5-27 se presenta los resultados obtenidos para la correlación entre el módulo resiliente y el CBR para todos los grupos analizados.

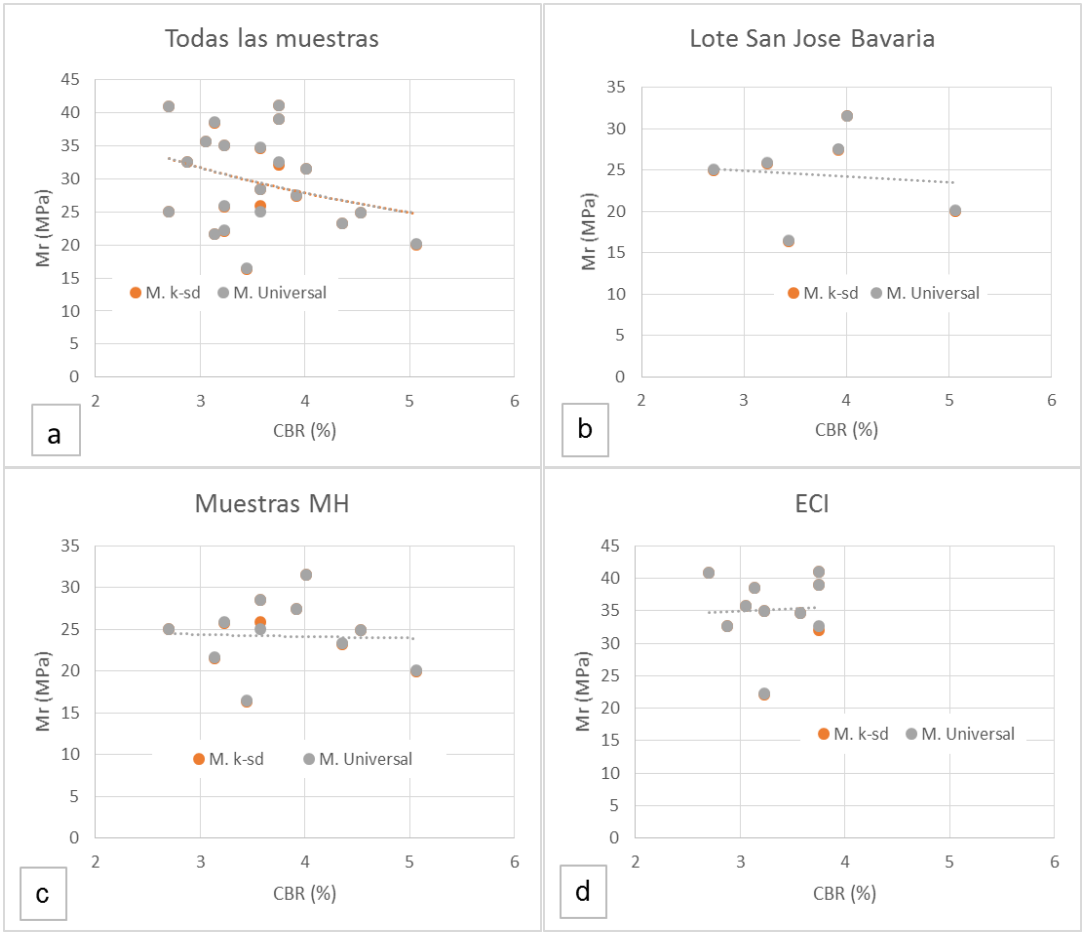


Figura 5-27: Correlaciones Mr (ambos modelos) y el CBR.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que no fue posible determinar alguna correlación entre los valores del CBR y el Mr.

5.4.4.1 *Mr vs ND*

En la Figura 5-28 se presenta los resultados obtenidos para la correlación entre el módulo resiliente y el ND para todos los grupos analizados.

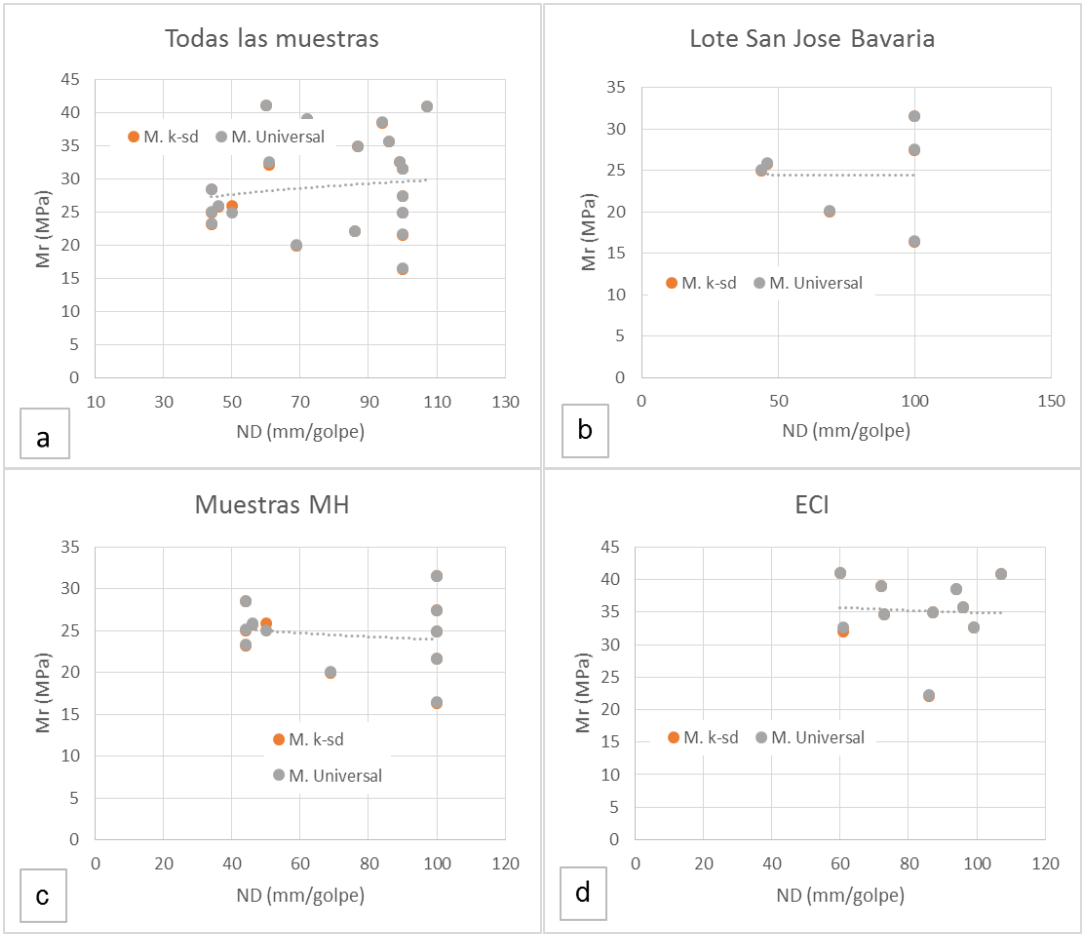


Figura 5-28: Correlaciones Mr (ambos modelos) y el ND.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que no fue posible determinar alguna correlación entre los valores del ND y el Mr.

5.5 Análisis estadístico de los ensayos de resistencia y rigidez con las propiedades físicas.

Teniendo en cuenta que no se encontraron correlaciones entre cada uno de los parámetros físicos y los parámetros de resistencia y rigidez, se decidió realizar un análisis dimensional para determinar la significancia que tiene cada una de las variables en el resultado del CBR y el Mr de la muestra.

Para este análisis se tomaron como variables dependientes el valor de CBR y el valor del límite inferior del Mr con una confiabilidad del 95% (menor valor obtenido en los análisis) y como variables dependientes la humedad, límite líquido, límite plástico, peso unitario, índice de plasticidad y relación de vacíos. Inicialmente se analizaron las variables por separado para ver la influencia que tiene cada una de ellas en el resultado del CBR y el Mr, posteriormente se estableció un modelo en el que se incluyen las que tienen una mayor incidencia para obtener el mejor coeficiente de correlación (R^2).

Para evaluar la influencia de las variables se realiza un análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) el cual tiene como hipótesis nula que todas las medias de las variables son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que por lo menos una de ellas es diferente.

Para establecer si la diferencia entre las medias de las variables es estadísticamente significativa, se compara el valor p calculado con el nivel de significancia (α) establecido para evaluar la hipótesis nula. Para la presente investigación se emplea un nivel de significancia igual a 0.05 el cual es un valor típico que indica un riesgo del 5% de que se concluya que existe una diferencia significativa cuando en realidad no la hay.

Si el valor p es menor o igual a α se rechaza la hipótesis nula y se concluye que no todas las medias de las variables son iguales. Por lo contrario, si p es mayor a α quiere decir que no se cuenta con suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula.

Se evaluaron dos grupos de estudio: el primero con todas las muestras de la presente investigación y el segundo con las muestras extraídas en la ECI. Sin embargo, dada la poca cantidad de muestras (10) se recurrió a emplear las muestras utilizadas en el trabajo de investigación de Bojacá Torres (2019) el cual fue desarrollado de manera simultánea con este.

En la Figura 5-29 y la Tabla 5-8 se presentan la localización y resultados para las muestras de la ECI empleadas en la investigación de Bojacá Torres (2019) y en la presente.

El presente análisis se realizó en el software estadístico SPSS de IBM corporation.

Figura 5-29: Localización muestras analizadas en la ECI
Fuente: Elaboración propia complementada con los datos de Bojacá Torres (2019)

Tabla 5-8: Resultados ensayos de resistencia, rigidez y caracterización física muestras de la ECI.

Identificador Muestra (documento original)	Numeración muestra	w	γ unitario	Límite líquido	Límite Plástico	Relación de vacíos	Índice plasticidad	$CBR_{0.1"}$	$Mr_{95\%}$
		(%)	kN/m3	%	%		%	%	MPa
12 R.H.	**1**	45.1	17.28	82	24	1.23	58	3.14	38.5
13 R.H.	**2**	50.8	17.59	81	25	1.27	56	3.05	35.7
14 R.H.	**3**	45.2	17.03	82	24	1.24	57	3.75	32.1
15 R.H.	**4**	42.5	17.27	76	27	1.14	49	3.57	34.6
16 R.H.	**5**	43.8	17.1	78	27	1.26	51	3.23	35
17 R.H.	**6**	45.5	16.76	69	24	1.24	45	3.23	22.1
18 R.H.	**7**	45.6	17.21	79	27	1.24	53	3.75	39
19 R.H.	**8**	46.4	17.11	75	27	1.29	48	2.7	40.9
20 R.H.	**9**	44	17.3	75	28	1.19	48	2.88	32.6
21 R.H.	**10**	47.5	16.93	76	28	1.28	48	3.75	41.1
1 B.T.	**11**	45.3	16.94	94	32	1.28	62	2.5	37.8
2 B.T.	**12**	46.4	16.97	98	29	1.29	69	2.4	38.5
3 B.T.	**13**	59.9	15.43	97	31	1.76	66	1.8	20.6
5 B.T.	**14**	47.4	16.61	96	31	1.35	65	4	43.1
6 B.T.	**15**	61.4	15.72	99	30	1.74	69	1.4	35
7 B.T.	**16**	63.3	15.53	90	31	1.78	59	1.7	28.6
15 B.T.	**17**	68.8	15.29	79	29	1.93	50	1.7	24.4

Fuente: Elaboración propia complementada con los datos de Bojacá Torres (2019)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el análisis ANOVA realizado en el software estadístico SPSS para cada una de las variables por separado y cada uno de los grupos analizados:

<u>CBR para todas las muestras de subrasante</u>

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,275	1	1,275	4,113	,057[b]
	Residuo	5,891	19	,310		
	Total	7,166	20			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), w

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,486	1	1,486	4,972	,038[b]
	Residuo	5,679	19	,299		
	Total	7,166	20			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), Peso unitario

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,913	1	,913	2,774	,112[b]
	Residuo	6,253	19	,329		
	Total	7,166	20			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), LL

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,997	1	,997	3,070	,096[b]
	Residuo	6,169	19	,325		
	Total	7,166	20			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), LP

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,413	1	1,413	4,668	,044[b]
	Residuo	5,753	19	,303		
	Total	7,166	20			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), e

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,003	1	,003	,008	,930[b]
	Residuo	7,163	19	,377		
	Total	7,166	20			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), IP

Figura 5-30: Resultados análisis ANOVA entre CBR y cada uno de los parámetros físicos, para todas las muestras.

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

CBR para las muestras de la ECI

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	6,877	1	6,877	25,756	,000[b]
	Residuo	4,005	15	,267		
	Total	10,882	16			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), w

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	6,109	1	6,109	19,197	,001[b]
	Residuo	4,773	15	,318		
	Total	10,882	16			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), Peso unitario

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2,410	1	2,410	4,267	,057[b]
	Residuo	8,472	15	,565		
	Total	10,882	16			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), LL

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2,876	1	2,876	5,389	,035[b]
	Residuo	8,005	15	,534		
	Total	10,882	16			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), LP

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	7,171	1	7,171	28,987	,000[b]
	Residuo	3,711	15	,247		
	Total	10,882	16			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), e

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,770	1	1,770	2,913	,108[b]
	Residuo	9,112	15	,607		
	Total	10,882	16			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), IP

Figura 5-31: Resultados análisis ANOVA entre CBR y cada uno de los parámetros físicos, para las muestras de la ECI.

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

Mr para todas las muestras de subrasante

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	417,938	1	417,938	12,709	,002[b]
	Residuo	624,841	19	32,886		
	Total	1042,778	20			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), w

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	583,163	1	583,163	24,107	,000[b]
	Residuo	459,615	19	24,190		
	Total	1042,778	20			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), Peso unitario

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	427,933	1	427,933	13,224	,002[b]
	Residuo	614,845	19	32,360		
	Total	1042,778	20			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), LL

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	562,068	1	562,068	22,216	,000[b]
	Residuo	480,710	19	25,301		
	Total	1042,778	20			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), LP

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	458,022	1	458,022	14,882	,001[b]
	Residuo	584,756	19	30,777		
	Total	1042,778	20			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), e

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	12,715	1	12,715	,235	,634[b]
	Residuo	1030,063	19	54,214		
	Total	1042,778	20			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), IP

Figura 5-32: Resultados análisis ANOVA entre Mr y cada uno de los parámetros físicos, para todas las muestras.

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

Mr para las muestras de la ECI

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	200,547	1	200,547	5,860	,029[b]
	Residuo	513,383	15	34,226		
	Total	713,929	16			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), w

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	254,538	1	254,538	8,311	,011[b]
	Residuo	459,391	15	30,626		
	Total	713,929	16			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), Peso unitario

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	5,799	1	5,799	,123	,731[b]
	Residuo	708,130	15	47,209		
	Total	713,929	16			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), LL

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,029	1	,029	,001	,981[b]
	Residuo	713,900	15	47,593		
	Total	713,929	16			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), LP

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	206,637	1	206,637	6,110	,026[b]
	Residuo	507,292	15	33,819		
	Total	713,929	16			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), e

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	9,305	1	9,305	,198	,663[b]
	Residuo	704,625	15	46,975		
	Total	713,929	16			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), IP

Figura 5-33: Resultados análisis ANOVA entre Mr y cada uno de los parámetros físicos, para las muestras de la ECI.

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

En la Tabla 5-9 y la Figura 5-34 se presenta el resumen de los *P-value para cada uno de los parámetros y los grupos analizados.*

Tabla 5-9: Resumen P-value para cada una de las variables independientes

Ensayo Resistencia	Grupo de estudio	w	γ	LL	LP	e	IP
CBR	Todas las muestras	0.057	0.038	0.112	0.096	0.044	0.93
	ECI	0	0.001	0.057	0.035	0	0.108
Mr	Todas las muestras	0.002	0	0.002	0	0.001	0.634
	ECI	0.029	0.011	0.731	0.981	0.026	0.663

Fuente: Elaboración propia.

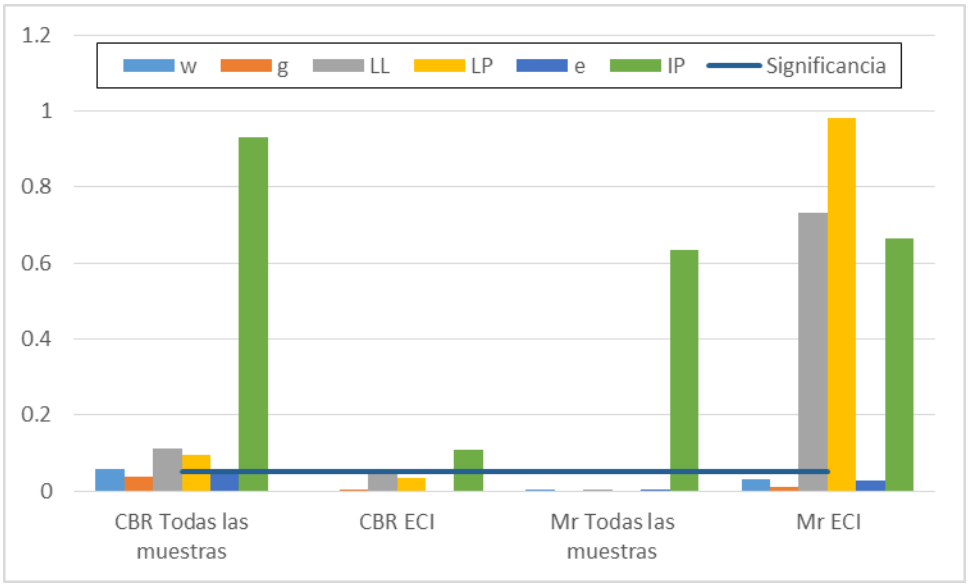


Figura 5-34: Variación del *P-value* frente al nivel de significancia.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 5-9 y la Figura 5-34 las variables humedad, peso unitario y relación de vacíos son las que tienen una mayor incidencia sobre el CBR y el Mr, los límites de consistencia tienen resultados variables frente al nivel de significancia, finalmente el índice de plasticidad es la variable que menos influencia tiene.

5.5.1. Regresión lineal multivariable entre el CBR y las propiedades físicas

En la presente investigación se intentó aplicar un modelo lineal generalizado con el fin de caracterizar el CBR a partir de las propiedades físicas del suelo con mayor influencia (humedad, peso unitario y relación de vacíos).

Para este análisis se emplea el programa SPSS en la cual se realiza el modelo de regresión lineal generalizada y los análisis de validación para cada modelo.

5.5.1.1 *Todas las muestras ensayadas.*

5.5.1.1.1 Coeficientes de correlación

Tabla 5-10: Resumen modelo multivariable entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, todas las muestras.

Resumen del modelo[b]

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,485[a]	,235	,100	,56784	1,737

a. Predictores: (Constante), e, Peso unitario, w

b. Variable dependiente: CBR

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

De la Tabla 5-10 se obtiene el coeficiente de correlación múltiple de la regresión lineal múltiple (R) que puede ser considerado como un indicador de la calidad de predicción del modelo. Para este caso, el coeficiente (0.485) refleja una relación lineal positiva débil entre la variable dependiente (CBR) y las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos).

El coeficiente de determinación múltiple (R^2) que es la variación en la variable dependiente (CBR) que puede ser soportada por las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos), tiene un valor de 0.235. Esta medida significa que el modelo explica el 23.5% de la variación en el CBR, el 76.5% restante se debe al error de modelación.

5.5.1.1.1 Análisis ANOVA

Para el análisis ANOVA se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ (Humedad, peso unitario y relación de vacíos no son predictores convenientes del CBR).

H_1: Al menos una de $\beta_1 \neq 0$ (Al menos una de las variables independientes – Humedad, peso unitario y relación de vacíos – es un predictor conveniente del CBR).

Tabla 5-11: Tabla ANOVA entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, todas las muestras.

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,684	3	,561	1,741	,197[b]
	Residuo	5,482	17	,322		
	Total	7,166	20			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), e, Peso unitario, w

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

En la Tabla 5-11 (ANOVA) se observan resultados de F_{obs}= 1.741, V1=3 y V2=17. El p-value del F_{obs} es > 0.05. Por lo tanto, no es posible rechazar la hipótesis nula y por consiguiente decir que no hay suficiente información para un 5% de nivel de significancia de que al menos una de las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos) no es cero y es una conveniente predictora del CBR.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo de regresión lineal múltiple no es válido para la predicción del CBR.

5.5.1.2 *Muestras de la ECI*

5.5.1.2.1 Coeficientes de correlación

Tabla 5-12: Resumen modelo multivariable entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI.

Resumen del modelo[b]

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,830[a]	,689	,617	,51036	2,531

a. Predictores: (Constante), e, Peso unitario, w

b. Variable dependiente: CBR

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

De la Tabla 5-12 se obtiene el coeficiente de correlación múltiple de la regresión lineal múltiple (R) que puede ser considerado como un indicador de la calidad de predicción del modelo. Para este caso, el coeficiente (0.83) refleja una relación lineal positiva buena entre la variable dependiente (CBR) y las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos).

El coeficiente de determinación múltiple (R^2) que es la variación en la variable dependiente (CBR) que puede ser soportada por las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos), tiene un valor de 0.689. Esta medida significa que el modelo explica el 68.9% de la variación en el CBR, el 31.1% restante se debe al error de modelación.

5.5.1.2.2 Análisis ANOVA

Para el análisis ANOVA se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ (Humedad, peso unitario y relación de vacíos no son predictores convenientes del CBR).

H_1: Al menos una de $\beta_1 \neq 0$ (Al menos una de las variables independientes – Humedad, peso unitario y relación de vacíos – es un predictor conveniente del CBR).

Tabla 5-13: Tabla ANOVA entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI.

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	7,495	3	2,498	9,592	,001[b]
	Residuo	3,386	13	,260		
	Total	10,882	16			

a. Variable dependiente: CBR

b. Predictores: (Constante), e, Peso unitario, w

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

En la Tabla 5-13 (ANOVA) se observan resultados de Fobs= 9.592, V1=3 y V2=13. El *p-value* del *Fobs* es < 0.001. Por lo tanto, es posible rechazar la hipótesis nula y por consiguiente decir que hay suficiente información para un 5% de nivel de significancia de que al menos una de las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos) no es cero y es una conveniente predictora del CBR.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo de regresión lineal múltiple es válido para la predicción del CBR.

5.5.1.2.1 Ecuación lineal múltiple

Tabla 5-14: Tabla de coeficientes entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI.

Coeficientes[a]

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
		B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	26,000	17,460		1,489	,160
	w	,089	,112	,866	,793	,442
	Peso unitario	-,962	,864	-,857	-1,114	,285
	e	-8,311	5,566	-2,488	-1,493	,159

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

De acuerdo con la Tabla 5-14 se obtiene la siguiente ecuación lineal múltiple a partir del modelo de regresión:

$$CBR = 26 + 0.089 * w - 0.962 * \gamma - 8.311 * e$$

Ecuación 5-9

5.5.1.2.1 Evaluación de las variables

Para evaluar cuales variables son predictores significantes del CBR y cuál es el impacto que tiene cada una en la predicción se plantean las siguientes hipótesis:

- Hipótesis para el coeficiente β_0:
  - H_0: $\beta_0 = 0$ (El intercepto es cero)
  - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (El intercepto no es cero)
- Hipótesis para el coeficiente β_1:
  - H_0: $\beta_0 = 0$ (X_1 no es un predictor valioso de y)
  - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (X_1 es un predictor valioso de y)
- Hipótesis para el coeficiente β_2:
  - H_0: $\beta_0 = 0$ (X_2 no es un predictor valioso de y)
  - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (X_2 es un predictor valioso de y)
- Hipótesis para el coeficiente β_3:

- H_0: $\beta_0 = 0$ (X_3 no es un predictor valioso de y)
- H_0: $\beta_0 \neq 0$ (X_3 es un predictor valioso de y)

De la Tabla 5-14 se extraen los *p-value* para cada una de los coeficientes de las variables independientes, si este valor es menor a 0.05 (nivel de significancia elegido) es viable rechazar la hipótesis nula (H_0) y deducir que hay suficiente información que la media de la variable no es cero.

A continuación, se presentan los *p-value* para cada uno de los coeficientes de las variables:

- β_0 tiene un *p-value* de 0.160 >0.05.
- β_1 tiene un *p-value* de 0.442 >0.05.
- β_2 tiene un *p-value* de 0.285 >0.05.
- β_3 tiene un *p-value* de 0.159 >0.05.

Para todos los coeficientes analizados se obtuvieron *p-value* mayores de 0.05 demostrando que no son predictores valiosos y por lo tanto no hay suficiente evidencia que permita rechazar la hipótesis nula.

Lo anterior puede ser verificado al evaluar los intervalos de confianza para un 95% de confiabilidad, presentados en la Tabla 5-15.

Tabla 5-15: Intervalo de confianza para un 95% de confiabilidad modelo entre CBR y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI.

Modelo		95.0% intervalo de confianza para B	
		Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	-11,719	63,719
	w	-,153	,330
	Peso unitario	-2,828	,904
	e	-20,335	3,713

a. Variable dependiente: CBR

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

El intervalo de confianza para todos los parámetros de las variables independientes contiene el valor cero. Por lo tanto, no es posible rechazar la hipótesis nula y es correcto afirmar que los parámetros no son buenos predictores para obtener el valor de CBR.

5.5.1. Regresión lineal multivariable entre el Mr y las propiedades físicas

En la presente investigación se intentó aplicar un modelo lineal generalizado con el fin de caracterizar el Mr a partir de las propiedades físicas del suelo con mayor influencia (humedad, peso unitario y relación de vacíos).

Para este análisis se emplea el programa SPSS en la cual se realiza el modelo de regresión lineal generalizada y los análisis de validación para cada modelo.

5.5.1.1 *Todas las muestras*

5.5.1.1.1 Coeficientes de correlación

Tabla 5-16: Resumen modelo multivariable entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, todas las muestras.

Resumen del modelo[b]

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,829[a]	,687	,632	4,3804	2,001

a. Predictores: (Constante), e, Peso unitario, w

b. Variable dependiente: Mr

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

De la Tabla 5-16 se obtiene el coeficiente de correlación múltiple de la regresión lineal múltiple (R) que puede ser considerado como un indicador de la calidad de predicción del modelo. Para este caso, el coeficiente (0.829) refleja una relación lineal positiva buena entre la variable dependiente (Mr) y las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos).

El coeficiente de determinación múltiple (R^2) que es la variación en la variable dependiente (Mr) que puede ser soportada por las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos), tiene un valor de 0.687. Esta medida significa que el modelo explica el 68.7% de la variación en el MR, el 31.3% restante se debe al error de modelación.

5.5.1.1.2 Análisis ANOVA

Para el análisis ANOVA se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ (Humedad, peso unitario y relación de vacíos no son predictores convenientes del Mr).

H_1: Al menos una de $\beta_1 \neq 0$ (Al menos una de las variables independientes – Humedad, peso unitario y relación de vacíos – es un predictor conveniente del Mr).

Tabla 5-17: Tabla ANOVA entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, Todas las muestras.

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	716,587	3	238,862	12,449	,000[b]
	Residuo	326,191	17	19,188		
	Total	1042,778	20			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), e, Peso unitario, w

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

En la Tabla 5-17 (ANOVA) se observan resultados de Fobs= 12.449, V1=3 y V2=17. El *p-value* del *Fobs* es < 0.001. Por lo tanto, es posible rechazar la hipótesis nula y por consiguiente decir que hay suficiente información para un 5% de nivel de significancia de que al menos una de las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos) no es cero y es una conveniente predictora del Mr.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo de regresión lineal múltiple es válido para la predicción del MR.

5.5.1.1.3 Ecuación lineal múltiple

Tabla 5-18: Tabla de coeficientes entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, todas las muestras.

Coeficientes[a]

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
		B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	-165,440	64,384		-2,570	,020
	w	-,152	,435	-,571	-,349	,731
	Peso unitario	10,530	3,338	2,677	3,155	,006
	e	21,726	19,133	2,529	1,136	,272

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

De acuerdo con la Tabla 5-18 se obtiene la siguiente ecuación lineal múltiple a partir del modelo de regresión:

$$M_r = -165.44 - 0.152 * w + 10.53 * \gamma + 21.726 * e$$

Ecuación 5-10

5.5.1.1.4 Evaluación de las variables

Para evaluar cuales variables son predictores significantes del Mr y cuál es el impacto que tiene cada una en la predicción se plantean las siguientes hipótesis:

- Hipótesis para el coeficiente β_0:
  - H_0: $\beta_0 = 0$ (El intercepto es cero)
  - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (El intercepto no es cero)
- Hipótesis para el coeficiente β_1:
  - H_0: $\beta_0 = 0$ (X_1 no es un predictor valioso de y)
  - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (X_1 es un predictor valioso de y)
- Hipótesis para el coeficiente β_2:
  - H_0: $\beta_0 = 0$ (X_2 no es un predictor valioso de y)
  - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (X_2 es un predictor valioso de y)

- Hipótesis para el coeficiente β_3:
    - H_0: $\beta_0 = 0$ (X_3 no es un predictor valioso de y)
    - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (X_3 es un predictor valioso de y)

De la Tabla 5-18 se extraen los *p-value* para cada uno de los coeficientes de las variables independientes, si este valor es menor a 0.05 (nivel de significancia elegido) es viable rechazar la hipótesis nula (H_0) y deducir que hay suficiente información que la media de la variable no es cero.

A continuación, se presentan los *p-value* para cada uno de los coeficientes de las variables:

- β_0 tiene un *p-value* de 0.020 < 0.05.
- β_1 tiene un *p-value* de 0.731 > 0.05.
- β_2 tiene un *p-value* de 0.006 < 0.05.
- β_3 tiene un *p-value* de 0.272 > 0.05.

El p-value de β_0 es menor al nivel de significancia establecido, es viable rechazar la hipótesis nula y deducir que hay suficiente información que la media de las respuestas no es cero.

El p-value de β_2 refleja que este parámetro (peso unitario) es un buen predictor del valor del Mr. Por consiguiente, es posible rechazar la hipótesis nula.

El p-value de β_1 y β_3 es mayor de 0.05 demostrando que no son predictores valiosos del Mr y por lo tanto no hay suficiente evidencia que permita rechazar la hipótesis nula.

Lo anterior puede ser verificado al evaluar los intervalos de confianza para un 95% de confiabilidad, presentados en la Tabla 5-19.

Tabla 5-19: Intervalo de confianza para un 95% de confiabilidad modelo entre MR y propiedades físicas seleccionadas, todas las muestras.

Modelo		95.0% intervalo de confianza para B	
		Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	-301,279	-29,601
	w	-1,068	,765
	Peso unitario	3,488	17,573
	e	-18,641	62,092

a. Variable dependiente: Mr

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

El intervalo de confianza para los parámetros de β_0 y β_2 No cruzan el valor cero. Por lo tanto, es posible con un 95% de confiabilidad que los valores reales de estos parámetros no son cero y que el parámetro peso unitario es un predictor valioso del Mr. Por otra parte, el intervalo de confianza para los parámetros β_1 y β_3 contienen el valor cero, entonces no es posible rechazar la hipótesis nula y es correcto afirmar que los parámetros no son buenos predictores para obtener el valor de Mr.

5.5.1.2 *Muestras de la ECI*

5.5.1.2.1 Coeficientes de correlación

Tabla 5-20: Resumen modelo multivariable entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI.

Resumen del modelo[b]

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,671[a]	,450	,323	5,4957	2,137

a. Predictores: (Constante), e, Peso unitario, w

b. Variable dependiente: Mr

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

De la Tabla 5-16 se obtiene el coeficiente de correlación múltiple de la regresión lineal múltiple (R) que puede ser considerado como un indicador de la calidad de predicción del modelo. Para este caso, el coeficiente (0.671) refleja una relación lineal positiva aceptable entre la variable dependiente (Mr) y las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos).

El coeficiente de determinación múltiple (R^2) que es la variación en la variable dependiente (Mr) que puede ser soportada por las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos), tiene un valor de 0.323. Esta medida significa que el modelo explica el 32.3% de la variación en el MR, el 67.7% restante se debe al error de modelación.

5.5.1.2.2 Análisis ANOVA

Para el análisis ANOVA se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ (Humedad, peso unitario y relación de vacíos no son predictores convenientes del Mr).

H_1: Al menos una de $\beta_1 \neq 0$ (Al menos una de las variables independientes – Humedad, peso unitario y relación de vacíos – es un predictor conveniente del Mr).

Tabla 5-21: Tabla ANOVA entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, Muestras de la ECI.

ANOVA[a]

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	321,289	3	107,096	3,546	,045[b]
	Residuo	392,641	13	30,203		
	Total	713,929	16			

a. Variable dependiente: Mr

b. Predictores: (Constante), e, Peso unitario, w

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

En la Tabla 5-21 (ANOVA) se observan resultados de Fobs= 3.546, V1=3 y V2=13. El *p-value* del *Fobs* es < 0.05. Por lo tanto, es posible rechazar la hipótesis nula y por consiguiente decir que hay suficiente información para un 5% de nivel de significancia de que al menos una de las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos) no es cero y es una conveniente predictora del Mr.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo de regresión lineal múltiple es válido para la predicción del MR.

5.5.1.2.3 Ecuación lineal múltiple

Tabla 5-22: Tabla de coeficientes entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI.

Coeficientes[a]

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
		B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	-311,304	188,011		-1,656	,122
	w	-1,596	1,204	-1,924	-1,326	,208
	Peso unitario	18,117	9,301	1,992	1,948	,073
	e	88,499	59,933	3,270	1,477	,164

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

De acuerdo con la Tabla 5-22 se obtiene la siguiente ecuación lineal múltiple a partir del modelo de regresión:

$$M_r = -311.304 - 1.596 * w + 18.117 * \gamma + 88.499 * e$$

Ecuación 5-11

5.5.1.2.4 Evaluación de las variables

Para evaluar cuales variables son predictores significantes del Mr y cuál es el impacto que tiene cada una en la predicción se plantean las siguientes hipótesis:

- Hipótesis para el coeficiente β_0:
  - H_0: $\beta_0 = 0$ (El intercepto es cero)
  - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (El intercepto no es cero)
- Hipótesis para el coeficiente β_1:
  - H_0: $\beta_0 = 0$ (X_1 no es un predictor valioso de y)
  - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (X_1 es un predictor valioso de y)
- Hipótesis para el coeficiente β_2:
  - H_0: $\beta_0 = 0$ (X_2 no es un predictor valioso de y)
  - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (X_2 es un predictor valioso de y)
- Hipótesis para el coeficiente β_3:
  - H_0: $\beta_0 = 0$ (X_3 no es un predictor valioso de y)
  - H_0: $\beta_0 \neq 0$ (X_3 es un predictor valioso de y)

De la Tabla 5-22 se extraen los *p-value* para cada una de los coeficientes de las variables independientes, si este valor es menor a 0.05 (nivel de significancia elegido) es viable rechazar la hipótesis nula (H_0) y deducir que hay suficiente información que la media de la variable no es cero.

A continuación, se presentan los *p-value* para cada uno de los coeficientes de las variables:

- β_0 tiene un *p-value* de 0.122 > 0.05.
- β_1 tiene un *p-value* de 0.208 > 0.05.
- β_2 tiene un *p-value* de 0.073 > 0.05.
- β_3 tiene un *p-value* de 0.164 > 0.05.

Los p-value de los parámetros de las variables son mayores de 0.05 demostrando que no son predictores valiosos del Mr y, por lo tanto, no hay suficiente evidencia que permita rechazar la hipótesis nula.

Lo anterior puede ser verificado al evaluar los intervalos de confianza para un 95% de confiabilidad, presentados en la Tabla 5-23.

Tabla 5-23: Intervalo de confianza para un 95% de confiabilidad modelo entre Mr y propiedades físicas seleccionadas, muestras de la ECI.

Modelo		95.0% intervalo de confianza para B	
		Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	-717,476	94,869
	w	-4,197	1,004
	Peso unitario	-1,977	38,210
	e	-40,979	217,977

a. Variable dependiente: Mr

Fuente: Elaboración propia en el programa estadístico SPSS

El intervalo de confianza para todos los parámetros de las variables analizadas contiene el valor cero, entonces no es posible rechazar la hipótesis nula y es correcto afirmar que los parámetros no son buenos predictores para obtener el valor de Mr.

5.6 Resultados ensayo Mini-CBR

De acuerdo con lo presentado en la revisión bibliográfica, el ensayo de Mini-CBR consiste en penetrar, con un pistón cilíndrico de 16 mm de diámetro, muestras inalteradas en el molde Mini-CBR, con el fin de determinar la carga necesaria para lograr diferentes profundidades (0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 y 5.0 mm), la

velocidad de penetración es de 1.27 mm/min. El ensayo se realiza a humedad natural y luego de realizar inmersión de las muestras de 20 a 24 horas.

El principio del ensayo es igual al del CBR tradicional, pero a menor escala para reducir la cantidad de muestra, el tiempo de extracción de muestra y el tiempo de ejecución de ensayo. Es importante aclarar que este ensayo se estima como una alternativa al CBR pero no reemplaza los ensayos dinámicos que establecen las propiedades mecánicas de los suelos considerando los niveles de esfuerzos, como los ensayos de módulo resiliente (Mr) o el CBR cíclico (cCBR).

En la Tabla 5-24 y la Tabla 5-25 se presentan las cargas necesarias para lograr las penetraciones establecidas para cada una de las 21 muestras ensayadas en esta investigación en condición natural y luego de inmersión.

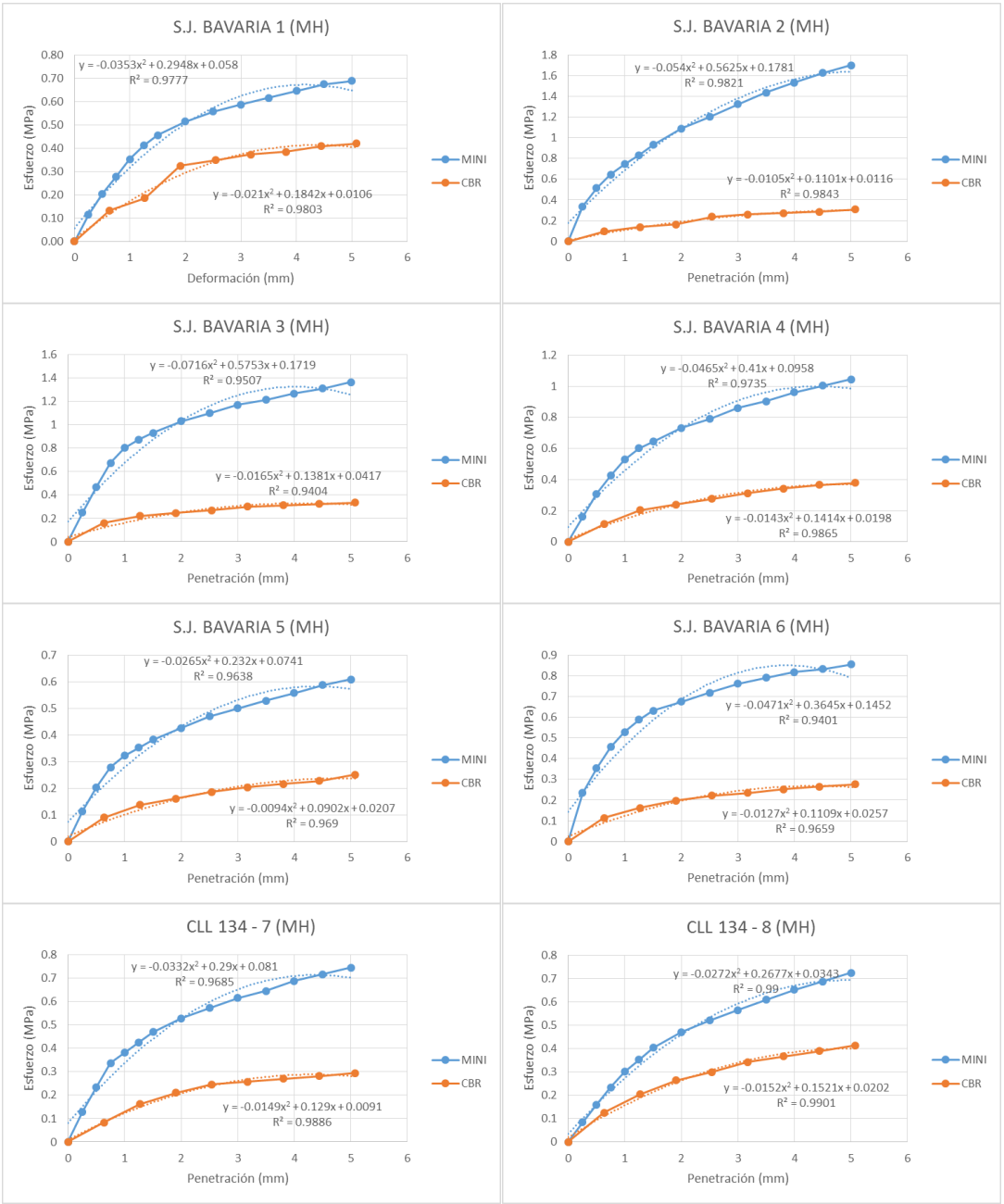
Tabla 5-24: Cargas (kg) obtenidas durante el ensayo Mini-CBR en condición natural.

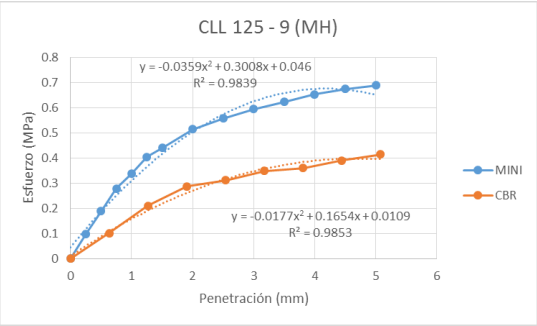
Cargas (kg)														
Exploración		Penetración (mm)												
		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
S.J. Bavaria	1	2.4	4.2	5.7	7.2	8.4	9.3	10.5	11.4	12.0	12.6	13.2	13.8	14.1
S.J. Bavaria	2	6.9	10.5	13.2	15.3	17.1	19.1	22.3	24.6	27.2	29.4	31.4	33.3	34.8
S.J. Bavaria	3	3.6	9.6	13.8	16.5	17.9	19.1	21.1	22.6	24.0	24.9	26.0	26.9	28.0
S.J. Bavaria	4	3.3	6.3	8.7	10.8	12.3	13.2	15.0	16.2	17.6	18.5	19.7	20.6	21.4
S.J. Bavaria	5	2.4	4.2	5.7	6.6	7.2	7.8	8.7	9.6	10.2	10.8	11.4	12.0	12.5
S.J. Bavaria	6	4.8	7.2	9.3	10.8	12.0	12.9	13.8	14.7	15.6	16.2	16.8	17.1	17.5
Cll 134 (1)	7	2.7	4.8	6.9	7.8	8.7	9.6	10.8	11.7	12.6	13.2	14.1	14.7	15.3
CLL 134 (2)	8	1.7	3.3	4.8	6.2	7.2	8.3	9.6	10.7	11.6	12.5	13.4	14.1	14.9
CLL 125 (1)	9	1.7	3.9	5.7	6.9	8.3	9.0	10.5	11.4	12.2	12.8	13.4	13.8	14.1
CLL 125 (2)	10	1.6	2.8	4.0	5.1	6.0	6.6	7.8	8.7	9.5	9.6	10.1	10.4	10.5
Castellana	11	3.3	5.4	6.6	7.2	7.8	8.4	9.5	10.5	11.4	12.3	13.1	13.4	13.5
ECI	12	3.0	4.2	4.8	5.3	5.6	5.7	6.0	6.3	6.5	6.8	6.9	7.1	7.2
ECI	13	1.4	2.4	3.9	4.6	5.1	5.4	5.7	6.2	6.3	6.6	6.9	7.1	7.2
ECI	14	3.9	5.7	6.6	7.2	7.7	8.0	8.4	8.7	9.0	9.3	9.5	9.6	9.8
ECI	15	4.2	5.1	5.6	6.0	6.3	6.6	6.9	7.2	7.5	7.7	7.8	8.0	8.1
ECI	16	4.2	4.8	5.4	5.7	6.0	6.3	6.6	6.9	7.2	7.4	7.5	7.6	7.7
ECI	17	2.7	4.2	5.4	6.0	6.3	6.5	6.9	7.4	7.7	7.8	8.0	8.1	8.3
ECI	18	3.9	5.1	5.7	6.2	6.5	6.6	7.1	7.4	7.5	7.8	8.0	8.2	8.4
ECI	19	1.1	2.2	3.0	3.7	4.5	5.3	6.0	6.3	6.6	7.1	7.4	7.5	7.7
ECI	20	2.4	3.6	4.2	4.6	5.0	5.3	5.7	6.2	6.3	6.6	6.8	6.9	7.2
ECI	21	2.0	3.3	5.1	5.9	6.5	6.9	7.5	7.8	8.1	8.4	8.6	8.7	8.7

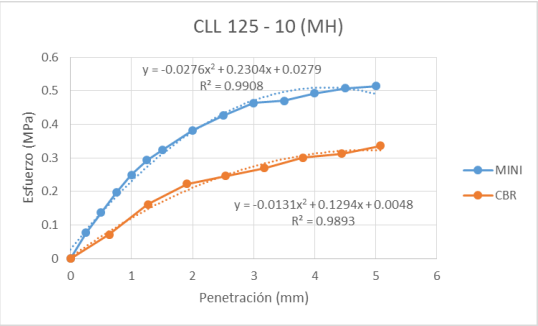
Fuente: Elaboración propia.

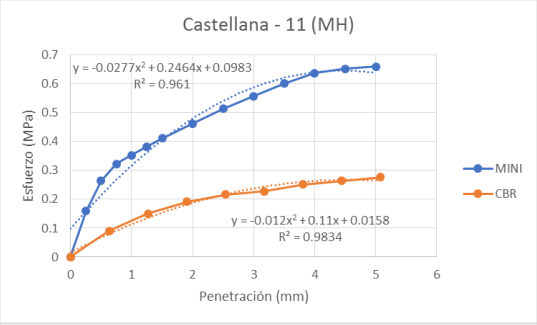
De la anterior tabla podemos observar que existe una gran dispersión en los resultados obtenidos para muestras de una misma zona (exceptuando las muestras de la ECI que presentan una mayor homogeneidad), lo anterior evidencia la gran variabilidad que tiene este ensayo tal y como sucede con el ensayo tradicional de CBR.

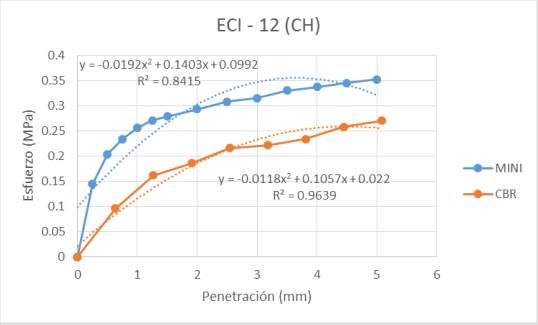
A continuación, se presenta la gráfica esfuerzo vs deformación de los ensayos de Mini-CBR y CBR tradicional para el mismo rango de deformaciones:

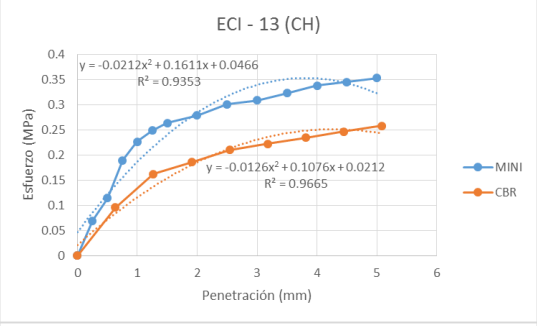


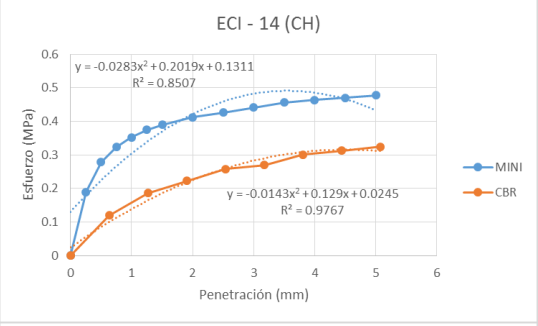

CLL 125 - 9 (MH)
y = -0.0359x² + 0.3008x + 0.046
R² = 0.9839
y = -0.0177x² + 0.1654x + 0.0109
R² = 0.9853
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

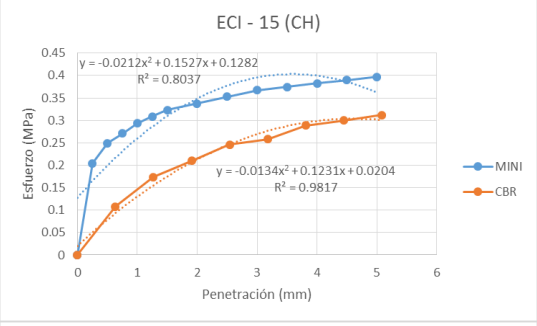

CLL 125 - 10 (MH)
y = -0.0276x² + 0.2304x + 0.0279
R² = 0.9908
y = -0.0131x² + 0.1294x + 0.0048
R² = 0.9893
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

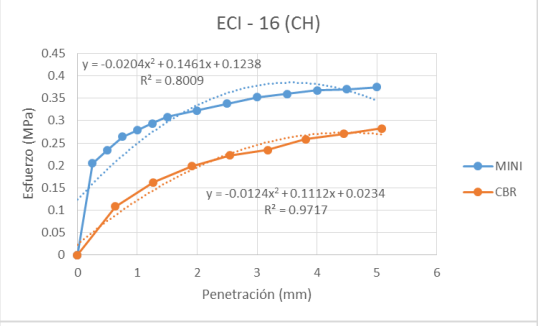

Castellana - 11 (MH)
y = -0.0277x² + 0.2464x + 0.0983
R² = 0.961
y = -0.012x² + 0.11x + 0.0158
R² = 0.9834
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

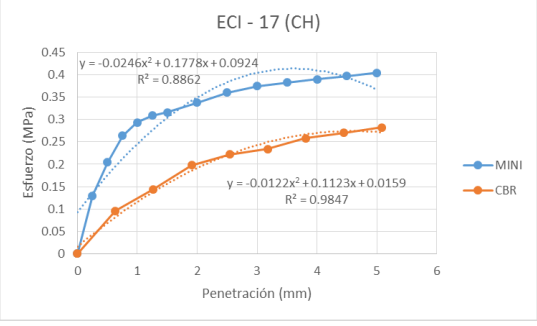

ECI - 12 (CH)
y = -0.0192x² + 0.1403x + 0.0992
R² = 0.8415
y = -0.0118x² + 0.1057x + 0.022
R² = 0.9639
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

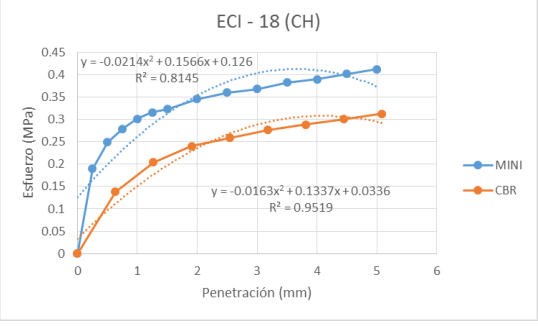

ECI - 13 (CH)
y = -0.0212x² + 0.1611x + 0.0466
R² = 0.9353
y = -0.0126x² + 0.1076x + 0.0212
R² = 0.9665
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR


ECI - 14 (CH)
y = -0.0283x² + 0.2019x + 0.1311
R² = 0.8507
y = -0.0143x² + 0.129x + 0.0245
R² = 0.9767
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR


ECI - 15 (CH)
y = -0.0212x² + 0.1527x + 0.1282
R² = 0.8037
y = -0.0134x² + 0.1231x + 0.0204
R² = 0.9817
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR


ECI - 16 (CH)
y = -0.0204x² + 0.1461x + 0.1238
R² = 0.8009
y = -0.0124x² + 0.1112x + 0.0234
R² = 0.9717
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR


ECI - 17 (CH)
y = -0.0246x² + 0.1778x + 0.0924
R² = 0.8862
y = -0.0122x² + 0.1123x + 0.0159
R² = 0.9847
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR


ECI - 18 (CH)
y = -0.0214x² + 0.1566x + 0.126
R² = 0.8145
y = -0.0163x² + 0.1337x + 0.0336
R² = 0.9519
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

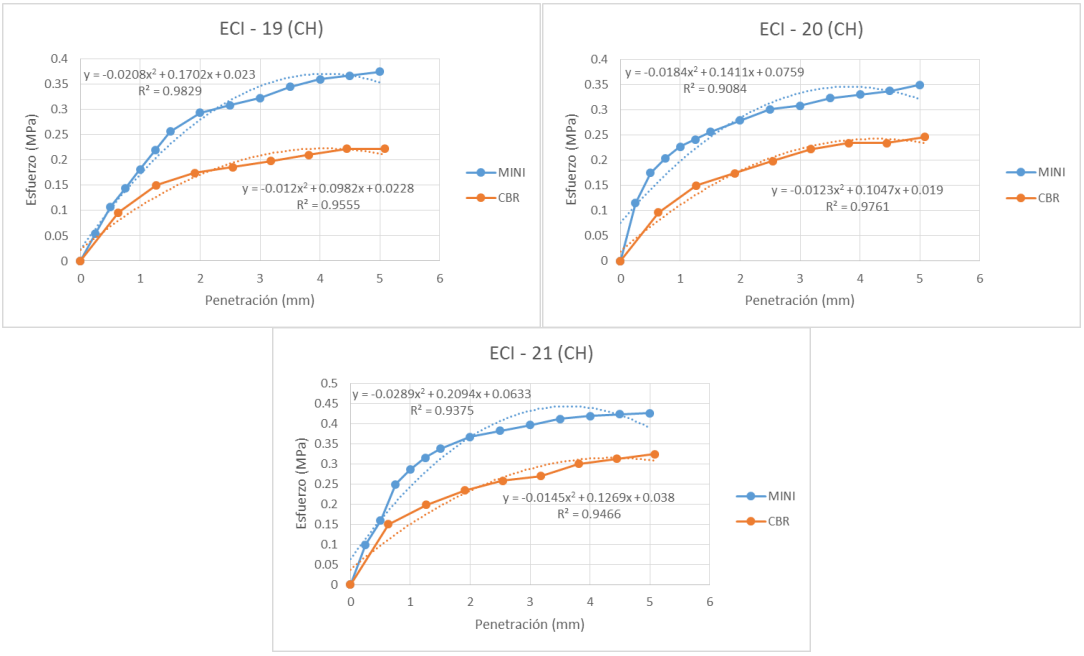


Figura 5-35: Gráfica esfuerzo vs deformación ensayos Mini-CBR y CBR hasta una deformación de 5.0 mm en condición de humedad natural..

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 5-35 se observa una similitud entre las gráficas del ensayo de Mini-CBR y el ensayo de CBR tradicional, de igual forma, ambas líneas de tendencia corresponden a curvas polinómicas de grado 2.

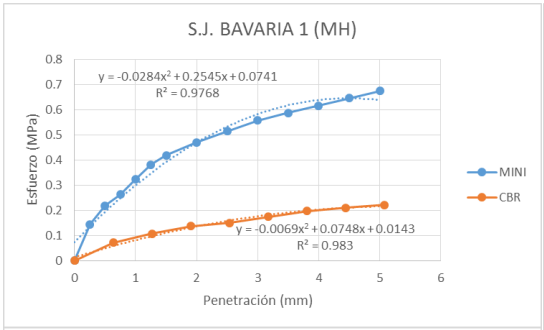
Tabla 5-25: Cargas (kg) obtenidas durante el ensayo Mini-CBR luego de inmersión.

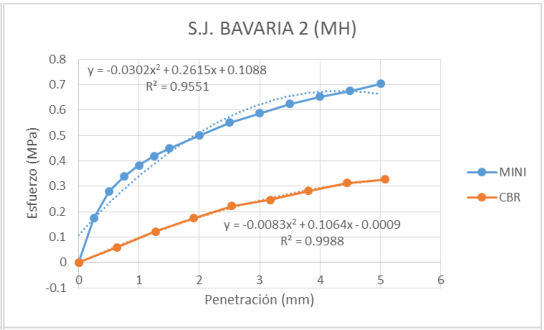
Cargas (kg)														
Exploración		Penetración (mm)												
		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
S.J. Bavaria	1	3.0	4.5	5.4	6.6	7.8	8.6	9.6	10.5	11.4	12.0	12.6	13.2	13.8
S.J. Bavaria	2	3.6	5.7	6.9	7.8	8.6	9.2	10.2	11.3	12.0	12.8	13.4	13.8	14.4
S.J. Bavaria	3	2.7	3.7	4.3	4.5	4.8	5.0	5.4	5.7	6.0	6.3	6.6	6.9	7.1
S.J. Bavaria	4	3.3	5.7	6.6	7.5	8.1	8.7	9.8	10.8	11.4	12.3	13.1	13.8	14.4
S.J. Bavaria	5	0.8	1.7	2.5	3.0	3.6	3.9	4.3	4.8	5.3	5.7	6.0	6.3	6.8
S.J. Bavaria	6	0.8	1.6	2.5	3.4	4.2	4.6	5.3	5.9	6.3	6.9	7.4	7.8	8.3
Cll 134 (1)	7	1.0	2.0	3.4	4.5	5.4	5.9	6.9	7.7	8.4	9.0	9.6	10.4	10.8
CLL 134 (2)	8	2.5	3.9	4.8	5.3	5.9	6.2	6.6	7.1	7.5	8.0	8.4	8.7	9.2
CLL 125 (1)	9	0.3	0.7	2.4	4.5	6.0	6.9	8.4	9.8	11.0	12.2	13.2	14.3	15.3
CLL 125 (2)	10	1.3	2.0	3.0	4.0	5.0	5.7	6.8	7.4	7.8	8.1	8.4	8.5	8.7
Castellana	11	1.9	3.3	4.6	5.7	6.8	7.7	8.7	9.5	10.1	10.5	10.9	11.4	11.7
ECI	12	1.6	2.2	2.7	3.0	3.3	3.4	3.6	3.9	4.0	4.2	4.5	4.8	4.9
ECI	13	1.4	1.7	2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.1	3.4	3.5	3.7	3.9	4.0
ECI	14	1.9	2.7	3.0	3.3	3.4	3.5	3.7	3.9	4.0	4.2	4.3	4.4	4.5
ECI	15	1.4	2.0	2.4	2.5	2.7	2.8	3.1	3.3	3.6	3.7	3.9	4.0	4.2
ECI	16	1.7	2.0	2.4	2.7	2.8	3.0	3.3	3.6	3.7	3.9	4.2	4.3	4.5
ECI	17	1.6	2.2	2.7	3.0	3.1	3.3	3.6	3.9	4.0	4.2	4.5	4.6	4.7
ECI	18	1.6	2.0	2.3	2.4	2.7	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	3.9	4.1	4.3
ECI	19	1.0	1.4	2.0	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.3	4.5	4.8
ECI	20	1.0	1.4	2.0	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	4.3	4.5	4.8
ECI	21	1.0	1.4	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.1	4.3	4.5

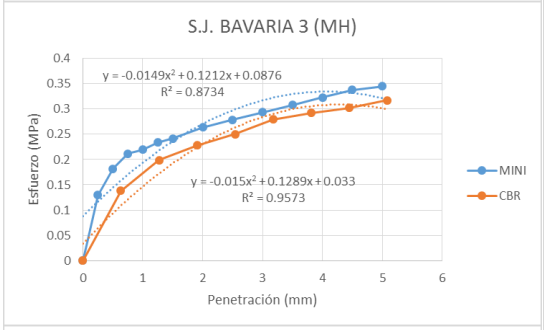
Fuente: Elaboración propia.

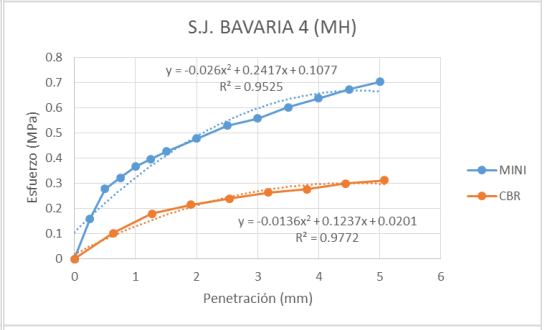
De la anterior tabla podemos observar que existe una gran dispersión en los resultados obtenidos para muestras de una misma zona (exceptuando las muestras de la ECI que presentan una mayor homogeneidad), lo anterior evidencia la gran variabilidad que tiene este ensayo tal y como sucede con el ensayo tradicional de CBR.

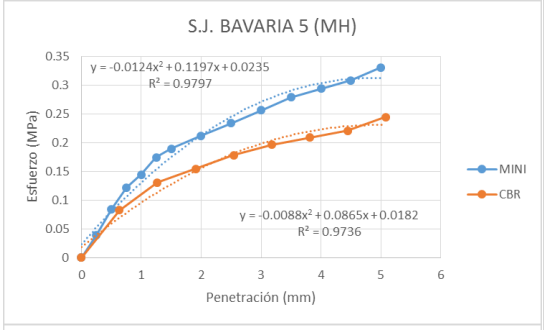
A continuación, se presenta la gráfica esfuerzo vs deformación para los ensayos de Mini-CBR y CBR tradicional para el mismo rango de deformaciones:

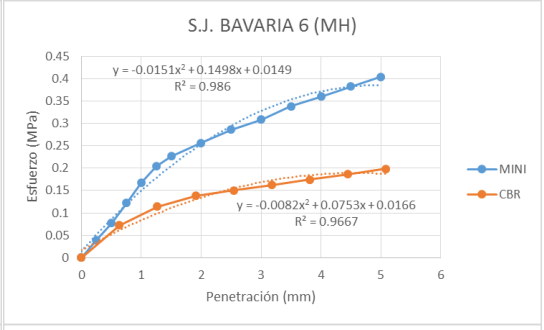

S.J. BAVARIA 1 (MH)
y = -0.0284x² + 0.2545x + 0.0741
R² = 0.9768
y = -0.0069x² + 0.0748x + 0.0143
R² = 0.983
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

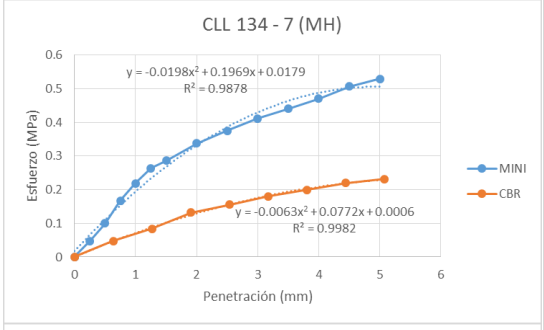

S.J. BAVARIA 2 (MH)
y = -0.0302x² + 0.2615x + 0.1088
R² = 0.9551
y = -0.0083x² + 0.1064x - 0.0009
R² = 0.9988
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

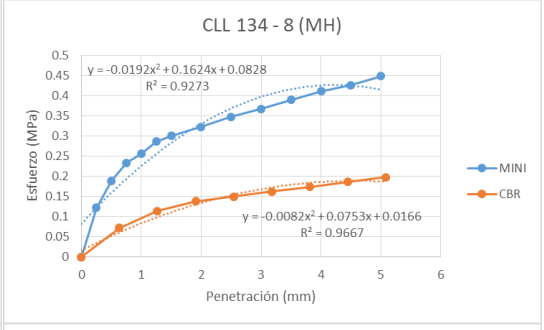

S.J. BAVARIA 3 (MH)
y = -0.0149x² + 0.1212x + 0.0876
R² = 0.8734
y = -0.015x² + 0.1289x + 0.033
R² = 0.9573
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

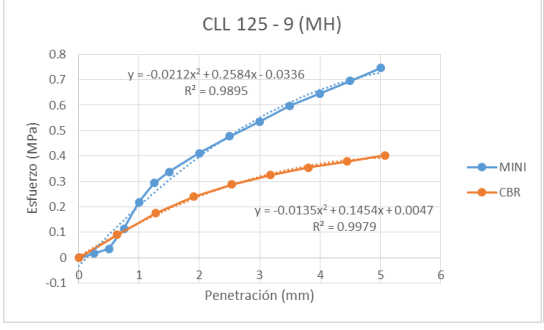

S.J. BAVARIA 4 (MH)
y = -0.026x² + 0.2417x + 0.1077
R² = 0.9525
y = -0.0136x² + 0.1237x + 0.0201
R² = 0.9772
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

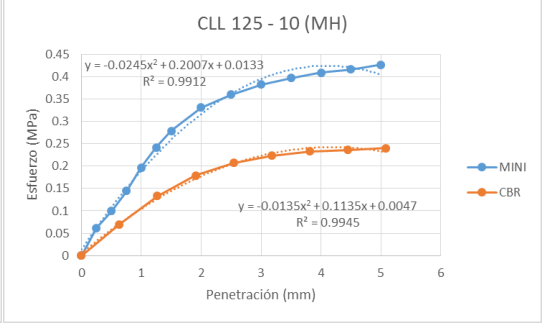

S.J. BAVARIA 5 (MH)
y = -0.0124x² + 0.1197x + 0.0235
R² = 0.9797
y = -0.0088x² + 0.0865x + 0.0182
R² = 0.9736
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

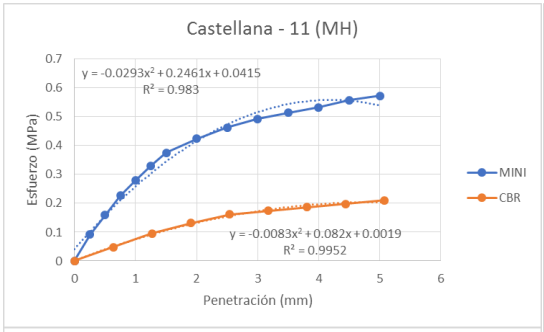

S.J. BAVARIA 6 (MH)
y = -0.0151x² + 0.1498x + 0.0149
R² = 0.986
y = -0.0082x² + 0.0753x + 0.0166
R² = 0.9667
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

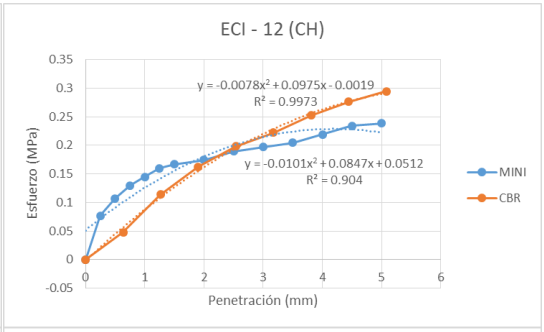

CLL 134 - 7 (MH)
y = -0.0198x² + 0.1969x + 0.0179
R² = 0.9878
y = -0.0063x² + 0.0772x + 0.0006
R² = 0.9982
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

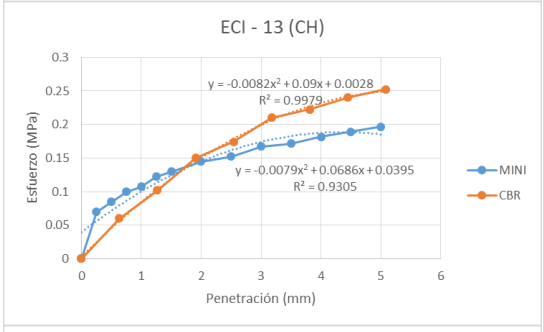

CLL 134 - 8 (MH)
y = -0.0192x² + 0.1624x + 0.0828
R² = 0.9273
y = -0.0082x² + 0.0753x + 0.0166
R² = 0.9667
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

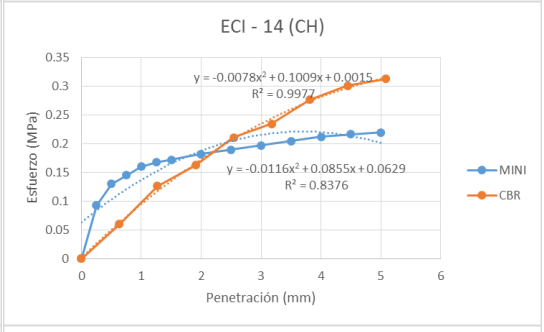

CLL 125 - 9 (MH)
y = -0.0212x² + 0.2584x - 0.0336
R² = 0.9895
y = -0.0135x² + 0.1454x + 0.0047
R² = 0.9979
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

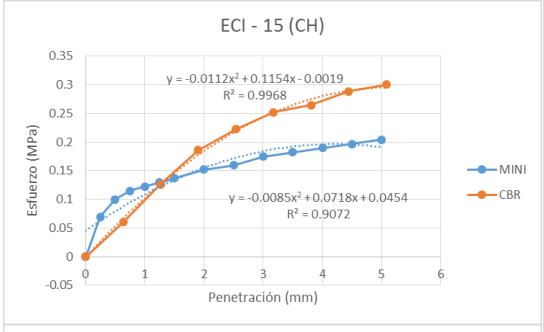

CLL 125 - 10 (MH)
y = -0.0245x² + 0.2007x + 0.0133
R² = 0.9912
y = -0.0135x² + 0.1135x + 0.0047
R² = 0.9945
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

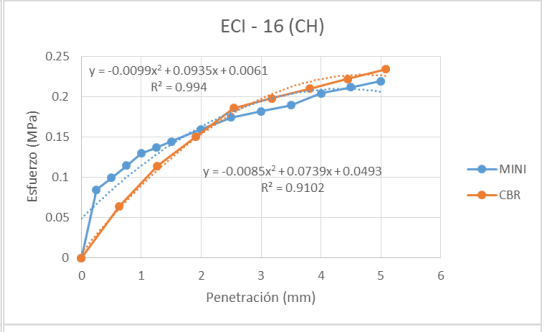

Castellana - 11 (MH)
y = -0.0293x² + 0.2461x + 0.0415
R² = 0.983
y = -0.0083x² + 0.082x + 0.0019
R² = 0.9952
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

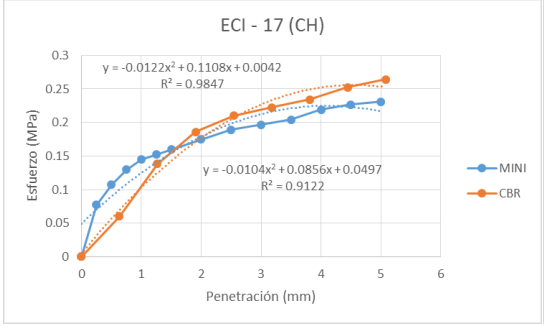

ECI - 12 (CH)
y = -0.0078x² + 0.0975x - 0.0019
R² = 0.9973
y = -0.0101x² + 0.0847x + 0.0512
R² = 0.904
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

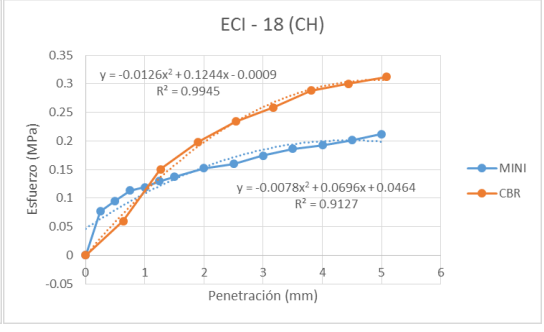

ECI - 13 (CH)
y = -0.0082x² + 0.09x + 0.0028
R² = 0.9979
y = -0.0079x² + 0.0686x + 0.0395
R² = 0.9305
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR


ECI - 14 (CH)
y = -0.0078x² + 0.1009x + 0.0015
R² = 0.9977
y = -0.0116x² + 0.0855x + 0.0629
R² = 0.8376
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR


ECI - 15 (CH)
y = -0.0112x² + 0.1154x - 0.0019
R² = 0.9968
y = -0.0085x² + 0.0718x + 0.0454
R² = 0.9072
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR


ECI - 16 (CH)
y = -0.0099x² + 0.0935x + 0.0061
R² = 0.994
y = -0.0085x² + 0.0739x + 0.0493
R² = 0.9102
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR


ECI - 17 (CH)
y = -0.0122x² + 0.1108x + 0.0042
R² = 0.9847
y = -0.0104x² + 0.0856x + 0.0497
R² = 0.9122
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR


ECI - 18 (CH)
y = -0.0126x² + 0.1244x - 0.0009
R² = 0.9945
y = -0.0078x² + 0.0696x + 0.0464
R² = 0.9127
Esfuerzo (MPa)
Penetración (mm)
MINI
CBR

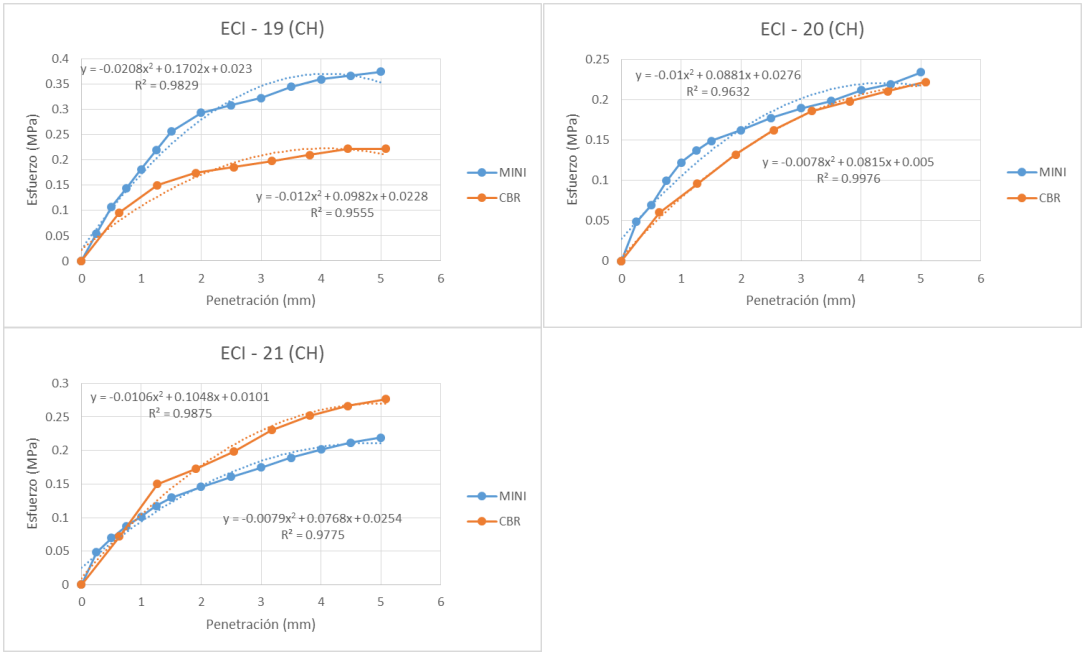


Figura 5-36: Gráfica esfuerzo vs deformación ensayos Mini-CBRinm y CBRinm hasta una deformación de 5.0 mm luego de la inmersión de las muestras.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 5-36 se observa una similitud entre las gráficas del ensayo de Mini-CBR y el ensayo de CBR tradicional aun cuando en algunas muestras se cruzaron ambas curvas. De igual forma, ambas líneas de tendencia corresponden a curvas polinómicas de grado 2.

5.6.1. Determinación del CBR mediante el ensayo Mini-CBR a partir de la literatura.

De acuerdo con lo presentado en el capítulo 3, diversos autores han buscado establecer correlaciones para determinar el valor de CBR a partir de las cargas obtenidas en el ensayo de Mini-CBR, en la Tabla 5-26 y la Tabla 5-28 se presentan los valores obtenidos durante el Mini-CBR (Condición natural y con inmersión) para cada uno de los autores indicados.

5.6.1.1 *Determinación del CBR a humedad natural a partir del ensayo Mini-CBR*

Tabla 5-26: Valores de CBR obtenidos a partir del ensayo Mini-CBR para diferentes autores.

Valores de CBR obtenidos a partir del ensayo de Mini-CBR en condición natural									
Exploración		Lafleur (1960)		Nogami (1972)		Ferreira (1986)		Marson (2004)	
		CBR 0.1"	CBR 0.2"	CBR 0.1"	CBR 0.2"	CBR 0.1"	CBR 0.2"	CBR 0.1"	CBR 0.2"
S.J. Bavaria	**1**	1.27	2.17	5.3	4.7	7	6.6	-3.7	-3.7
S.J. Bavaria	**2**	2.79	4.06	11.1	10.1	11.7	10.9	5.2	5.2
S.J. Bavaria	**3**	2.79	4.06	10.5	9.3	11.2	10.2	4.3	4.3
S.J. Bavaria	**4**	1.86	2.94	7.5	6.7	8.8	8.2	-0.3	-0.3
S.J. Bavaria	**5**	1.04	1.86	4.4	4	6.3	6	-5	-5
S.J. Bavaria	**6**	1.82	2.88	6.9	6.1	8.3	7.7	-1.2	-1.2
Cll 134 (1)	**7**	1.31	2.23	5.4	4.8	7.2	6.7	-3.4	-3.4
CLL 134 (2)	**8**	1.11	1.95	4.8	4.4	6.7	6.4	-4.3	-4.3
CLL 125 (1)	**9**	1.22	2.11	5.3	4.7	7	6.6	-3.7	-3.7
CLL 125 (2)	**10**	0.87	1.6	3.9	3.6	6	5.7	-5.7	-5.7
Castellana	**11**	1.13	1.98	4.7	4.3	6.6	6.3	-4.4	-4.4
ECI	**12**	0.74	1.41	3	2.6	5.3	4.9	-7.1	-7.1
ECI	**13**	0.69	1.34	2.8	2.5	5.1	4.9	-7.3	-7.3
ECI	**14**	1.07	1.89	4.2	3.6	6.2	5.7	-5.2	-5.2
ECI	**15**	0.87	1.6	3.5	3	5.6	5.2	-0.4	-0.4
ECI	**16**	0.83	1.54	3.3	2.9	5.5	5.1	-6.6	-6.6
ECI	**17**	0.85	1.57	3.5	3	5.6	5.3	-6.4	-6.4
ECI	**18**	0.87	1.6	3.5	3	5.7	5.3	-6.3	-6.3
ECI	**19**	0.67	1.31	3	2.6	5.3	4.9	-7.1	-7.1
ECI	**20**	0.67	1.31	2.9	2.5	5.1	4.9	-7.3	-7.3
ECI	**21**	0.91	1.66	3.8	3.2	5.9	5.4	-5.9	-5.9

Fuente: Elaboración propia.

Observando los resultados de la tabla anterior se puede observar que las correlaciones obtenidas a partir de Marson (2004) resultan en valores negativos en gran cantidad de datos, lo anterior puede obedecer a que su investigación fue desarrollada para suelos lateríticos brasileros compactados en laboratorio los cuales presentan valores de CBR que varían entre 5% y 46% (promedio de CBR = 22%).

En la Figura 5-37 y la Figura 5-38 se presenta gráficamente los resultados obtenidos en la Tabla 5-26, se observa que todas las metodologías presentan tendencias similares en sus resultados pero que no coinciden de forma tan precisa con el comportamiento del ensayo tradicional. Adicionalmente, se encuentra una diferencia considerable entre el CBR tradicional y las 3 correlaciones existentes. Sin embargo, la metodología presentada por Nogami Tiene un adecuado ajuste para las muestras de la ECI.

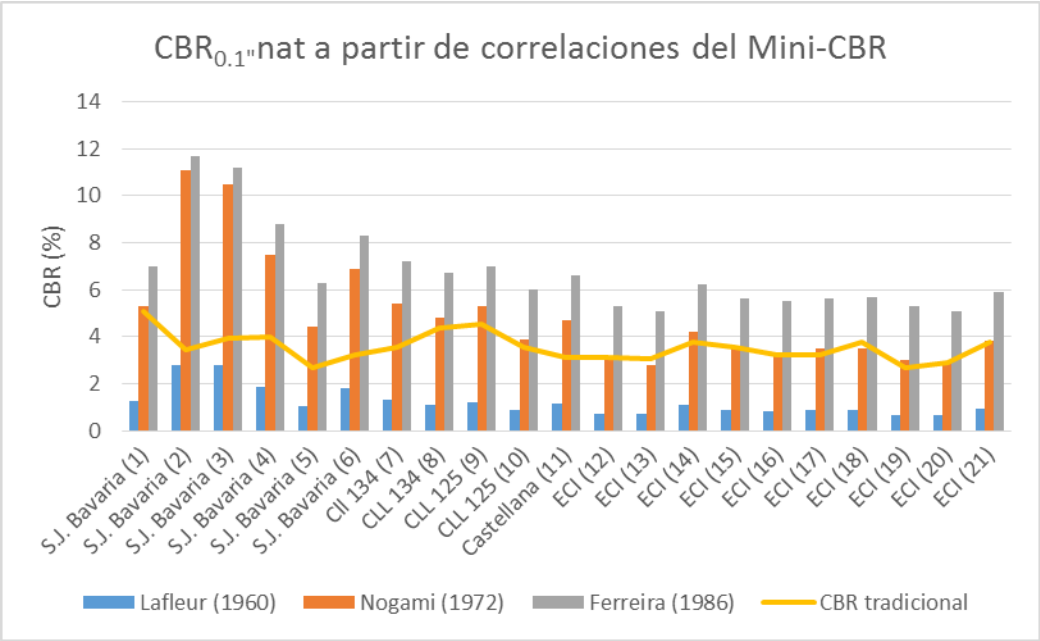


Figura 5-37: Variación de los resultados de $CBR_{0.1"}$natural obtenidos a partir de las correlaciones existentes del Mini-CBR

Fuente: Elaboración propia.

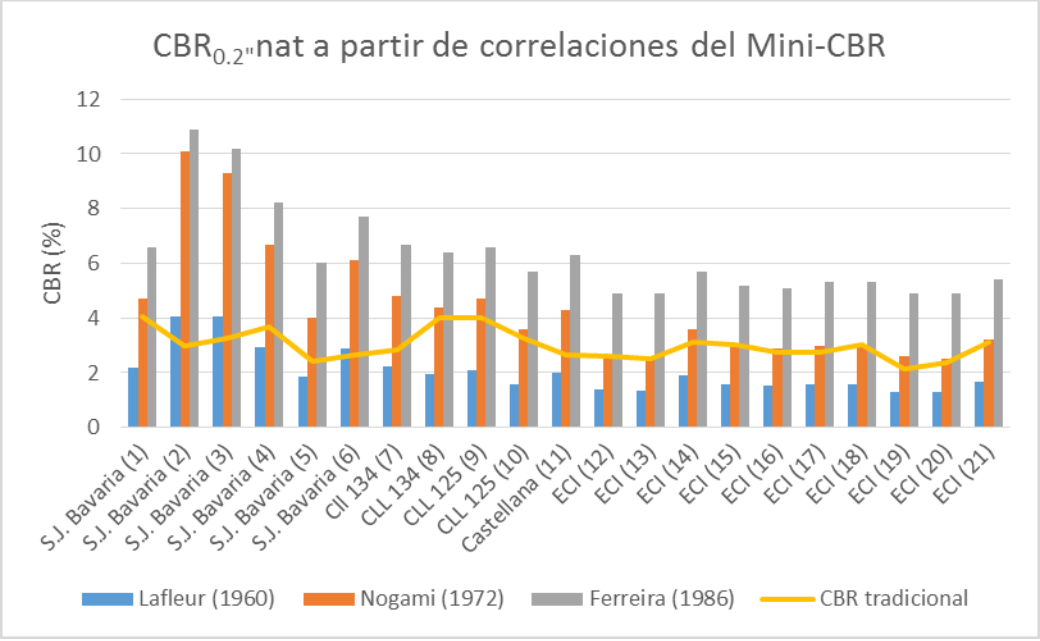


Figura 5-38: Variación de los resultados de $CBR_{0.2"}$natural obtenidos a partir de las correlaciones existentes del Mini-CBR

Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas de la Figura 5-39 a la Figura 5-44 se presenta la comparación entre los valores de CBR obtenidos a partir del ensayo de Mini CBR y el valor de CBR de laboratorio para cada uno de los autores exceptuando a Marson (2004) por lo mencionado anteriormente. Tal y como se ha desarrollado durante todo el informe, el análisis se realizará para los 4 grupos: Todas las muestras, muestras MH, San José de Bavaria y ECI.

5.6.1.1.1 Lafleur (1960)

En la Figura 5-39 se presentan los resultados para el $CBR_{0.1"}$ y en la Figura 5-40 los resultados para el $CBR_{0.2"}$.

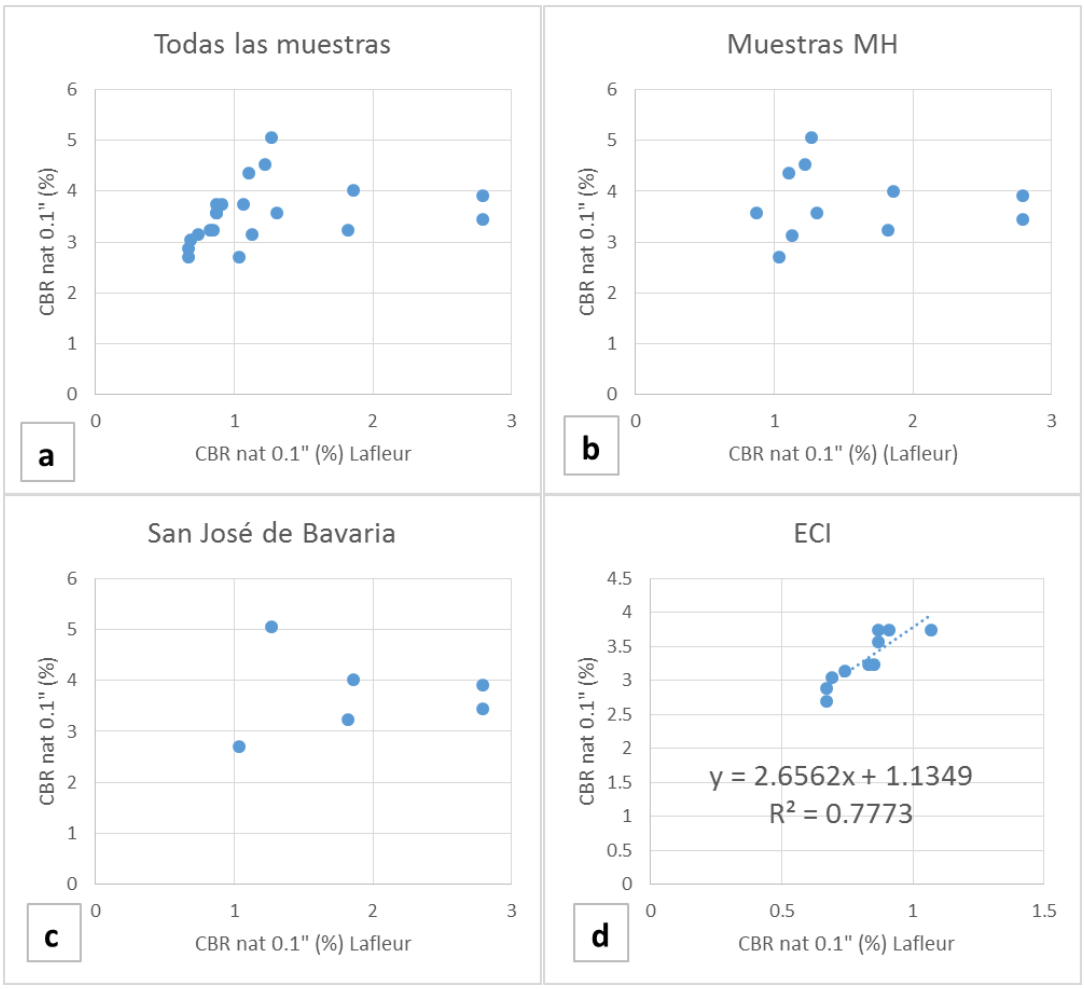


Figura 5-39: Correlaciones CBR (Lafleur, 1960) y el CBR 0.1" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

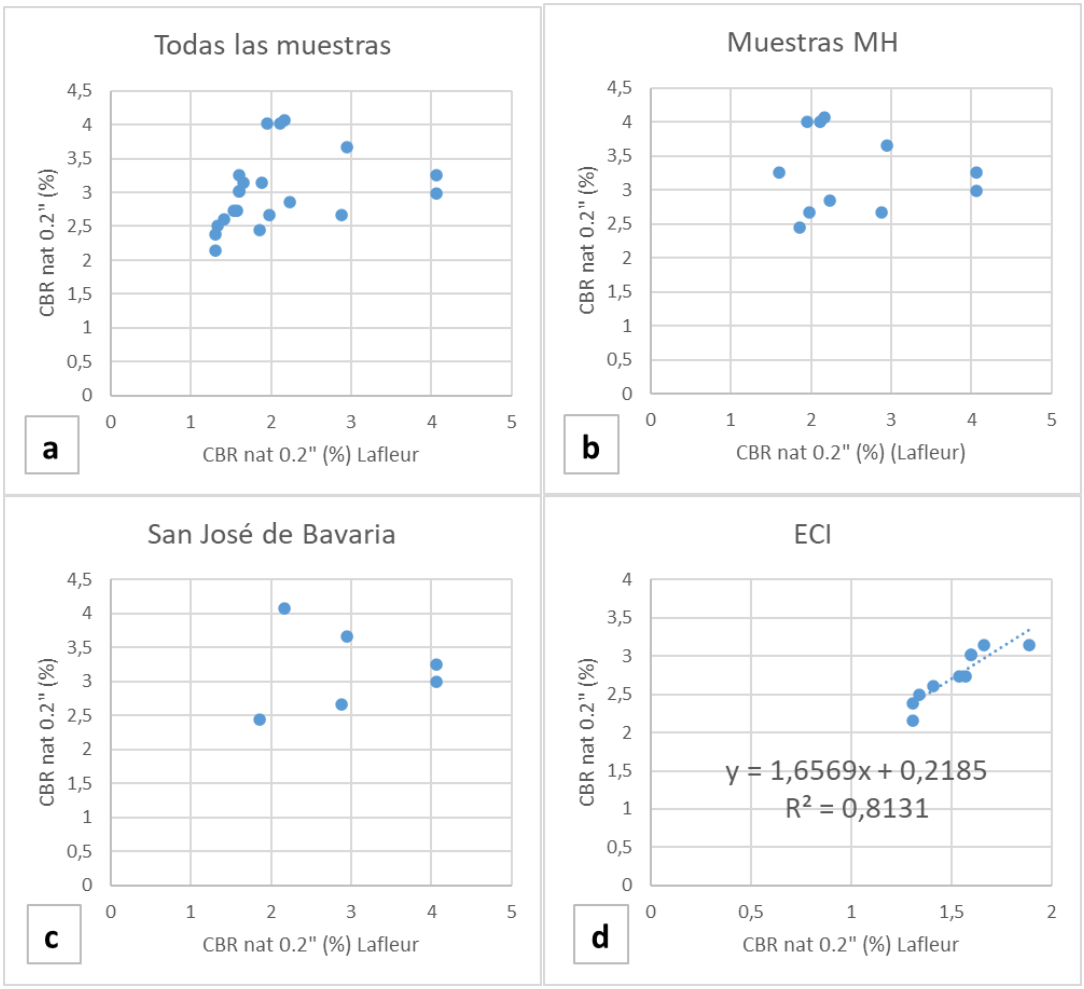


Figura 5-40 Correlaciones CBR (Lafleur, 1960) y el CBR 0.2" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las gráficas anteriores se puede observar que hay una gran dispersión en los valores obtenidos para tres de los grupos. Para las muestras extraídas en la ECI si se puede observar una buena correlación entre las variables analizadas, sin embargo, es importante tener en cuenta que se trata de una correlación sobre una correlación.

A continuación, se presenta la ecuación encontrada para el $CBR_{0.1"}$.

$$CBR_{0.1"}\ (\%) = 2.6562 * CBR_{0.1"\ Lafleur}(\%) + 1.1349, R^2 = 0.777$$

Ecuación 5-12

Donde

$$\log CBR_{0.1"\ Lafleur} = 1.1035 * \log IBV - 0.975$$

IBV: Carga en kg para una penetración de 0.06 in

La ecuación encontrada para el $CBR_{0.2"}$ es la siguiente:

$$CBR_{0.2"}\ (\%) = 1.6569 * CBR_{0.2"\ Lafleur}(\%) + 0.2185, R^2 = 0.813$$

Ecuación 5-13

Donde

$$\log CBR_{0.2"\ Lafleur} = 0.878 * \log IBV - 0.516$$

IBV: Carga en kg para una penetración de 0.06 in

5.6.1.1.2 Nogami (1972)

En la Figura 5-41 se presentan los resultados para el $CBR_{0.1"}$ y en la Figura 5-42 los resultados para el $CBR_{0.2"}$:

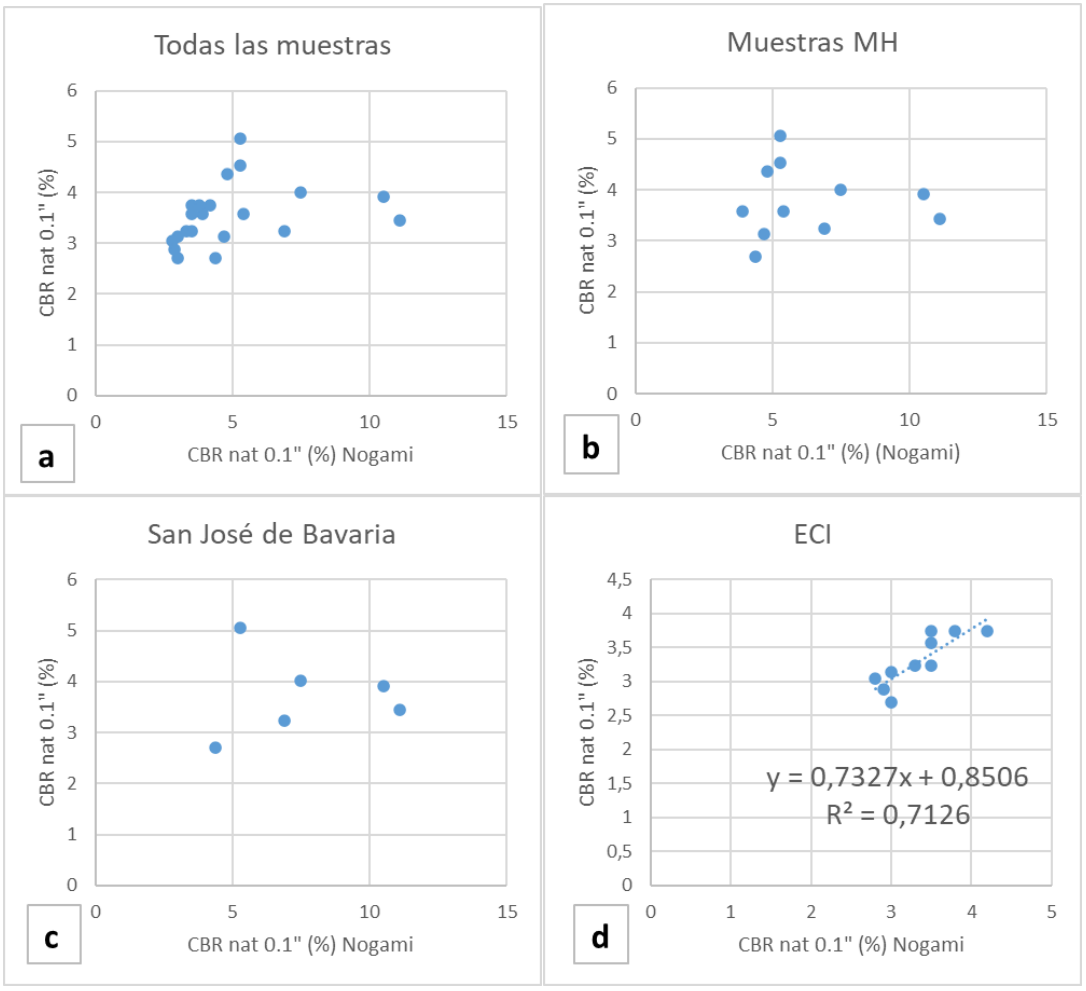


Figura 5-41: Correlaciones CBR (Nogami, 1972) y el CBR 0.1" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

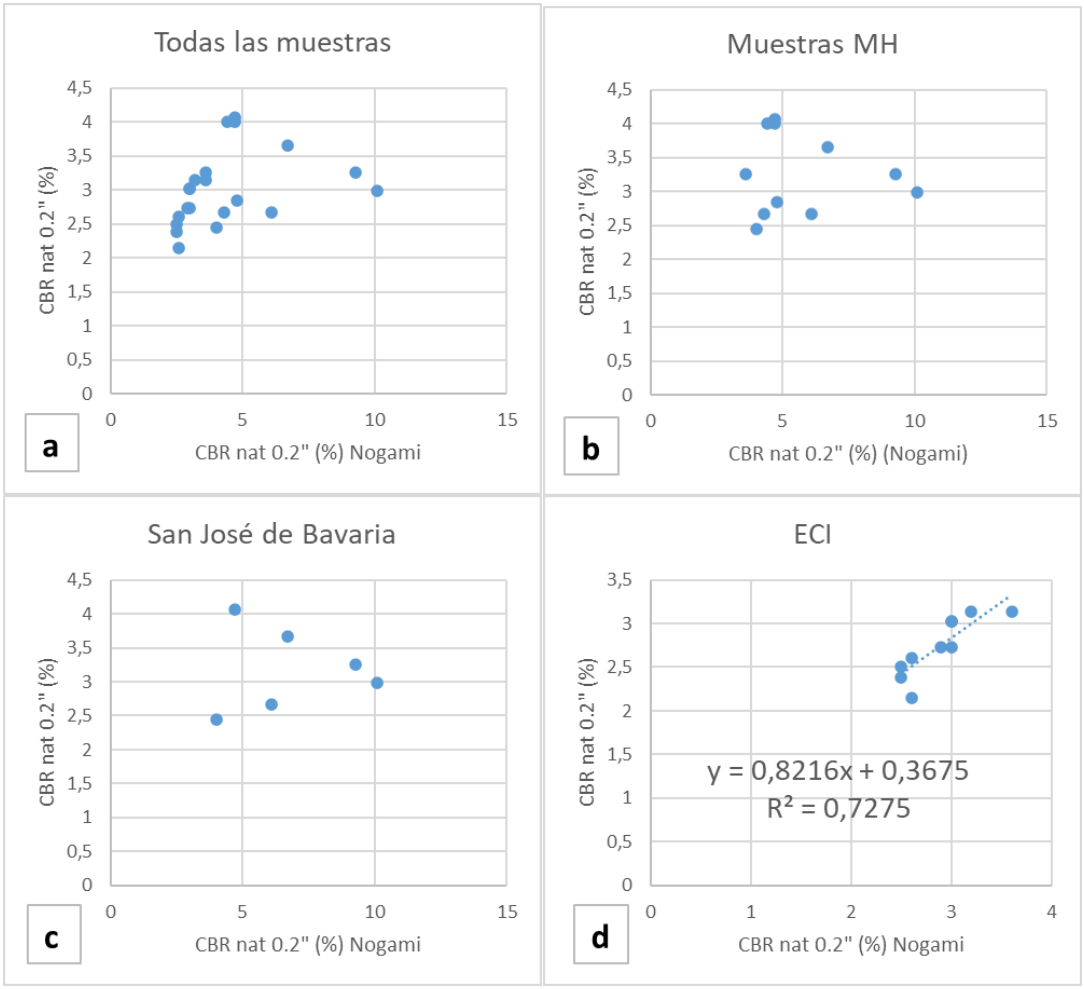


Figura 5-42: Correlaciones CBR (Nogami, 1972) y el CBR 0.2" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las gráficas anteriores se puede observar que hay una gran dispersión en los valores obtenidos para tres de los grupos. Para las muestras extraídas en la ECI si se puede observar una buena correlación entre las variables analizadas, sin embargo, es importante tener en cuenta que se trata de una correlación sobre una correlación.

A continuación, se presenta la ecuación encontrada para el $CBR_{0.1"}$.

$$CBR_{0.1"}\ (\%) = 0.7327 * CBR_{0.1"\ Nogami}(\%) + 0.8506, R^2 = 0.713$$

Ecuación 5-14

Donde

$$\log CBR_{0.1"\ Nogami} = -0.254 * \log(C1 * 0.896)$$

$C1$: Carga en kg para una penetración de 2.0 mm

La ecuación encontrada para el $CBR_{0.2"}$ es la siguiente:

$$CBR_{0.2"}\ (\%) = 0.8216 * CBR_{0.2"\ Nogami}(\%) + 0.3675, R^2 = 0.727$$

Ecuación 5-15

Donde

$$\log CBR_{0.2"\ Nogami} = -0.356 * \log(C2 * 0.937)$$

IBV: Carga en kg para una penetración de 2.5 mm

5.6.1.1.3 Ferreira (1986)

En la Figura 5-43 se presentan los resultados para el $CBR_{0.1"}$ y en la Figura 5-44 los resultados para el $CBR_{0.2"}$:

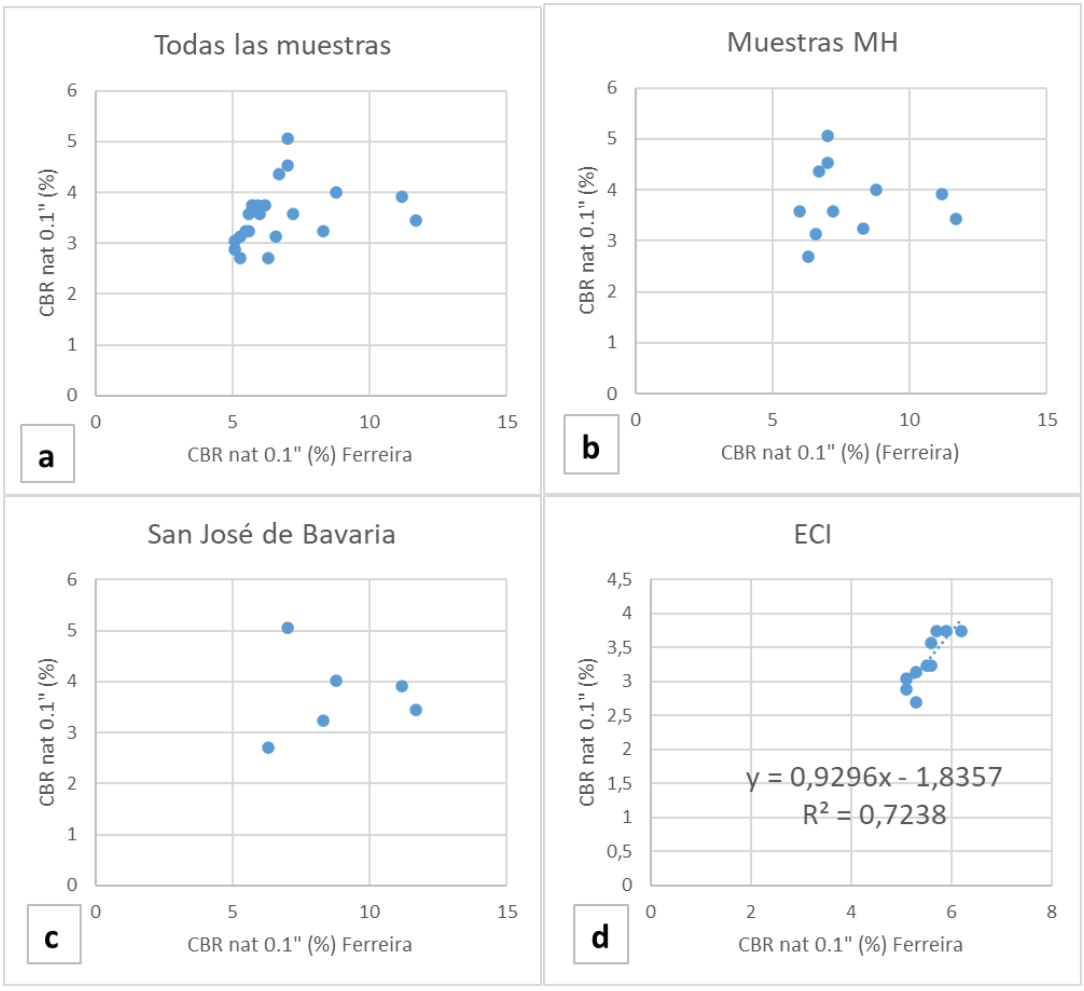


Figura 5-43: Correlaciones CBR (Ferreira, 1986) y el CBR 0.1" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

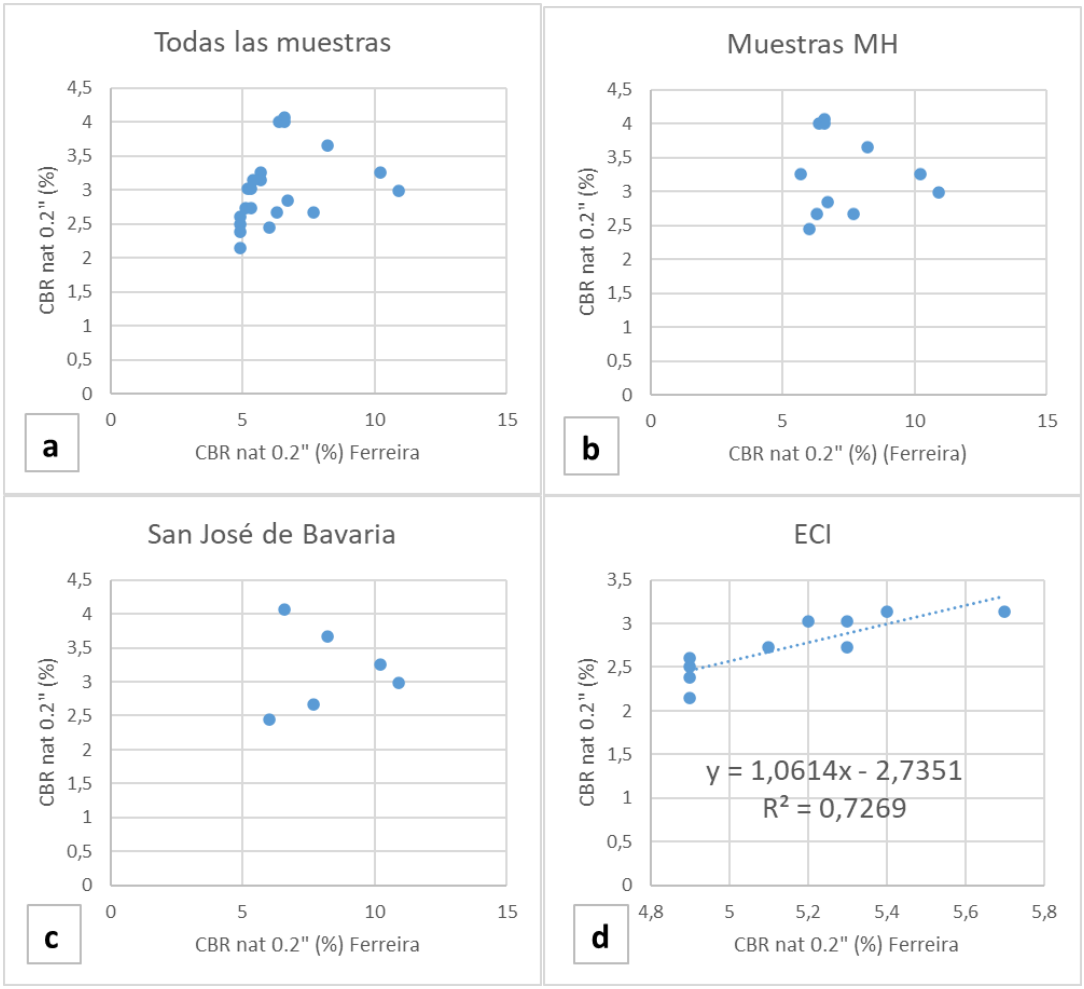


Figura 5-44: Correlaciones CBR (Ferreira, 1986) y el CBR 0.2" natural. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las gráficas anteriores se puede observar que hay una gran dispersión en los valores obtenidos para tres de los grupos. Para las muestras extraídas en la ECI si se puede observar una buena correlación entre las variables analizadas, sin embargo, el autor plantea una correlación a partir del valor de CBR obtenido por Nogami.

A continuación, se presenta la ecuación encontrada para el $CBR_{0.1"}$.

$$CBR_{0.1"}\ (\%) = 0.9296 * CBR_{0.1"\ Ferreira}(\%) - 1.8357, R^2 = 0.724$$

Ecuación 5-16

Donde

$$CBR_{0.1"\ Ferreira} = 0.788 * CBR_{0.1"\ Nogami}(\%) + 2.893$$

La ecuación encontrada para el $CBR_{0.2"}$ es la siguiente:

$$CBR_{0.2"}\ (\%) = 1.0614 * CBR_{0.2"\ Ferreira}(\%) - 2.7351, R^2 = 0.727$$

Ecuación 5-17

Donde

$$CBR_{0.2"\ Ferreira} = 0.788 * CBR_{0.2"\ Nogami}(\%) + 2.893$$

5.6.1.1.4 Comparación ecuaciones existentes

Como se pudo apreciar en las gráficas presentadas, solo se obtuvieron buenas correlaciones para las muestras extraídas en la ECI presentando unos buenos coeficientes de correlación (R^2). A continuación, se presenta el resumen de los coeficientes para cada autor.

Tabla 5-27: Coeficientes de correlación para las ecuaciones existentes del CBR natural a partir del Mini-CBR

	Lafleur (1960)		**Nogami (1972)**		**Ferreira (1986)**	
	CBR 0.1"	CBR 0.2"	CBR 0.1"	CBR 0.2"	CBR 0.1"	CBR 0.2"
R^2	0.777	0.813	0.713	0.727	0.724	0.727

Fuente: Elaboración propia.

En general los coeficientes son similares pero se observa una mejor correlación con la ecuación determinada por Lafleur et al., (1960), lo anterior concuerda con el tipo de material analizado ya que él empleó arcillas blandas de Iowa mientras que los demás autores ensayaron suelos lateríticos en Brasil.

5.6.1.2 *Determinación del CBR con inmersión a partir del ensayo Mini-CBR*

Tabla 5-28: Valores de CBR obtenidos a partir del ensayo Mini-CBR para diferentes autores.

Valores de CBR obtenidos a partir del ensayo de Mini-CBR luego de inmersión									
Exploración		Lafleur (1960)		Nogami (1972)		Ferreira		Marson (2004)	
		CBR 0.1"	CBR 0.2"	CBR 0.1"	CBR 0.2"	CBR 0.1"	CBR 0.2"	CBR 0.1"	CBR 0.2"
S.J. Bavaria	**1**	1.84	1.43	4.8	4.4	6.7	6.3	-4.3	-4.3
S.J. Bavaria	**2**	1.94	1.55	5.1	4.7	6.9	6.6	-3.9	-3.9
S.J. Bavaria	**3**	1.09	0.73	2.7	2.4	5	4.8	-7.5	-7.5
S.J. Bavaria	**4**	1.86	1.48	4.9	4.5	6.7	6.4	-4.2	-4.2
S.J. Bavaria	**5**	0.89	0.6	2.2	2	4.6	4.5	-8.3	-8.3
S.J. Bavaria	**6**	1.06	0.75	2.6	2.4	5	4.8	-7.6	-7.6
Cll 134 (1)	**7**	1.36	1.01	3.5	3.2	5.6	5.4	-6.4	-6.4
CLL 134 (2)	**8**	1.31	0.93	3.3	2.9	5.5	5.2	-6.6	-6.6
CLL 125 (1)	**9**	1.63	1.32	4.2	4	6.2	6.1	-5.2	-5.2
CLL 125 (2)	**10**	1.33	0.97	3.4	3	5.6	5.3	-6.5	-6.5
Castellana	**11**	1.67	1.28	4.3	3.9	6.3	6	-5.1	-5.1
ECI	**12**	0.75	0.48	1.8	1.6	4.3	4.2	-8.9	-8.9
ECI	**13**	0.63	0.37	1.5	1.3	4.1	3.9	-9.4	-9.4
ECI	**14**	0.78	0.48	1.9	1.6	4.4	4.2	-8.8	-8.8
ECI	**15**	0.66	0.39	1.6	1.4	4.1	4	-9.2	-9.2
ECI	**16**	0.69	0.43	1.6	1.5	4.2	4.1	-9.1	-9.1
ECI	**17**	0.75	0.48	1.8	1.6	4.3	4.2	-8.9	-8.9
ECI	**18**	0.66	0.39	1.6	1.4	4.1	4	-9.2	-9.2
ECI	**19**	0.7	0.44	1.7	1.5	4.2	4.1	-9.1	-9.1
ECI	**20**	0.7	0.44	1.7	1.5	4.2	4.1	-9.1	-9.1
ECI	**21**	0.64	0.4	1.5	1.4	4.1	4	-9.3	-9.3

Fuente: Elaboración propia.

Tal y como sucedió con los resultados de las correlaciones del CBR a humedad natural, los valores obtenidos para el CBR con inmersión presentan una gran variabilidad en sus datos. Para esta condición del ensayo se repiten los valores negativos en la metodología de Marson (2004).

En la Figura 5-45 y la Figura 5-46 se presenta gráficamente los resultados obtenidos en la Tabla 5-26, se observa que todas las metodologías presentan tendencias similares en sus resultados pero que no coinciden de forma tan precisa con el comportamiento del ensayo tradicional. Adicionalmente, se encuentra una diferencia considerable entre el CBR tradicional y las 3 correlaciones existentes.

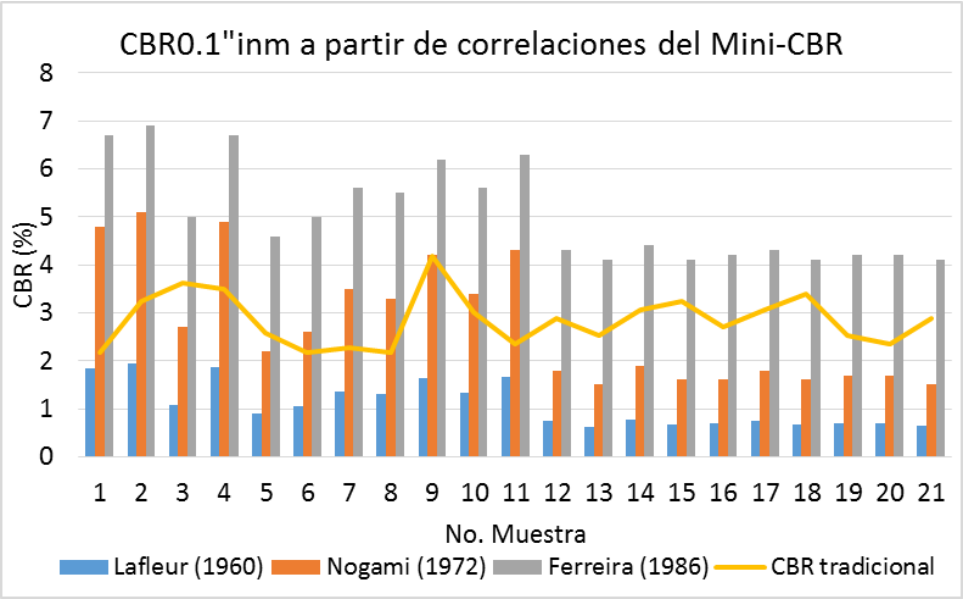


Figura 5-45: Variación de los resultados de $CBR_{0.1"}$ con inmersión obtenidos a partir de las correlaciones existentes del Mini-CBR

Fuente: Elaboración propia.

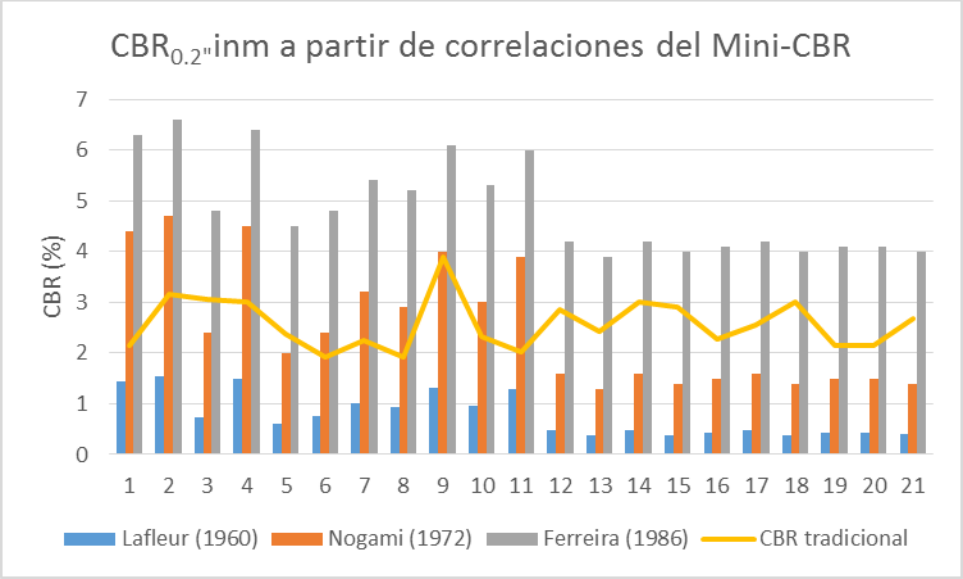


Figura 5-46: Variación de los resultados de $CBR_{0.2"}$ con inmersión obtenidos a partir de las correlaciones existentes del Mini-CBR

Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas de la Figura 5-44 a la Figura 5-52 se presenta la comparación entre los valores de CBR obtenidos a partir del ensayo de Mini CBR y el valor de CBR con inmersión de laboratorio para cada uno de los autores exceptuando a Marson (2004)

por lo mencionado anteriormente. Tal y como se ha desarrollado durante todo el informe, el análisis se realizará para los 4 grupos: Todas las muestras, muestras MH, San José de Bavaria y ECI.

5.6.1.2.1 Lafleur (1960)

En la Figura 5-47 se presentan los resultados para el $CBR_{0.1"}$ y en la Figura 5-48 los resultados para el $CBR_{0.2"}$.

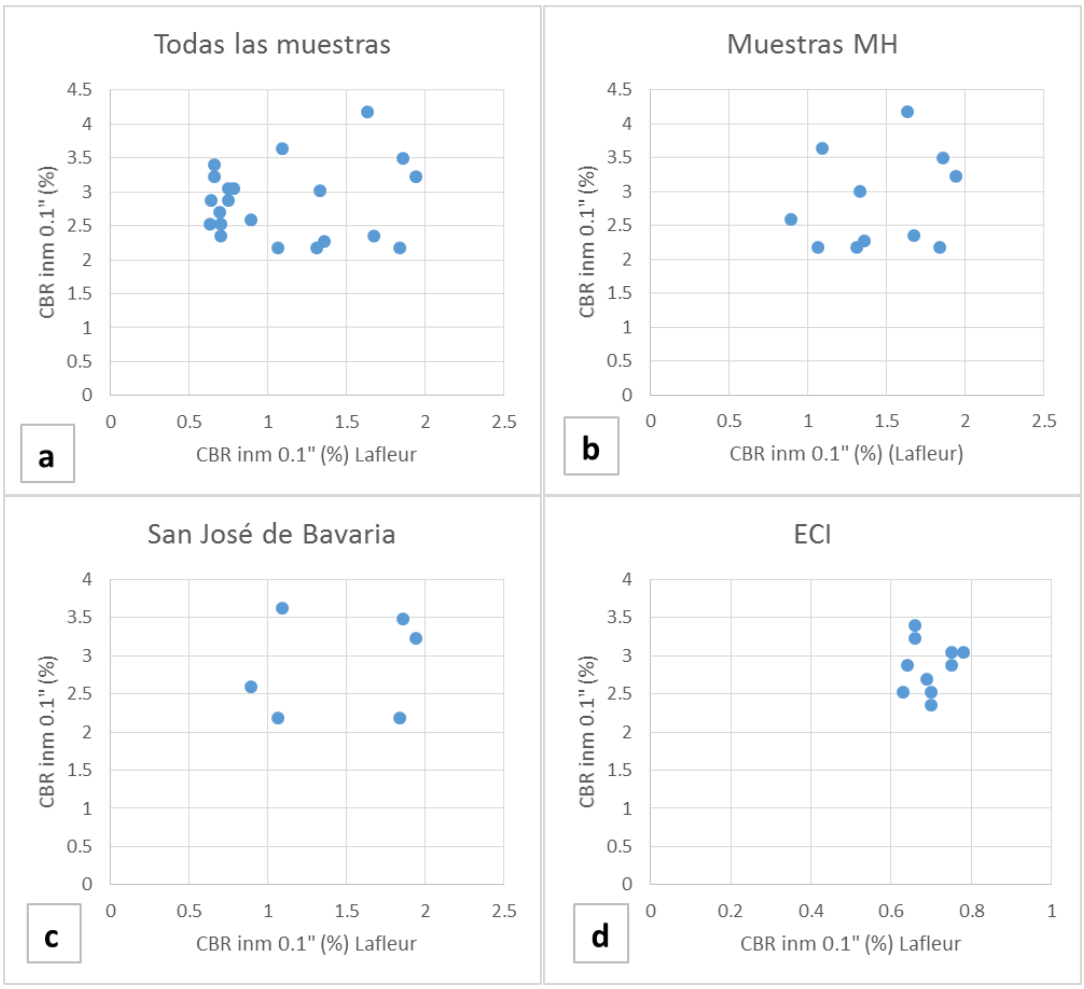


Figura 5-47: Correlaciones CBR (Lafleur, 1960) y el CBR 0.1" con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

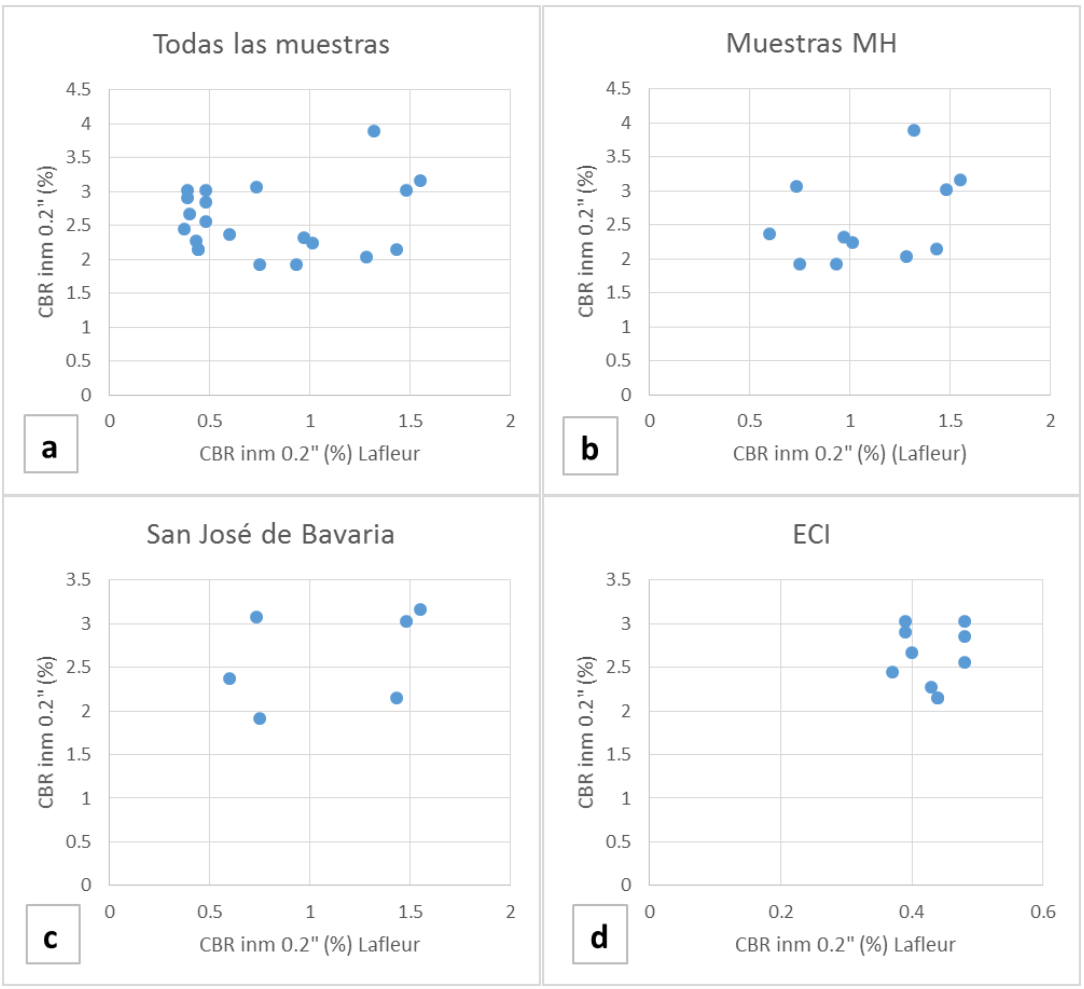


Figura 5-48: Correlaciones CBR (Lafleur, 1960) y el CBR 0.2" con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los datos obtenidos se puede apreciar en las gráficas que no existe correlación entre las variables analizadas debido a la dispersión de los resultados.

5.6.1.2.1 Nogami (1972)

En la Figura 5-49 se presentan los resultados para el $CBR_{0.1"}$ y en la Figura 5-50 los resultados para el $CBR_{0.2"}$.

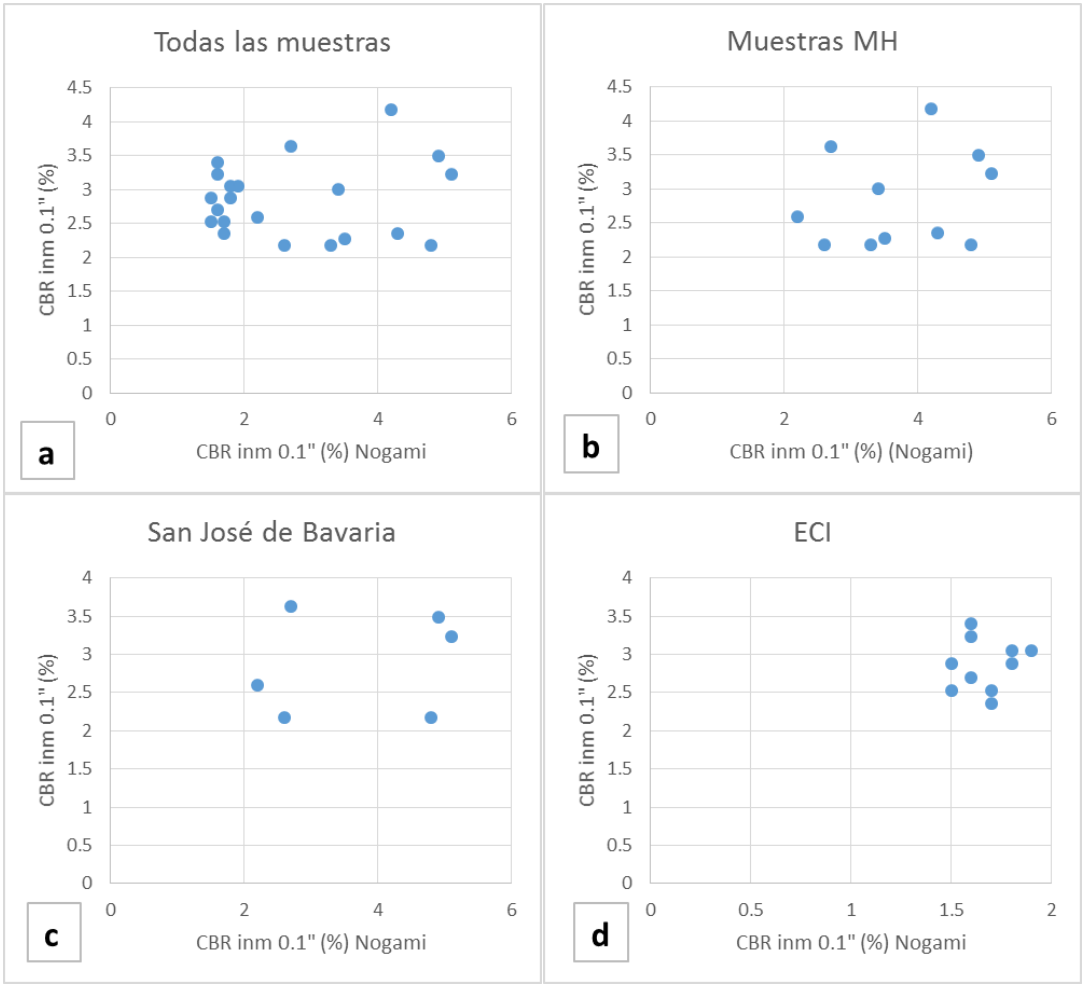


Figura 5-49: Correlaciones CBR (Nogami, 1960) y el CBR 0.1" con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

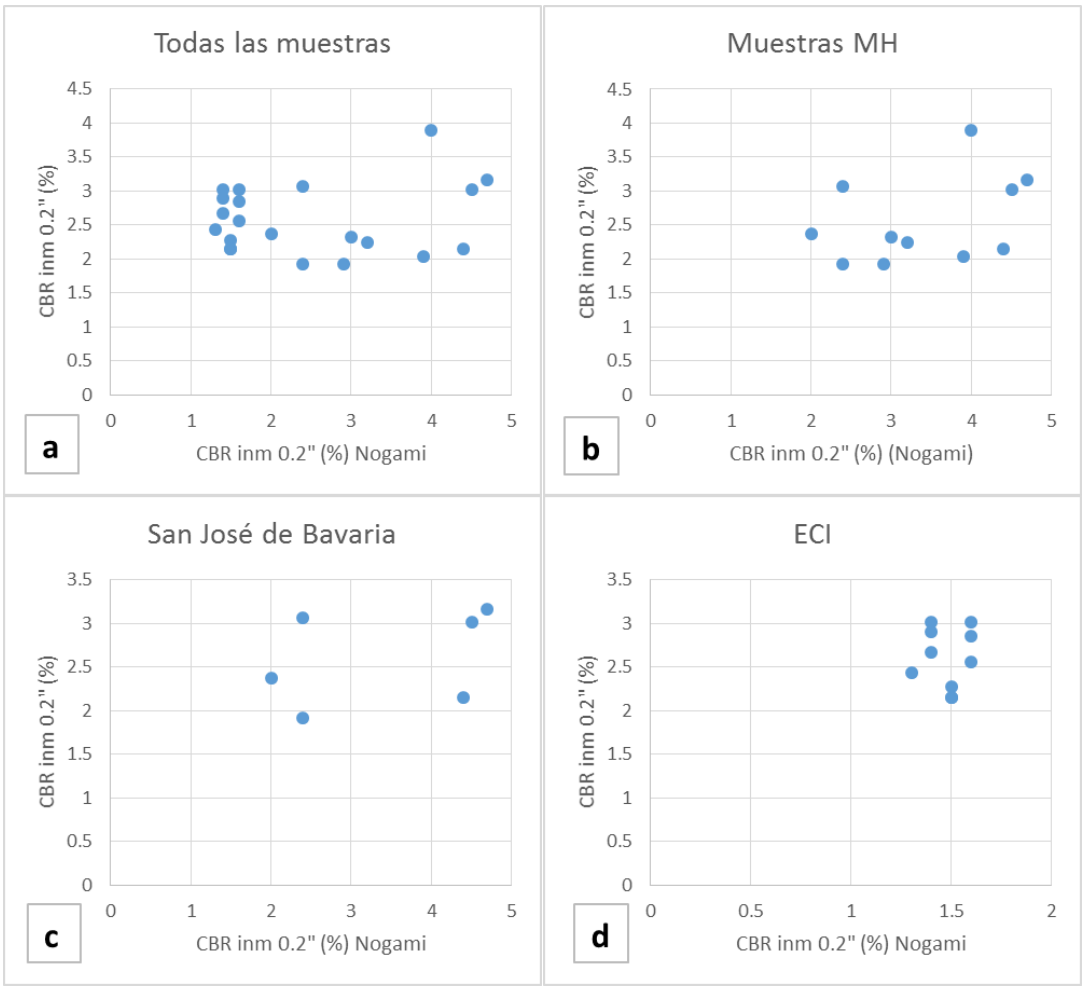


Figura 5-50 Correlaciones CBR (Nogami, 1960) y el CBR 0.2" con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar en las gráficas que no existe correlación entre las variables analizadas debido a la dispersión de los resultados.

5.6.1.2.1 Ferreira (1986)

En la Figura 5-51 se presentan los resultados para el $CBR_{0.1"}$ y en la Figura 5-52 los resultados para el $CBR_{0.2"}$.

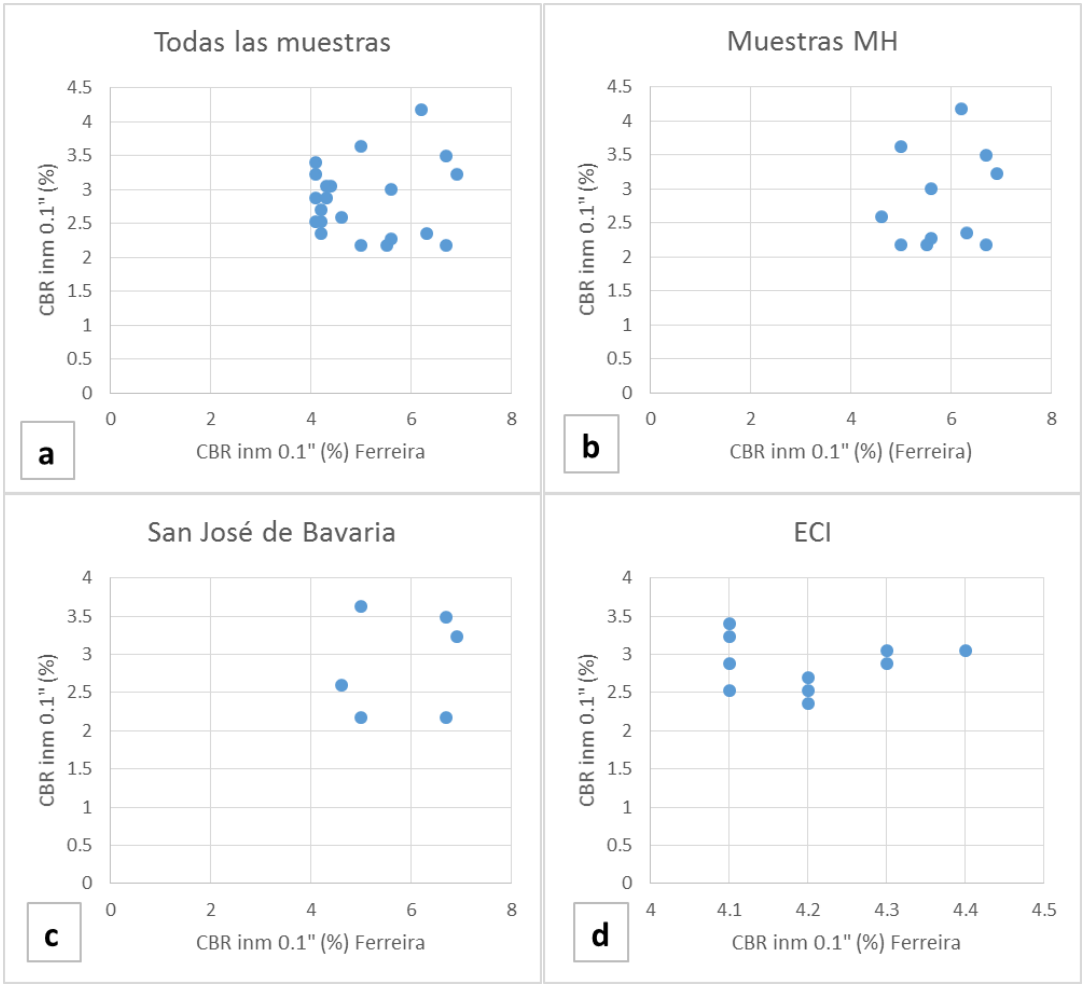


Figura 5-51: Correlaciones CBR (Ferreira, 1986) y el CBR 0.1" con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

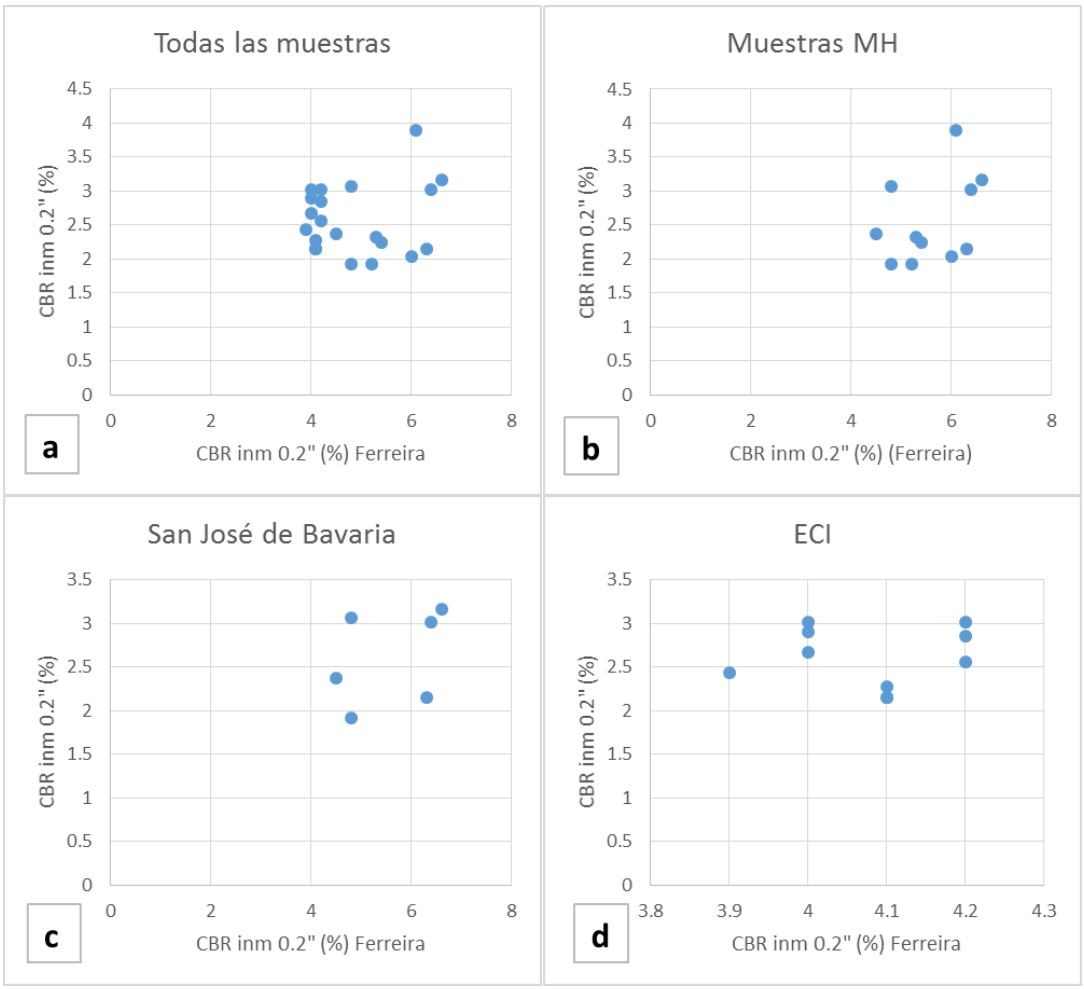


Figura 5-52: Correlaciones CBR (Ferreira, 1986) y el CBR 0.2" con inmersión. (a) Todas las muestras, (b) Muestras MH, (c) Lote San José de Bavaria y (d) ECI.

Fuente: Elaboración propia.

Tal y como sucedió con los otros autores, no fue posible establecer una correlación entre las variables analizadas.

5.6.1.2.1 Comparación ecuaciones existentes

De acuerdo con las gráficas presentadas, se puede observar que ninguna de las ecuaciones existentes en la literatura presenta una correlación adecuada a la hora de calcular el CBR con inmersión a partir del ensayo de Mini-CBR.

5.6.2. Determinación de una correlación particular del CBR mediante el ensayo Mini-CBR.

Una vez analizadas las ecuaciones de correlación existentes para los ensayos y con base en los resultados obtenidos, en los que solo se encuentran correlaciones para las muestras de la ECI a humedad natural, se procede a analizar los datos de las 21 muestras ensayadas con el fin de determinar una correlación específica para los suelos lacustres blandos de Bogotá.

5.6.2.1 *Cargas del ensayo Mini-CBR vs CBR*

En primera instancia se buscó una relación de la misma forma en la que los investigadores anteriores abordaron el Mini-CBR, encontrar una correlación entre las cargas obtenidas para el ensayo Mini-CBR y el valor del CBR obtenido en el ensayo tradicional.

El análisis se realizó para los 4 grupos de estudio del presente trabajo, por cada grupo se realizaron 3 comparaciones: Carga vs CBR, LOG (carga) vs CBR y carga vs LOG (CBR), cada una de estas combinaciones se hizo tanto para el $CBR_{0.1"}$ como para el $CBR0_{.2"}$. La selección de estas comparaciones se determinó con base en los resultados de las investigaciones existentes en la literatura.

Teniendo en cuenta que durante el ensayo de Mini-CBR se registran los valores de carga para 13 deformaciones diferentes y que se realiza el análisis para las 3 combinaciones mencionadas anteriormente, se tienen un total de 78 gráficas (39 con $CBR_{0.1"}$ y 39 con $CBR0_{.2"}$) por cada grupo analizado en cada condición de inmersión; Al realizar la totalidad de las combinaciones planteadas, se tienen 624 gráficas de correlación entre las variables.

Con base en el excesivo número de gráficas se decidió presentar cuadros de resumen para los resultados obtenidos e incluir la totalidad de las gráficas en el anexo 4. A continuación, se presenta el resumen de los resultados obtenidos, es importante aclarar que los coeficientes de correlación (R^2) menores a 0.3 no fueron incluidos en las tablas.

5.6.2.1.1 Determinación del CBR en condición natural.

De todas las gráficas realizadas para las combinaciones y grupos analizados, únicamente se obtuvieron correlaciones para las muestras de la ECI, de la Tabla 5-29 a la Tabla 5-31 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos:

Tabla 5-29: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y el CBR, muestras de la ECI en condición natural.

ECI		
Carga en kg para una penetración de	**CBR**	
	0.1"	**0.2"**
0.25 mm	0.3852	0.4286
0.50 mm	0.4707	0.511
0.75 mm	0.7245	0.7861
1.00 mm	0.7804	0.8491
1.25 mm	0.8115	0.8539
1.50 mm	0.7848	0.8172
2.00 mm	0.7271	0.7378
2.50 mm	0.7136	0.7298
3.00 mm	0.6745	0.6992
3.50 mm	0.6437	0.6489
4.00 mm	0.6111	0.6096
4.50 mm	0.6222	0.611
5.00 mm	0.6177	0.6006

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-30: Coeficientes de correlación (R^2) entre el logaritmo de la carga del ensayo Mini-CBR y el CBR, muestras de la ECI en condición natural

ECI		
LOG(carga en kg) para una penetración de	CBR	
	0.1"	0.2"
0.25 mm	0.4121	0.4687
0.50 mm	0.4578	0.5096
0.75 mm	0.7137	0.7868
1.00 mm	0.7836	0.8491
1.25 mm	0.8334	0.8837
1.50 mm	0.8129	0.8493
2.00 mm	0.7447	0.7568
2.50 mm	0.734	0.7518
3.00 mm	0.6892	0.7148
3.50 mm	0.658	0.6631
4.00 mm	0.6235	0.6212
4.50 mm	0.6347	0.6225
5.00 mm	0.631	0.612

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-31: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y el logaritmo del CBR, muestras de la ECI en condición natural.

ECI		
Carga en kg para una penetración de	Log CBR	
	0.1"	0.2"
0.25 mm	0.4052	0.4502
0.50 mm	0.4868	0.5273
0.75 mm	0.7462	0.8048
1.00 mm	0.7977	0.8469
1.25 mm	0.8189	0.8509
1.50 mm	0.7797	0.797
2.00 mm	0.7102	0.7049
2.50 mm	0.6987	0.6997
3.00 mm	0.6597	0.6678
3.50 mm	0.6224	0.6115
4.00 mm	0.588	0.5703
4.50 mm	0.5976	0.5711
5.00 mm	0.5921	0.5608

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los coeficientes de correlación son altos para los tres casos, la mayoría tiene valores superiores a 0.6. La penetración a la que se obtienen los mejores resultados es de 1.25 mm y la mejor combinación es logaritmo de la carga contra CBR. A continuación, se presentan las ecuaciones determinadas:

$$CBR_{0.1"}\ (\%) = 5.0713 * \log(carga_{1.25mm}) - 0.594, R^2 = 0.8334$$

Ecuación 5-18

$$CBR_{0.2"}\ (\%) = 4.6209 * \log(carga_{1.25mm}) - 0.8108, R^2 = 0.8837$$

Ecuación 5-19

5.6.2.1.1 Determinación del CBR luego de inmersión.

De todas las gráficas realizadas para las combinaciones y grupos analizados, se obtuvieron correlaciones aceptables (Rehman et al., 2017) para las tres combinaciones de las muestras de la ECI y para una combinación de San José de Bavaria, de la Tabla 5-32 a la Tabla 5-35 se presentan los coeficientes de correlación mayores a 0.4 obtenidos:

Tabla 5-32: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y el CBR, muestras de la ECI luego de inmersión.

ECI		
Carga en kg para una penetración de	**CBR**	
	0.1"	**0.2"**
0.50 mm		0.425

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-33: Coeficientes de correlación (R^2) entre el logaritmo de la carga del ensayo Mini-CBR y el CBR, muestras de la ECI luego de inmersión

ECI		
LOG(carga en kg) para una penetración de	**CBR**	
	0.1"	**0.2"**
0.50 mm		0.4267

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-34: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y el logaritmo del CBR, muestras de la ECI luego de inmersión.

ECI		
Carga en kg para una penetración de	Log CBR	
	0.1"	0.2"
0.50 mm		0.4237

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-35: Coeficientes de correlación (R^2) entre el logaritmo de la carga del ensayo Mini-CBR y el CBR, muestras de S.J.B luego de inmersión

San José de Bavaria		
LOG(carga en kg) para una penetración de	CBR	
	0.1"	0.2"
0.25 mm		0.5084
0.50 mm		0.5083
0.75 mm		0.4701

Fuente: Elaboración propia.

A pesar que de acuerdo con el criterio de Rehman et al., (2017) establece que estos valores pueden ser aceptables se considera que son muy bajos para la presente investigación.

5.6.2.1 *Cargas del ensayo Mini-CBR vs Cargas del ensayo CBR*

Como segunda alternativa de correlación entre los ensayos se planteó la posibilidad de determinar la carga aplicada sobre el CBR para lograr una penetración de 2.54 mm y 5.08 mm a partir de las cargas del ensayo Mini-CBR. Para lograr lo anterior se realizó una gráfica comparativa entre cada una de las 13 cargas reportadas para el Mini-CBR con la carga del CBR para una penetración de 2.54mm, del mismo modo se compararon las 13 cargas del Mini-CBR con la carga del CBR para una penetración de 5.08mm. Los dos análisis mencionados anteriormente se hicieron para cada uno de los 4 grupos de estudio y tanto para la condición de humedad natural como para la muestra luego de inmersión.

Teniendo en cuenta lo anterior se tienen 26 gráficas por cada grupo y para cada condición de humedad, en total resultan 208 gráficas analizadas. Debido a la cantidad de información y su extensión se decidió presentarlos en el anexo 4 y no como parte del cuerpo del informe.

A partir de las cargas para lograr una penetración de 2.54 y 5.08 mm se puede determinar el CBR de la siguiente forma:

$$CBR_{2.54mm} = \frac{\frac{(Carga_{2.54mm}) * 9.81 \ \frac{m}{s^2}}{1935.32 \ mm^2}}{6.89 \ MPa}$$

Ecuación 5-20

$$CBR_{5.08mm} = \frac{\frac{(Carga_{2.54mm}) * 9.81 \ \frac{m}{s^2}}{1935.32 \ mm^2}}{10.34 \ MPa}$$

Ecuación 5-21

En caso de encontrar correlaciones aceptables para determinar la carga, serán reemplazadas en la Ecuación 5-20 y la Ecuación 5-21.

A continuación, se presenta el resumen de los resultados obtenidos, es importante aclarar que los coeficientes de correlación (R^2) menores a 0.3 no fueron incluidos en las tablas.

5.6.2.1.1 Determinación del CBR en condición natural.

Únicamente se obtuvieron correlaciones aceptables para las muestras de la ECI (CH), en la Tabla 5-36 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos:

Tabla 5-36: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y la carga necesaria para alcanzar una penetración de 2.54 y 5.08mm en el ensayo CBR, muestras de la ECI en condición natural.

ECI - Humedad Natural		
Carga en kg para una penetración de	**Carga (kg) en el ensayo tradicional de CBR para una penetración de**	
	0.1"	**0.2"**
0,25 mm	0,3794	0,3537
0,50 mm	0,4344	0,4507
0,75 mm	0,6629	0,7318
1,00 mm	0,7049	0,8007
1,25 mm	0,7284	0,8325
1,50 mm	0,7068	0,8114
2,00 mm	0,6637	0,7533
2,50 mm	0,6484	0,7543
3,00 mm	0,6178	0,7226
3,50 mm	0,5811	0,6801
4,00 mm	0,5461	0,6466
4,50 mm	0,5558	0,6538
5,00 mm	0,55	0,6492

Fuente: Elaboración propia.

La penetración en el ensayo Mini-CBR a la que se obtienen los mejores resultados es de 1.25 mm lo cual coincide con los análisis anteriores. A continuación, se presentan las ecuaciones determinadas:

$$Carga_{CBR_{2.54mm}}\ (kg) = 4.6704 * Carga_{Mini-CBR_{1.25mm}} + 16{,}695, R^2 = 0.7284$$

Ecuación 5-22

$$Carga_{CBR_{5.08mm}}\ (kg) = 6.9147 * Carga_{Mini-CBR_{1.25mm}} + 14{,}385, R^2 = 0.8325$$

Ecuación 5-23

Reemplazando la Ecuación 5-22 y Ecuación 5-23 en la Ecuación 5-20 y la Ecuación 5-21 se obtienen las siguientes expresiones:

$$CBR\ nat_{2.54mm} = \frac{\frac{(4.6704 * Carga_{Mini-CBR_{1.25mm}} + 16{,}695) * 9.81\ \frac{m}{s^2}}{1935.32\ mm^2}}{6.89\ MPa}, R^2 = 0.7284$$

Ecuación 5-24

$$CBR\ nat_{5.08mm} = \frac{\frac{(6.9147 * Carga_{Mini-CBR_{1.25mm}} + 14{,}385) * 9.81\ \frac{m}{s^2}}{1935.32\ mm^2}}{10.34\ MPa}, R^2 = 0.8325$$

Ecuación 5-25

5.6.2.1.2 Determinación del CBR luego de inmersión.

De todas las gráficas realizadas para las combinaciones y grupos analizados, solamente se obtuvieron correlaciones mayores a 0.4 para las muestras de la ECI (CH) y las muestras de San José de Bavaria, en la Tabla 5-37 y la Tabla 5-38 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos:

Tabla 5-37: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y la carga necesaria para alcanzar una penetración de 2.54 y 5.08mm en el ensayo CBR, muestras de San José de Bavaria luego de inmersión.

S.J. BAVARIA - Luego de inmersión		
Carga en kg para una penetración de	**Carga (kg) en el ensayo tradicional de CBR para una penetración de**	
	0.1"	**0.2"**
0.25 mm	0.3318	0.5106
0.50 mm	0.3274	0.5108
0.75 mm		0.4725
1.00 mm		0.3156

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-38: Coeficientes de correlación (R^2) entre la carga del ensayo Mini-CBR y la carga necesaria para alcanzar una penetración de 2.54 y 5.08mm en el ensayo CBR, muestras de la ECI luego de inmersión.

ECI - Luego de inmersión		
Carga en kg para una penetración de	**Carga (kg) en el ensayo tradicional de CBR para una penetración de**	
	0.1"	**0.2"**
0.25 mm	0.2767	0.3002
0.50 mm	0.3351	0.4205
0.75 mm	0.2307	0.291

Fuente: Elaboración propia.

A pesar que de acuerdo con el criterio de Rehman et al., (2017) establece que estos valores pueden ser aceptables se considera que son muy bajos para la presente investigación.

5.6.3. Resumen de las correlaciones encontradas

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que los coeficientes de correlación más altos se tienen para las arcillas de alta compresibilidad (CH) de la ECI con valores por el orden de R^2=0.8.

Las muestras de San José de Bavaria obtuvieron algunos coeficientes que marcan una posible tendencia entre los dos ensayos sin llegar a ser una correlación buena.

Las ecuaciones existentes en la literatura para determinar el CBR a partir del ensayo del Mini-CBR no arrojaron valores directos de CBR similares a los obtenidos. Sin embargo, al graficar esas dos variables se puede determinar una correlación.

De acuerdo con los resultados obtenidos se obtuvo que la mejor forma de correlacionar los ensayos es mediante una comparativa LOG ($carga_{Mini\text{-}CBR}$) vs CBR, lo anterior coincide con la premisa utilizada por otros autores para determinar sus correlaciones.

5.6.4. Determinación del Mr a partir del ensayo Mini-CBR

Tal y como se realizó para el CBR, se buscó establecer una correlación entre las cargas necesarias para alcanzar las penetraciones establecidas del ensayo Mini-CBR y el valor del MR para los 4 grupos de estudio. El Mr empleado en esta comparación fue el determinado como el límite inferior del intervalo para una confiabilidad del 95% (Menor valor de Mr determinado en los intervalos).

La metodología seguida fue la siguiente: se graficaron en el eje x las cargas del ensayo Mini-CBR para una misma penetración en cada muestra y en el eje Y los valores del Mr para esa misma muestra, así se continuó sucesivamente para cada una de las penetraciones establecidas.

En total se realizaron 52 gráficas correspondientes a 13 penetraciones evaluadas del Mini-CBR por cada uno de los 4 grupos analizados, dada su extensión se presentan en el anexo 4.

Una vez revisadas todas las comparaciones entre las variables se puede observar que no existe ninguna correlación aceptable entre las cargas del Mini-CBR y el Mr con una confiabilidad del 95%.

5.7 Análisis de costos del ensayo Mini-CBR

Dado que el ensayo Mini-CBR hace parte del conjunto de ensayos miniatura para la clasificación MCT en Brasil, no es posible encontrar su valor en los laboratorios. Teniendo en cuenta lo anterior, se determinó el valor que tendría este ensayo comercialmente a partir de la metodología presentada en el documento. El siguiente análisis se hace basado en el manual de tarifas de arrendamiento para equipos de construcción (Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2009).

5.7.1. Rendimiento horas-hombre

Es necesario determinar cuántas horas requiere un operario para ejecutar el ensayo, para este ítem se contempló tanto el tallado de la muestra como la ejecución del ensayo. El tiempo será establecido como el promedio de los tiempos requeridos para los 21 ensayos realizados tal y como se presenta en la Tabla 5-39.

Tabla 5-39: Tiempo requerido para ejecutar los ensayos Mini-CBR

Duración del ensayo Mini-CBR (min)	
Muestra	**Penetración**
1	3.1
2	3
3	2.9
4	2.9
5	3.2
6	3.1
7	2.6
8	2.5
9	3.5
10	3
11	3.2
12	3.1
13	2.8
14	2.6
15	3.1
16	3.1
17	3.2
18	3.3
19	3.5
20	2.8
21	2.7
Promedio	3.0
Total (h)	**0.05**

Fuente: Elaboración propia

Los tiempos presentados anteriormente corresponden a una sola penetración de la muestra, este valor debe ser multiplicado por 2 ya que también se hace el ensayo a una muestra luego de su inmersión.

5.7.2. Equipos y Herramientas

En la Tabla 5-40 se presenta la lista de equipos y herramientas necesarios para el ensayo con sus respectivos precios comerciales.

Tabla 5-40: Costos comerciales equipos y herramientas para el ensayo Mini-CBR

Equipo / Herramienta	Precio
Máquina multiensayos	$ 34.921.315
Transductor de desplazamiento (25 mm)	$ 3.775.122
Sujetador para transductor de desplazamiento	$ 284.427
Anillo de carga 4.5 kN	$ 1.851.361
Molde Mini-CBR	$ 250.000
Pistón de penetración	$ 120.000
Montaje para inmersión	$ 200.000
Sobrecargas	$ 80.000
Horno de laboratorio	$ 5.593.000
Balanza de precisión	$ 9.134.369

Fuente: Elaboración propia

5.7.3. Tarifa horaria

Representa el costo generado por el equipo en una unidad de tiempo determinada (año, hora). El costo se divide en costos directos e indirectos, los primeros son en función de los gastos fijos (amortización, tasa de interés, seguros, vida útil, seguros, reparaciones y gastos anuales) y los gastos de operación, los costos indirectos corresponden a la administración, imprevistos y utilidad (AIU) (Bojacá Torres, 2019).

5.7.3.1 *Costos Directos*

5.7.3.1.1 Costos de propiedad

Los costos de propiedad incluyen la depreciación, los seguros, los intereses y los impuestos. La depreciación de un equipo/herramienta es constante para una unidad de tiempo (año, hora, etc...) y se determina dividiendo el valor neto entre la vida útil.

$$Depreciación = \frac{Valor\ neto}{Vida\ útil}$$

Ecuación 5-26

La vida útil para maquinaria y equipos es de 10 años de acuerdo con el artículo 137 del Estatuto tributario Nacional. Teniendo en cuenta que estos equipos se miden por horas, es necesario calcular las horas que puede trabajar el equipo, para lo anterior se calcula el número de horas anuales de disponibilidad del equipo por la vida útil:

$$Vida\ útil\ (horas) = Horas\ anuales * vida\ útil\ (años)$$

$$Vida\ útil\ (horas) = Horas\ anuales * 10$$

Ecuación 5-27

Donde,

$$Horas\ anuales = 52\ semanas * 40\ horas = 2080\ horas/año$$

Ecuación 5-28

El valor neto que se va a depreciar se define como el precio comercial del equipo menos el valor de salvamento, el cual representa el valor estimado del equipo cuando se termine de depreciar. Un valor típico para el valor de salvamento en maquinaria y equipos es del 10% del costo de compra del activo.

$$Valor\ neto = Precio\ comercial * 0.9$$

Ecuación 5-29

Los impuestos, intereses y seguros se calculan teniendo en cuenta los intereses comerciales anuales y las tasas de seguros vigentes. Para la determinación de la ecuación presentada por Bojacá Torres, (2019) se asume un interés comercial anual del 14.21% y una tarifa de seguros del 7.2% anual para determinar el factor 0.2148, estos valores son recomendaciones de la Cámara Colombiana de la Infraestructura.

$$Impuestos, intereses\ y\ seguros = \frac{0.2148 * Valor\ neto\ a\ depreciar}{Vida\ útil\ en\ horas}$$

Ecuación 5-30

Finalmente, se puede determinar que los costos totales de propiedad son la suma de la depreciación con los intereses, impuestos y seguros.

5.7.3.1.2 Costos de operación

Para determinar los costos de operación se suman los valores por hora de: mano de obra, servicios y mantenimiento y reparaciones.

- *Mano de obra*

Para determinar el valor de la mano de obra es necesario afectar el valor por hora nominal del empleado por un factor prestacional, el cual es de 2.04 de acuerdo con la Tabla 5-41.

Tabla 5-41: Determinación del factor prestacional

COSTO DE PRESTACIONES SOCIALES			
DÍAS PAGADOS POR AÑO			
Jornales			360
Cesantías			30
Intereses sobre las cesantías	12% anual	1,00%	3,6
Primas			30
Seguridad Social	Salud	8,50%	30,6
	ARL	6,96%	25,1
	Pensiones	12,00%	43,2
Aportes Parafiscales	SENA	2,00%	7,2
	ICBF	3,00%	10,8
	Caja de compensación familiar	4,00%	14,4
Dotaciones		4,20%	15,1
Total			**570,0**
DÍAS TRABAJADOS POR AÑO			
Calendario			365
Vacaciones			15
Domingos			52
Feriados			18
Total			**280**
Factor prestacional	Días pagados / Días trabajados		2,04

Fuente: Elaboración propia

Para el ejercicio práctico de este estudio, se asume que un laboratorista devenga un salario mensual de $1’200.000 COP. Teniendo en cuenta un horario de trabajo de 8 horas y 30 días al mes el salario por hora del operario es de $5.000 COP, afectado por el factor prestacional da como resultado un costo por hora de $10.200 COP.

- *Servicios*

  Dentro de los costos de servicios se tuvieron en cuenta los niveles de consumo de energía de la máquina multiensayos utilizada, el horno y la balanza y el consumo de agua para la inmersión de la muestra.

  Para determinar los consumos de los equipos electrónicos se revisan las especificaciones en cada una de las cotizaciones suministradas, resultando en un consumo de 1.0 kW-h para la máquina multiensayos, 1.4 kW-h para el horno y 0.27 kW-h para la balanza. Teniendo en cuenta que la ECI paga $516 COP por kW-h (Grupo Enel-Codensa, 2021) se puede determinar el costo por la energía consumida durante la ejecución del ensayo.

  Para la inmersión de la muestra y teniendo en cuenta las medidas del ensamblaje de inmersión, se requiere un volumen de agua de 0.6 m^3 de agua. La ECI paga $9217COP por m^3 (Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021).

- *Mantenimiento y reparaciones*

  Dentro de este ítem se debe incluir la mano de obra del personal de mantenimiento y el valor de los repuestos. La Cámara Colombiana de Infraestructura recomienda un factor equivalente de 1.2375 del costo de depreciación (1.0123 por repuestos y 0.225 por mano de obra).

$$Reparaciones\ y\ mantenimiento: 1.2375 * Depreciación$$

Ecuación 5-31

La suma de los costos de propiedad con los costos de operación resulta en los costos directos.

5.7.3.2 *Costos Indirectos*

Los costos indirectos se toman como un porcentaje de los costos directos y es destinado a asumir los imprevistos y gastos de administración (Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2009). De acuerdo con la CCI, se recomienda establecer ese valor como un 25% de los costos directos.

5.7.4. Determinación de los costos

Teniendo en cuenta la descripción realizada de los costos, se presenta a continuación el análisis para cada uno de los equipos/herramientas empleados en el ensayo:

Tabla 5-42: Cálculo costos de propiedad de los equipos y herramientas para la ejecución del ensayo Mini-CBR.

Equipo / Herramienta	Valor a depreciar	Depreciación	impuestos, intereses y seguros	Costos de propiedad
Máquina multiensayos	$ 31.429.184	$ 15.110	$ 3.246	$ 18.356
Transductor de desplazamiento (25 mm)	$ 3.397.610	$ 1.633	$ 1.930	$ 3.563
Sujetador para transductor de desplazamiento	$ 255.984	$ 123	$ 145	$ 268
Anillo de carga 4.5 kN	$ 1.666.225	$ 801	$ 946	$ 1.747
Molde Mini-CBR	$ 225.000	$ 108	$ 128	$ 236
Pistón de penetración	$ 108.000	$ 52	$ 61	$ 113
Montaje para inmersión	$ 180.000	$ 87	$ 102	$ 189
Sobrecargas	$ 72.000	$ 35	$ 41	$ 76
Horno de laboratorio	$ 5.033.700	$ 2.420	$ 2.859	$ 5.279
Balanza de precisión	$ 8.220.932	$ 3.952	$ 4.669	$ 8.622

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-43: Cálculo costos de operación de los equipos y herramientas para la ejecución del ensayo Mini-CBR.

Equipo / Herramienta	Mano de obra	Servicios (agua + energía)	Mantenimiento y reparaciones	Costos de operación
Máquina multiensayos	$ 10.200	$ 458	$ 18.699	$ 29.357
Transductor de desplazamiento (25 mm)	$ -	$ -	$ 2.021	$ 2.021
Sujetador para transductor de desplazamiento	$ -	$ -	$ 152	$ 152
Anillo de carga 4.5 kN	$ -	$ -	$ 991	$ 991
Molde Mini-CBR	$ -	$ -	$ 134	$ 134
Pistón de penetración	$ -	$ -	$ 64	$ 64
Montaje para inmersión	$ -	$ 330	$ 107	$ 437
Sobrecargas	$ -	$ -	$ 43	$ 43
Horno de laboratorio	$ 10.200	$ 722	$ 2.995	$ 13.917
Balanza de precisión	$ 10.200	$ 124	$ 4.891	$ 15.215

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-44: Cálculo tarifa horaria de los equipos y herramientas para la ejecución del ensayo Mini-CBR.

Equipo / Herramienta	Costos directos	Costos indirectos	Valor tarifa horaria
Máquina multiensayos	$ 47.713	$ 11.928	$ 59.641
Transductor de desplazamiento (25 mm)	$ 5.585	$ 1.396	$ 6.981
Sujetador para transductor de desplazamiento	$ 421	$ 105	$ 526
Anillo de carga 4.5 kN	$ 2.739	$ 685	$ 3.423
Molde Mini-CBR	$ 370	$ 92	$ 462
Pistón de penetración	$ 178	$ 44	$ 222
Montaje para inmersión	$ 626	$ 156	$ 782
Sobrecargas	$ 118	$ 30	$ 148
Horno de laboratorio	$ 19.196	$ 4.799	$ 23.995
Balanza de precisión	$ 23.836	$ 5.959	$ 29.796

Fuente: Elaboración propia

5.7.5. Costos de ejecución del ensayo

Para determinar el costo final de ejecución del ensayo se calculó el costo real de la utilización de cada máquina/equipo al multiplicar su tarifa horaria por el tiempo de uso.

Tabla 5-45: Cálculo costos total de ejecución del ensayo Mini-CBR.

Equipo / Herramienta	Unidad	Cantidad	Valor tarifa horaria	Total
Máquina multiensayos	hora	0,10	$ 59.641	$ 5.964,12
Transductor de desplazamiento (25 mm)	hora	0,10	$ 6.981	$ 698,08
Sujetador para transductor de desplazamiento	hora	0,10	$ 526	$ 52,60
Anillo de carga 4.5 kN	hora	0,10	$ 3.423	$ 342,35
Molde Mini-CBR	hora	0,10	$ 462	$ 46,23
Pistón de penetración	hora	0,10	$ 222	$ 22,19
Montaje para inmersión	hora	20,00	$ 782	$ 15.648,31
Sobrecargas	hora	0,10	$ 148	$ 14,79
Horno de laboratorio	hora	24,00	$ 23.995	$ 575.889,07
Balanza de precisión	hora	0,08	$ 29.796	$ 2.383,65
Costo total Del ensayo Mini-CBR				**$ 601.061**

Fuente: Elaboración propia

El tiempo que requiere estar la muestra inmersión es de 24 h, al igual que el tiempo requerido para determinar el contenido de una muestra en el horno de laboratorio, se considera que en un lapso de 5 minutos de utilización de la balanza se pueden determinar las masas requeridas, finalmente, los demás equipos y herramientas serán usados por el mismo tiempo que dura el ensayo.

EL costo total de ejecución del ensayo es de $601.061 COP. Sin embargo, es importante aclarar que aproximadamente el 96% de ese costo es debido al horno de laboratorio. La metodología seguida no tiene en cuenta que el horno puede ser usado para varias muestras al mismo tiempo y por tanto el costo es muy alto.

Asumiendo una ganancia del 10% respecto al costo del ensayo, se establece que el precio comercial del ensayo es de $661.200 COP (Teniendo en cuenta la salvedad del párrafo anterior). Este precio corresponde únicamente a la ejecución del ensayo en el laboratorio y no contempla los costos derivados de la extracción, almacenamiento ni transporte de las muestras.

5.8 Referencias

AASHTO. (1993). *Guide for design pavement sturctures 1993*. American ASsociation of State Highway and Transportation Officials.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2020). Plan Distrital de Desarrollo 2020-2024 Un Nuevo Contrato Social y Ambiental para la Bogotá del Siglo XXI. *Página Institucional*, *2009*(366), 170. http://concejodebogota.gov.co/cbogota/site/edic/base/port/inicio.php

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2010). *Decreto 523 de 2010*.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2021). *Plan Operativo Anual de Inversiones*.

Andrei, D., Witczak, M., Schwartz, C., & Uzan, J. (2004). Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. *Journal of the Transportation Research Board*, *1874*, 29–37.

Assali, M. P., Fortes, R. M., & Cymrot, R. (2003). Comparação da incerteza de medição entre ensaios CBR e mini CBR. *34º Reunião Anual de Pavimentação*, 20.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). Colombia Estrategia de País del BID 2015–2018. In *Colombia*. http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=40089561

Banco Interamericano de Desarrollo. (2019). *Estrategia del Grupo BID con Colombia (2019-2022)*. https://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=EZSHARE-1474758834-2

Barros, C. O. de A. (2003). *Revisão da Correlação Mini CBR / CBR para solos do municipio de São Carlos – SP*. Universidade de São Paulo.

Barroso, S. H. de A. (2002). *Estudo dos solos da regiäo metropolitana de Fortaleza para aplicacao na engenharia rodoviária*. Universidade de Sâo Paulo.

Bojacá Torres, D. C. (2019). *Módulo resiliente de suelos blandos de subrasante de la zona lacustre de Bogotá a partir del ensayo CBR cíclico*.

Cabrera, A. (2012). *Evaluation of the laboratory resilient modulus test using a New Mexico*

subgrade soil Recommended Citation "Evaluation of the laboratory resilient modulus test using a New Mexico subgrade soil. https://digitalrepository.unm.edu/ce_etds.%22

Cámara Colombiana de la Infraestructura. (2009). *Tarifas de arrendamiento para equipos de construcción*.

CEPAL. (2018). Transporte de carretera en América Latina : evolución de la infraestructura y de sus impactos entre 2007 y 2015. *FAL*, *367*(7), 1–15. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44440/1/S1801184_es.pdf

Chu, T. Y., & Davidson, D. T. (1955). Some laboratory test for the evaluation of stabilized soils. *Iowa State University Bulletin*, *21*.

Clavijo, S., Vera, A., & Vera, N. (2013). *La inversión en infraestructura en Colombia 2012-2020*. 7–14. http://www.cvc.com.ve/docs/2016219124559Inversion en infraestructura Colombia 2013-2020.pdf

Dai, S., & Zollars, J. (2002). Resilient Modulus of Minnesota Road Research Project Subgrade Soil. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1786*(1), 20–28. https://doi.org/10.3141/1786-03

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1997). DNER - ME 254 Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão. In *Norma rodoviária*. http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me254-97.pdf

Dione, A., Fall, M., Berthaud, Y., Benboudjema, F., & Michou, A. (2014). *Implementation of Resilient Modulus - CBR relationship in Mechanistic-Empirical (M . -E) Pavement Design Abstract :* *1*(2), 65–71. https://www.researchgate.net/publication/271829406_Implementation_of_Resilient_Modulus_-_CBR_relationship_in_Mechanistic-Empirical_M_-E_Pavement_Design

Escobar Toro, L. J. (2011). *CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS TROPICALES EN UN TALUD DE LA AUTOPISTA MEDELLÍN – BOGOTÁ EN EL TRAMO DE VÍA ENTRE MARINILLA Y SANTUARIO*. Universidad Nacional de Colombia.

Fernandes, E. (2006). *ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS APLICADAS AOS SOLOS TROPICAIS*. Universidade de São Paulo.

FHWA. (2006). Geotechnical aspects of pavements. In *FHWA NHI-05-037* (Issue 132040). http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geotechnical+Aspects+of+Pavements#1

Garnica, P. Pérez, N. Gómez, J. (2001). Módulos de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares. In *Publicación Técnica N. 142* (Issue 142).

George, K. P. (2004). *Prediction of Resilient Modulus From Soil Index Properties. Report No. FHWA/MS-DOT-RD-04-172*. *November*, 72.

Grupo Banco Mundial. (2018). *Índice de desempeño logístico*. https://datos.bancomundial.org/indicador/LP.LPI.INFR.XQ?end=2018&start=2007&view=chart&year_high_desc=true

Hveem, F. N., & Carmany, R. M. (1949). The faactors underlying the rational design of pavements. *Twenty-Eighth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C.*, *28*, 101–136. https://trid.trb.org/view/104547

Indian Roads Congress. (2012). Tentative Guidelines for the design of Flexible Pavements. In *Indian Road Congress* (p. 108). https://archive.org/details/govlawircy2012sp37_0/page/90

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2017). *Capítulo técnico Geotecnia y Pavimentos*.

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), & Universidad Nacional de Colombia. (2013). *Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.* http://www.umv.gov.co/sisgestion2017/Documentos/MISIONAL/PDV/PDV-DE-003-V1_Guia_diseno_de_pavimentos_para_bajos_volumenes_de_transito_y_vias_locales_para_bogota.pdf

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012a). *INV 148-13 CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO Y SOBRE MUESTRA INALTERADA*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012b). *INV E-156-13 Módulo resiliente de suelos y agregados*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012c). *INV E-172-13 MÉTODO DE ENSAYO NORMAL PARA EL USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO EN APLICACIONES DE PAVIMENTOS A POCA PROFUNDIDAD*.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2018). *Estado De La Red Vial Criterio Tecnico Segundo Semestre 2018*.

Khasawneh, M. A., & Al-jamal, N. F. (2019). Modeling resilient modulus of fine-grained materials using different statistical techniques. *Transportation Geotechnics*, *21*(February), 100263. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100263

Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. K., & Gurland, J. (1956). Relationship between the California Bearing Ratio and The Iowa Bearing Value. *Methods for Testing Engineering Soils*, *59*(December), 257–293. http://publications.iowa.gov/22209/1/IADOT_IHRB_Bulletin_21_Methods_Testing_Engineering_Soils_1960.pdf

Lafleur, J. D., Davidson, D. T., Katti, R. K., & John, G. (1960). Relationship between the California Bearing Ratio and The Iowa Bearing Value. In D. T. Davidson (Ed.), *Methods for testing engineering soils* (Vol. 59, Issue December, pp. 257–293). Iowa State University of Science and Technology. http://publications.iowa.gov/22209/1/IADOT_IHRB_Bulletin_21_Methods_Testing_Engineering_Soils_1960.pdf

Malaver Soto, N. M. (2018). *Lineamientos básicos para la clasificación de suelos tropicales en Colombia orientado a pavimentos* [Universidad Católica de Colombia]. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22378/1/TESIS VFinal%2830-nov-2018%29 ENTREGADA.pdf

Marson, L. A. (2004). *Correlações entre ensaios CBR e Mini-CBR para solos lateríticos de textura fina*. Insitituto Tecnológico de Aeronáutica.

Martinez, J. O., Gerena, C., & Nicely, A. (2013). *Correlación PDC Con CBR Para Suelos En*

La Localidad De Suba. http://unimilitar-dspace.metabiblioteca.org/handle/10654/3653

Mendoza, C., & Caicedo, B. (2019). Elastoplastic framework of relationships between CBR and Young's modulus for fine grained materials. *Transportation Geotechnics*, *21*(September), 100280. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100280

Mohammad, L. N., Herath, A., Abu-Farsakh, M. Y., Gaspard, K., & Gudishala, R. (2007). Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *19*(11), 986–992. https://doi.org/10.1061/40776(155)2

Montaña, D., & Durán, J. E. (2013). *Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá*. 1.

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia.

Moossazadeh, J., & Witczak, M. (1981). Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior. *Transportation Research Record*, *810*, 9–17. http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1981/810/810-002.pdf

Moreno Rubio, J. (2005). *Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas* [Universidad Politecnica De Catalunya]. http://hdl.handle.net/2099.1/3252

Narzary, B. K., & Ahamad, K. U. (2018). Estimating elastic modulus of California bearing ratio test sample using finite element model. *Construction and Building Materials*, *175*, 601–609. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.228

Nogami, J. S. (1972). Determinação do índice de suporte Califórnia com equipamentos de dimensões reduzidas. *II Reunião Das Administrações Rodoviárias*.

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1979). Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, *19*(1), 196–199. https://doi.org/10.1007/BF02600475

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1981). UMA NOVA CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PARA FINALIDADES RODOVIÁRIAS. *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais Em Engenharia*, 13.

Office of Minnesota road research. (1996). *User guide to the Dinamic cone penetrometer*. http://www.dot.state.mn.us/materials/researchdocs/User_Guide.pdf

Orozco Rojas, L. F. (n.d.). Presentación SCI. *Asentamientos de Edificios Altos*, 29.

Paige-Green, P., & Plessis, L. Du. (2009). *THE USE AND INTERPRETATION OF THE DYNAMIC CONE PENETROMETER (DCP) TEST* (Issue September).

Palomino, A., Salazar Ferro, F., Orozco, L. F., & Salcedo, M. (2016). *Tilting of a Large Apartment Building in Bogota, Colombia, Due to Foundation Failure and the Recuperation of Its Verticality*. 17–28. https://doi.org/10.1061/9780784480076.003

Reddy, C. N. V. S., & Moorthy, N. V. R. (2005). Significance of bearing capacity of clayey subgrade in flexible pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, *6*(3), 183–189. https://doi.org/10.1080/10298430500137194

Rehman, Z. U., Khalid, U., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2017). Prediction of CBR value from index properties of different soils. *Technical Journal University of Engineering and Technology Taxila, Pakistan*, *22*(August), 17–26.

Requiz Cristóbal, J. O. (2018). *Aplicación de la metodología MCT en estudio de suelos tropicales con fines de pavimentación en la selva baja del Perú. Caso: caminos vecinales de madre de dios.* [Universidad Nacional Federico Villarreal]. http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2145

Rojas lópez, M. D., & Ramírez Muriel, A. F. (2018). Inversión en infraestructura vial y su impacto en el crecimiento económico : Aproximación de análisis al caso infraestructura en colombia (1993-2014). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *17*(32), 109–128. https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a6

Rondón Quintana, H., Fernández Gómez, W., & Hernández Noguera, J. (2013). Influencia de la rigidez de la subrasante y las capas granulares sobre la vida a fatiga de mezclas asfálticas. *Tecno Lógicas*, *31*, 53–72.

http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n31/n31a04.pdf

Sánchez, F., & Campagnoli, S. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras: Guía práctica para lo estudios y diseños* (Escuela Colombiana de Ingeniería (ed.); 1ra ed.).

Saurabh, J., Joshi, Y. P., & Goliya, S. S. (2013). Design of Rigid and Flexible Pavements by Various Methods & Their Cost Analysis of Each Method. *International Journal of Engineering Research and Applications*, *3*(5), 119–123.

Saxena, R. K. (1991). Can failures be minimized and pavement performance improved by adequately designing and constructing road subgrades. *Indian Roads Congress*, *52*(2), 263–311.

Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). RESILIENCE CHARACTERISTICS OF SUBGRADE SOILS AND THEIR RELATION TO FATIGUE FAILURES IN ASPHALT PAVEMENTS. *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Supplement*, 77–113. https://trid.trb.org/view/716093

Seed, H. B., Chan, C. K., & Monismith, C. L. (1955). EFFECTS OF REPEATED LOADING ON THE STRENGTH AND DEFORMATION OF COMPACTED CLAY. *Thirty-Fourth Annual Meeting of the Highway Research Board*, *34*, 541–558. https://trid.trb.org/view/126583

Seed, H. B., Mitry, F. B., Monismith, C. L., & Chan, C. K. (1967). PREDICTION OF FLEXIBLE PAVEMENT DEFLECTIONS FROM LABORATORY REPEATED-LOAD TESTS. *Trasnportation Research Board*, *35*, 117. https://trid.trb.org/view/104508

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Mapa Geológico Colombiano 2017*.

Souza, R. A. De. (2007). *Estudo Comparativo dos Ensaios de CBR e Mini-CBR para Solso de Uberlândia-MG* [Universidad Federal de Uberlândia]. https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14236/1/RASouzaDISPRT.pdf

Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3 ed.). John Wiley & Sons.

The Asphalt Institute. (1989). *The Asphalt Handbook Manual Series No. 4*.

Vidal, J., & Osorio, R. (2002). Módulo resiliente de suelos finogranulares. *Revista Universidad Eafit*, *125*, 63–72.

Wonnacott, T., & Wonnacott, R. (1993). *Fundamentos de estadística para administración y economía* (1a ed). Limusa.

World Economic Forum. (2019). The Global Competitiveness Report 2019. In *World Economic Forum*. http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf

Wu, S., & Sargand, S. (2007). *USE OF DYNAMIC CONE PENETROMETER IN SUBGRADE AND BASE ACCEPTANCE* (Vol. 14817, Issue 14817).

Yau, A., & Quintus, H. L. Von. (2002). *Study of LTPP laboratory resilient modulus test data and response characteristics*. *FHWA-RD-02-051*, 173. https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/reports/02051/02051.pdf

Zhou, C., Huang, B., Drumm, E., Shu, X., Dong, Q., & Udeh, S. (2015). Soil resilient modulus regressed from physical properties and influence of seasonal variation on asphalt pavement performance. *Journal of Transportation Engineering*, *141*(1), 1–9. https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000727

6.0 Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se muestran las conclusiones y recomendaciones derivadas de la presente investigación. Se presentan consideraciones sobre la caracterización física y mecánica de cada una de las muestras analizadas, la influencia del esfuerzo desviador y el cortante octaédrico en el módulo resiliente (Mr), las correlaciones existentes entre los parámetros físicos con el CBR, el Número Dinámico, la Resistencia al corte no drenada y el Módulo Resiliente (Mr), finalmente, la empleabilidad del ensayo Mini-CBR para determinar el CBR o el Mr de los suelos de subrasante.

Igualmente, se presentan recomendaciones para futuras investigaciones sobre el ensayo Mini-CBR para suelos de subrasante con diferentes características.

Las muestras ensayadas se dividieron en 4 grupos: (1) la totalidad de las muestras existentes, (2) Limos arcillosos de alta compresibilidad (MH), (3) Muestras de San José de Bavaria (MH) y (4) Muestras de la Escuela Colombiana de Ingeniería (CH). Lo anterior en la búsqueda de correlaciones específicas por tipo de suelo o para una zona específica.

6.1 Conclusiones

6.1.1. Caracterización física y mecánica

- En general, las propiedades físicas obtenidas para las muestras analizadas de suelos blandos de la zona lacustre de la Sabana de Bogotá, en las profundidades comprendidas entre 0.3 y 0.8m se encuentran dentro de los rangos típicos que se muestran en la literatura y en bases de datos como la creada a partir de los proyectos de LFO Ingenieros de Suelos S.A.S. Es decir, humedades entre 61 y 111% para los limos y entre 42 y 51% para las arcillas; pesos unitarios entre 12.6 y 15 KN/m^3 para los limos y entre 16.5 y 17.6 KN/m^3 para las arcillas; Gravedad específica (Gs) entre 2.63 y 2.73 para ambos tipos de suelos; relaciones de vacíos entre 1.7 y 3.2 para los limos y entre 1.1 y 1.3 para las arcillas; límite líquido entre 97 y 132% para los limos y entre 69 y 82% para las arcillas; límites plásticos entre 55 y 75% para los limos y entre 24 y 30 para las arcillas; finalmente, índices de plasticidad entre 30 y 68% para los limos y entre 45 y 58% para las arcillas.

- En general se encontraron valores de CBR comprendidos entre 2.7 y 5.0% que corresponden a subrasantes de consistencia blanda y por consiguiente baja capacidad de soporte. En concordancia con lo anterior, se obtuvieron números dinámicos (DN) del orden de 45 a 107 mm/golpe. Las muestras de limo de alta compresibilidad (MH) resultaron en valores de CBR ligeramente superiores a las arcillas de alta compresibilidad (CH), lo anterior puede ser debido a contenidos de arena del orden de 40% en las muestras limosas.
- Los Mr con un 95 de confiabilidad, para las condiciones de esfuerzo desviador de 41.3 kPa y presión de confinamiento de 14 kPa, en general se encontraron comprendidos entre 16.4 y 41.1 MPa. Siendo valores coherentes con la consistencia de los suelos analizados.
- Los resultados de CBR y Mr, a pesar de sus ligeras variaciones, ponen en evidencia el estudio realizado en sitios considerados dentro de una misma zonificación geotécnica, como corresponde a los suelos de la zona lacustre.
- Se pudo observar la influencia de la temporada de lluvias sobre los valores de humedad de las muestras ya que se presentaron variaciones de hasta 20% en las muestras de San José de Bavaria las cuales fueron extraídas en un lapso de un mes. En las muestras de la ECI se obtuvo una mayor uniformidad de este parámetro puesto que las muestras fueron extraídas en la misma semana.
- Teniendo en cuenta que en la práctica solamente se emplea un módulo resiliente para el diseño de la estructura de pavimento, se considera conveniente realizar el ejercicio estadístico de determinar el intervalo de confianza (95% para este caso). Lo anterior permite asumir en cierta forma la variabilidad de los resultados de resistencia dentro de una zona determinada.

6.1.2. Influencia del esfuerzo desviador y el cortante octaédrico en el módulo resiliente.

- En general, se observa una influencia significativa del esfuerzo desviador y del esfuerzo cortante octaédrico sobre el módulo resiliente (R^2 >0.6 en la mayoría de los casos), lo anterior sin tener en cuenta la variación de las

propiedades físicas del suelo medidas en la investigación (humedad, relación de vacíos, peso unitario, límites de Atterberg y granulometría).

- En el modelo k-σ_d, los valores de K_1 varían entre 16.99 y 39.4, mientras que los valores de K_2 varían entre -0.35 y 0.09 indicando un comportamiento de ablandamiento o pérdida de rigidez con el incremento del esfuerzo desviador.
- En el modelo universal los valores de K_1 varían entre 0.28 y 0.66, los valores de K_2 entre -0.38 y 0.19 y finalmente, los valores de K_3 varían entre -2.96 y -0.95 lo que es indicativo de una menor dependencia del Mr del estado de esfuerzos (θ) y una influencia más significativa del esfuerzo cortante octaédrico.

6.1.3. Correlaciones entre propiedades físicas, CBR, ND y Mr

- Solamente para las muestras de la ECI, los valores de CBR y ND presentan una correlación con R^2= 0.9093.
- Para las condiciones de las muestras analizadas en el estudio, no se encontró correlación entre el CBR, la Resistencia al corte no drenada, el ND y el Mr, obtenido para un 95 de confiabilidad con un esfuerzo desviador de 41.3 kPa y una presión de confinamiento de 14 kPa.
- Para las muestras evaluadas en el estudio, no se encontró relación entre el CBR y cada una de las propiedades físicas consideradas (humedad, peso unitario y plasticidad). Por su parte, al evaluar la relación entre la humedad y el Número Dinámico se obtuvo un R^2 de 0.6566 para las muestras de San José de Bavaria y de 0.5295 para las muestras MH. Al analizar la relación entre el índice de plasticidad y el número dinámico se obtuvo un R^2 de 0.771 para las muestras de San José de Bavaria.
- Se realizó un análisis de regresión lineal en el paquete estadístico SPSS de *IBM Corporation* en donde se determinó que las variables con mayor incidencia sobre los valores de CBR y Mr eran la humedad, el peso unitario y la relación de vacíos (con una confiabilidad del 95%).
- Se realizaron modelos de regresión lineal múltiple en el paquete estadístico SPSS de *IBM Corporation* teniendo como variables independientes las 3 de

mayor incidencia. Sin embargo, no se encontró suficiente evidencia que permita demostrar que las variables independientes (humedad, peso unitario y relación de vacíos) demuestren adecuadamente la variación de la variable dependiente (ya sea CBR o Mr).

6.1.4. Empleabilidad del ensayo Mini-CBR para determinar el CBR o el Mr de los suelos de subrasante

- Al revisar las correlaciones existentes en la literatura, fue posible determinar el valor de CBR únicamente para las muestras de la ECI. Sin embargo, este valor resulta de determinar una relación entre el CBR tradicional y el CBR determinado a partir de las cargas del Mini-CBR por lo que se pueden incurrir en errores al realizar una correlación partiendo de un dato obtenido por otra correlación.
- Se logró establecer que la penetración más representativa para la correlación entre el Mini-CBR y el CBR es de 1.25 mm. A partir del logaritmo de la carga necesaria para alcanzar esa penetración se logró determinar una ecuación para estimar el $CBR_{natural}$ a partir del Mini-CBR para las muestras de la ECI con un R^2 de 0.8334.
- No fue posible establecer una ecuación que relacione el Mr con el Mini-CBR.
- Los resultados muestran en general que a partir de la prueba Mini-CBR no es posible obtener ni el CBR, ni el Mr de los limos arcillosos de alta compresibilidad que comprenden gran parte de los suelos de subrasante de la zona lacustre en Bogotá. Las arcillas de alta compresibilidad (CH) sobre las cuales se obtuvieron algunas relaciones aceptables, solo fueron evaluadas con muestras de la ECI por lo que no es posible generalizar sus resultados en este estudio.
- A pesar de que el ensayo Mini-CBR se planteaba como una gran alternativa para determinar el CBR para proyectos de bajos volúmenes de tránsito, los resultados insatisfactorios obtenidos coinciden con los resultados reportados en la literatura. Lo anterior podría justificar la no utilización de este ensayo en países diferentes a Brasil.

6.2 Recomendaciones

- Teniendo en cuenta que la mayor parte de las investigaciones existentes sobre el Mini-CBR se desarrollan sobre suelos lateríticos, valdría la pena realizar un estudio similar al actual sobre este tipo de materiales en el País. Al trabajar sobre suelos lateríticos se podría trabajar con la totalidad de la clasificación MCT y los ensayos miniatura.
- Los resultados de CBR y Mr encontrados durante este estudio confirman los rangos típicos de los suelos blandos lacustres, a partir de lo anterior se podrían tomar indicadores de calidad para las subrasantes de la zona lacustre de la ciudad de Bogotá.
- La regresión lineal múltiple realizada para determinar una relación entre las propiedades físicas y la resistencia del suelo (CBR y Mr) no fue concluyente. Sin embargo, se tenían solamente 21 y 18 datos para los grupos analizados. Es posible que en la medida que los datos de la población aumenten se obtengan resultados más precisos.
- Para ninguno de los casos analizados se obtuvieron correlaciones aceptables luego de realizar la inmersión de las muestras, sería conveniente analizar si el periodo de 20 a 24 horas de inmersión para el mini-CBR es equivalente a la inmersión de 96 horas en el ensayo tradicional.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, valdría la pena realizar una modelación en elementos finitos para poder establecer un factor de escala entre los ensayos.

ANEXO 1: Base de datos con todos los proyectos (LFO Ingenieros de Suelos S.A.S)

						Propiedades índice					Clasificación	CBR		
						Wn	LL	LP	IP	IL		Exp	Sin Sat.	Sat.
Referencia LFO	**Localización**	**Muestra**	**Profundidad**		**Descripción**	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	USCS	(%)	(%)	(%)
2320-6A	Calle 46 sur con carrera 6	1	0.2	0.4	Arcilla arenosa gris clara con vetas de óxido		31	12.1	18.9		CL	0.74	40.9	17.97
		2	0	0.2	Arena arcillosa amarilla clara		18	8.8	9.2		SC	0.36	71.91	5.69
2320-10	Avenida Caracas con calle 50 sur	1	0.8	1	Arena arcillosa amarilla oscura	12.7	24.1	14.1	10	-13.4	SC	0.38	11.76	2.22
4241-9	Carrera 87 entre calles 34 y 38	1	0.8	1	Limo café oscuro con vetas de óxido	26.7	61.2	33.3	27.9	-23.3	MH		9.5	2.6
		2	0.8	1	Limo café oscuro	66.4	86.1	59.3	26.8	26.5	MH		3.4	2.8
		3	0.7	0.9	Limo café oscuro con amarillo oscuro	45.1	73.3	41.9	31.4	10.1	MH		11.6	6.2
		4	0.5	0.7	Arcilla negra	25	62	24.2	37.8	2.1	CH		13.1	0.8
		5	0.8	1	Arcilla habana co vetas de óxido	45.3	81.2	26.4	54.8	34.4	CH		4.9	0.2
4413-9	Calle 49 Sur con Transversal 72D	1	0.9	1.1	Arcilla con rastros de arena gris oscura	28.4	44.8	18.6	26.2	37.7	CL	0.28	6.83	4.49
		2	0.9	1.1	Arcilla con rastros de arena gris oscura	23.7	46.2	23.3	22.8	1.7	CL	1.64	15.65	6.63
4558-16	Calle 116 con carrera 72	1	1.8	2	Arcilla gris clara con vetas de óxido		78.1	25	53.1		CH	0.58	4.3	2.61
		2	3	3.2	Arcilla gris clara con vetas de óxido		107.4	33.8	73.6		CH		4.2	3.02
5549-4	Carrera 51 con calle 214	1	0.9	1.15	Limo café oscuro con rastros de raíces		118	61.1	56.9		MH	0.04	2.42	2.01
6852-3	Autonorte km 14 vía inmaculada	1	0.9	1.1	Limo negro con rastros de arena con raíces	63.4	106.3	64.7	41.5	-3.3	MH	0	2.72	1.72
		2	0.8	1	Limo gris oscuro con raíces	65.9	100.4	59.4	41	16	MH	0.04	3.75	4.23
		3	0.3	0.5	Limo gris oscuro con rastros de arena y raíces	93.2	92.9	63	29.9	101.1	MH	0.08	2.13	1.5
7107-4	Calle 69A Sur con Transversal 14 Este	1	1	1.2	Limo orgánico negro	55.2	91	62.3	28.6	-24.8	OH	0.38	4.7	2.06
7125-3	Avenida 19 con calle 152	1	1	1.2	Arena algo arcillosa café clara							0	21.71	15.85
		2	0.7	0.9	Arcilla gris oscura		51.4	24.5	26.9		CH	0.04	2.7	1.5
7181-3	Calle 160 con Carrera 13	1	1	1.2	Limo negro orgánico		156.6	100.3	56.3		OH	0.1	2.66	2.19
		2	1	1.2	Limo negro algo orgánico		118.5	68	50.5		MH	0.04	3.07	2.71
7952-9	Transversal 120 con diagonal 147A	1	0.8	1	Limo café claro		106	60.8	45.2		MH	0.04	5.53	4.49
		2	0.9	1.1	Limo café claro		109	63.4	45.6		MH	0.04	7.99	7.3
9392-5I	Av. Caracas con Calle 80 Sur	1	0.9	1.1	Limo café oscuro	89.6	124.8	92.5	32.3	-9	MH	0.58	6.06	2.43
		2	0.5	0.7	Limo café oscuro	75.7	103.1	68.1	35	21.5	MH	0.3	2.83	1.35
		3	0.6	0.8	Arcilla gris clara con vetas de óxido	31	58	22.3	35.7	24.5	CH	1.12	5.03	4.72
		4	0.8	1	Arena limosa con rastros de grava fina	26.8	39.2	29.9	9.4	-33.4	SM	0.1	12.75	5.39
9392-6D	Calle 79 sur con carrera 7b este	1	0.6	0.8	Limo negro	59.4	96.7	80.7	16	-133.3	MH	0.16	4.91	2.76
9392-7E	Calle 80S No. 6E	1	0.8	1	Limo café oscuro		87	62.5	24.5		MH	0.02	2.46	1.36
		2	0.5	0.7	Limo negro		80.3	57.9	22.4		MH	0.2	6.14	3.13
		3	0.4	0.6	Limo café claro		102.6	74	28.6		MH	0.3	13.82	10.95
10272-3	Carrera 80D con Carrera 7B	1	1.25	1.45	Arcilla gris oscura con rastros de raíces y fragmentos de ladrillo (Relleno)		42	15.7	26.3			1.18	9.62	0.94
10272-5A	Carrera 80D con Carrera 7B	1	1.6	1.8	Arcilla gris clara con vetas de óxido		45	20.6	24.4		CL	0.36	2.55	1.88
		2	0.7	0.9	Arcilla gris clara con vetas de óxido		61.8	22.9	38.9		CH	0.86	4.27	2.6
10303-11	Carrera 92 con calle 156	1	0.8	1	Limo arenoso café oscuro	36.9	55.8	34.3	21.6	12.3	MH	0.34	7.24	4.08
10781-2	Carrera 72 entre calle 148 y 153	1	0.6	0.8	Limo café con algo de raíces		98	59.5	38.5		MH	0.12	10.24	9.8
		2	0.7	0.9	Limo café oscuro con amarillo oscuro		110.4	56.2	54.2		MH	0.14	4.5	3.13
		3	0.8	1	Limo café con algo de raíces		109.2	64.3	44.9		MH	0.16	3.07	1.67
11153-1B	Carrera 88 con calle 11A	1	1.1	1.3	Arcilla café oscura con vetas de óxido y rastros de raíces		56.4	21.8	34.6		CH	0.68	3.3	2.24
		2	1	1.2	Limo arcilloso café oscuro con raíces y basura (Relleno)		62	36	26			0.18	2.36	1.44
		3	1.3	1.5	Arcilla con rastros de arena gris oscura con vetas de óxido		55.2	20.9	34.2		CH	1.32	5.66	2.56
11153-2	Carrera 88 con calle 11A	1	0.8	1	Limo arenoso café oscuro con raíces, fragmentos de ladrillo y concreto (Relleno)		52.2	39.8	12.4			0.02	10.06	5.45
		2	1	1.2	Arcilla café oscura con fragmentos de ladrillo (Relleno)		48.8	24	24.8			0.18	3.77	1.76
		3	1	1.2	Arcilla café clara con rastros de raíces		68.8	29.2	39.5		CH	0.86	3.77	2.4
11176-3A	Calle 77 con carrera 123	1	0.8	1	Limo café claro con rastro de raíces		124.7	72.7	52.1		MH	0.16	5.32	4.17
		2	0.5	0.7	Limo café oscuro con amarillo oscuro		110.1	72.7	37.4		MH	0.12	4.61	1.67
		3	0.6	0.8	Limo café claro con rastro de raíces		128.4	80.5	47.9		MH	0.58	4.3	3.76
		4	0.6	0.8	Limo café claro con amarillo oscuro		117.4	75.5	41.9		MH	0.28	3.69	1.67
11282-2	Calle 8 sur con carrera 8	1	0.8	1	Arcilla gris oscura con vetas de óxido		43.8	20.8	23		CL	0.16	6.76	5.84
11425-1	Aeropuerto El Dorado	1	1	1.2	Arcilla habana con vetas de óxido		83.8	27.3	56.5		CH	0.08	2.46	1.88
		2	1	1.2	Arcilla habana con vetas de óxido		83.7	25.7	58		CH	0.74	3.07	2.29
		3	0.9	1.1	Arcilla café con vetas de óxido		90	33.4	56.6		CH	0.32	3.07	2.5
		4	1.4	1.6								0.08	2.87	2.61
		22	0.9	1.1	Limo arcilloso carmelito con algo de arena y raíces	82.5						0.11	5.9	3
		35	0.72	0.9	Limo arcilloso carmelito negruzco, orgánico	72.2						0.19	3.2	1.6
		40	0.75	0.93	Limo arcilloso arenoso color carmelito	103						0.17	9.7	6.7
		42	1	1.18	Arcilla de color habano con oxidaciones	60.9						0.66	5.1	2.7
		43	1.12	1.3	Limo color habano con raíces	78.7						0.11	2.2	1.6
		70	2	2.18	Limo arcilloso de color café	86.8						0.07	5	3.5
		71	1	1.18	Limo orgánico color negro	75						0	2.7	2.4
		72	1.1	1.28	Limo arcilloso de color café con raíces	88.8						0.07	1.9	1.5
		2	1.05	1.23	Limo orgánico de color negro	63.5						0.03	3.4	2
		3	0.6	0.8	Limo orgánico algo arcilloso color café	74.5						0	3.5	2.7
		4	0.7	0.88	Limo orgánico color café	76.7						0.07	2.2	1.6
		6	0.8	0.98	Limo arcillo arenoso carmelito	122.1						0.19	2.4	2.2
		7	0.82	1	Arcilla limosa con arena fina de color gris con oxidaciones y raíces	24.6						0.1	2	1.6
		10	0.8	0.88	Arcilla de color gris algo limosa	46.4						0.27	3.4	2.4
		13	1.3	1.48	Limo de color café con raíces	97						0.38	3.6	1.3
		16	1.18	1.36	Arcilla gris oscura y limo orgánico (Relleno)	83.3	86.8	33	53.8	0.116	CH	0.58	1.3	1.1
		17	1.1	1.28	Limo orgánico color carmelito	102.1						0.36	2	0.8
		18	1	1.18	Limo orgánico color café	66.8						0	4.3	1.1
		19	1	1.1	Limo arcilloso color café algo orgánico	98.9						0.09	2.2	1.6
		21	1.7	1.9								0.14	2.66	2.09
		23	1.2	1.3	Limo orgánico de color café	80.3						0.42	3	2.4
		24	1	1.2	Limo arcilloso color carmelito con raíces	65.3						0.14	1.3	1.1
11573	Carrera 70 y 70B con calles 1 Sur a 8 Sur	1	0.7	0.9	Limo café claro		48.9	30.1	18.8		ML	1.52	20.27	2.29
		2	0.7	0.9	Arcilla limosa café clara con negro		55.8	29.8	26		MH-CH	0.54	5.32	4.17
11844-14	Calle 153 con carrera 19	1	0.6	0.8								0.12	4.74	4.64
		2	1.6	1.8									10.14	2.7
11898-2	Carrera 9 con calle 76	1	0.6	0.8	Limo café oscuro		62.4	46.1	16.4		MH	0.9	6.76	3.76
12407-1	Carrera 57 entre calles 25 y 26	1	1.2	1.4	Limo café claro		84.6	50	34.6		MH	0.32	13.31	2.61
		2	1.2	1.4	Limo café claro		86	64.4	21.7		MH	0.32	12.9	4.59
12407-12	Calle 26 enttre carrera 59 y 62	1	0.8	1	Limo café oscuro	43.2	85.6	39	46.6	9.1	MH	0.34	9.99	3.86
		2	1	1.2	Arena amarilla oscura arcillosa con grava	10.2	30.4	16.4	14	-44.3	SC	0.06	33.69	18.38
		3	0.75	0.95	Limo gris oscuro	61.8	86.4	57.4	29	15.2	MH	0.22	4.48	3.37
		4	0.7	0.9	Arena amarilla oscura algo limosa con grava	7.7	18.4	15.3	3.1	-241	SM	0.1	14.66	15.2
12599-7	Calle 6 con carrera 10	1	1.2	1.4	Limo café oscuro		58.6	43	15.7		MH	0.02	3.89	1.04
		2	5	5.2	Arcilla arenosa gris clara		27.8	17.2	10.6		CL	-0.64	1.54	0.31
		3	5	5.2	Arcilla algo orgánica gris oscura		89.4	28.8	60.5		CH	0.2	3.07	1.04
12681-1	Carrera 86 entre calles 6a y 6d	1	0.7	0.9	Arcilla negra con rastros de raíces		67	19.6	47.4		CH	1.52	13.92	7.93
		2	0.5	0.7	Arcilla gris oscura con rastros de raíces		52.4	20.3	32.1		CH	0.8	5.43	3.76
12708-5	Calle 36B Sur con carrera 10	1	0.8	1	Arena algo arcillosa con rastros de grava		16.7	9.3	7.5		SC	0	5.39	3.74
12813-1	Calle 181 con carrera 18	1	1.1	1.3	Arcilla gris oscura con vetas de óxido		35.5	18.9	16.6		CL	0	2.67	1.44
12846-3	Calle 145 con carrera 54	1	1.05	1.25	Limo negro con algo de raíces	66.7	94.9	69.2	25.7	-9.6	MH	0.26	4.59	2.02
		2	1.4	1.6	Limo café oscuro	75.9	123.2	67.6	55.6	15	MH	0.16	5.29	3.82
		3	1.05	1.25	Limo café oscuro	67.5	107.5	76.8	30.6	-30.2	MH	0.62	5.73	4.79
12946-1	Calle 10 con carreras 4 este y 7 este	1	0.6	0.8	Arcilla oxidada con gris claro		32.2	18.2	13.9		CL	0.7	25.8	5.22
		2	0.6	0.8	Arcilla café clara		32.6	20.6	12		CL	1.16	16.38	7.51
12981	Av El Dorado con AV Ciudad de Cali	1	0.7	0.9	Limo café oscuro con raíces		94.1	65.5	28.6		MH	0.03	3.28	2.71
13082-1	Calle 23 con 116	1	0.9	1.1	Limo café claro		96	59.7	36.2		MH	0.04	2.56	1.88
		2	0.5	0.7	Limo café claro		92.4	61.5	31		MH	0	2.05	1.56
		3	0.75	0.95	Limo café claro		87.8	55.5	32.3		MH	0.04	4.71	4.07
13098	Carrera 6 c este enttre calles 90 sur y 94 sur	1	1	1.2	Arcilla gris clara con vetas de óxido		67.4	22.2	45.3		CH	0.2	2.25	2.19
		2	0.9	1.1	Arcilla amarilla oscura con gris claro		87.7	26	61.7		CH	1.5	5.22	4.38
13195	Calle 73 entre carreras 7 y 9	1	0.65	0.85	Limo con rastros de arena negro		49.5	30.8	18.7		ML	0.02	8.19	5.63
		2	0.9	1.1	Limo arcilloso café oscuro con rastros de arena		42.1	26.1	16		CL-ML	0	13.41	8.24
13206	Calle 140 con carrera 12B	1	1	1.2	Limo café claro		96.7	51.6	45.1		MH	0	4.71	3.34
		2	1.3	1.5	Arcilla limosa con rastros de arena café		87.5	37.6	44.9		MH-CH	0	4.5	3.34
13207-1A	Carrera 80 con calle 10	1	0.7	0.9	Arcilla negra		65.9	21.1	44.9		CH	0.14	2.62	2.24
		2	1.2	1.4	Arcilla negra		59.8	21.2	38.6		CH	0	3.89	3.25
13334-1	Rotonda Siberia por calle 80	1	1.6	1.8	Limo café oscuro		84.2	59.9	24.2		MH	0.04	2.11	0.68
		2	0.5	0.7	Limo café claro		74.8	49.2	25.6		MH	0.08	8.36	7.8
		3	0.2	0.4	Arcilla café clara con vetas de óxido		99.5	33.2	66.3		CH	0.24	3.96	3.12
		4	0.5	0.7	Limo café oscuro		122.8	92.2	30.6		MH	0.04	8.49	7.37
13405-4A	Calle 153 entre carreras 101 y 103B	1	1	1.2	Limo café oscuro con rastros de raíces	56.9	87.8	65.1	22.7	-36.2	MH	0.52	8.38	4.45
		2	1.7	1.9	Limo gris oscuro	98.1	111.2	55.1	56	76.7	MH	0	3.93	3.59
		3	1.4	1.6	Limo negro	86.1	104.1	68.2	35.9	49.8	MH	0.02	6.25	4.87
		4	0.9	1.1	Arcilla limosa gris oscura con negro	62.8	74.5	34.4	40.2	70.9	MH-CH	0.02	1.87	2.77
13408-1	Avenida Ciudad de Cali con calle 13	1	1.1	1.3	Arcilla gris oscura con vetas de óxido		40.2	20.4	19.8		CL		4.15	3.51
		2	1.35	1.55	Arcilla gris oscura		30.7	18.9	11.8		CL	-0.14	0.83	0.65
13516	Calle 25 entrte Boyacá y Av. Constitución	1	0.5	0.7	Limo café oscuro con rastros de raíces		98.7	58.5	40.2		MH	0.08	6.29	5.45
		2	0.6	0.8	Limo café oscuro con rastros de raíces		103.7	64.5	39.2		MH	0.12	3.14	2.56
13516-1	Entre Av. Esperanza y calle 26 y entre Boyacá y Av. Constitución	1	1	1.2	Limo café oscuro		105.2	54.3	50.8		MH	0.06	3.51	2.66
		2	0.6	0.8	Limo café claro		112.2	64.3	47.9		MH	0.02	5.03	3.84
		3	0.7	0.9	Limo café oscuro		91.4	54.1	37.3		MH	1.08	5.19	3.84
13517	Transversal 70C con Av. Villavicencio	1	0.7	0.9	Arcilla amarilla oscura		27.5	16.1	11.4		CL	0.02	2.3	1.82
		2	1	1.2	Limo arcillo arenoso café claro		17.4	9.5	7.9		CL-ML	-0.66	5.03	2.72
13543-1	Av Ciudad de Cali con calle 10	1	0.85	1.05	Arcilla gris oscura		62.8	17.8	45		CH	0.88	5.32	4.69
		2	0.9	1.1	Arcilla negra con gris claro		44.3	18.6	25.6		CL	0.02	5.53	3.44
		3	1.1	1.3	Arcilla café con rastros de arena y algo de raíces		33.3	15.6	17.7		CL	0	3.38	1.56
13582-6	Av. Gaitán Corés con Av Villavicencio	1	1	1.2	Arcilla gris clara con algo de grava fina	17.8	39.3	16	22.3	8.1	CL	1.34	10.36	3.48
13582-7	Av. Gaitán Corés con Av Villavicencio	1	0.7	0.9	Arcilla algo arenosa gris clara	15.6	32.3	15.4	16.9	1.6		1.38	10.21	0.56
		2	0.8	1	Grava gruesa a fina	8.3	24.7	13.7	11	-48.8				0.5
		3	0.8	1	Arcilla algo arenosa con fragmentos de concreto (Relleno)	13.6	32.6	14.7	17.9	-6.2		0.64	10.95	0.6
		4	0.7	0.9	Arcilla algo arenosa café clara	16.1	56.2	17	39.2	-2.3		3.3	26.68	4.49
		5	0.7	0.9	Arcilla con rastros de arena gris clara	16	56.5	16.7	39.7	-1.9		3.6	16.35	6.74
13643	Calle 213 con carreras 93 y 94	1	0.6	0.8	Limo negro		126	75.3	50.7		MH	0.14	6.25	5.42
		2	0.9	1.1	Limo café oscuro		115	66.8	48.2		MH	0.12	3.38	2.71
		3	1	1.2	Limo café oscuro		101.9	66.5	35.4		MH	0.04	7.68	6.05
		4	0.6	0.8	Limo café con rastros de raíces		101.7	66	35.7		MH	0.1	5.73	4.8
13711-3	Carrera 1 con calle 64	1	0.5	0.7	Arcilla café oscura	7.8	39.3	18.2	21	-49.9	CL	1.98	13.68	3.14
13730-3	Calle 25 entre carrera 37 y 40 corferias	1	0.95	1.15	Arcilla gris oscura	28	40.7	21.6	19.1	33.4	CL	0.26	1.8	1.72
13790-9	Carrera 37 con calle 24 hilton	1	2	2.2	Arcilla café oscura	40.6	68.8	27.7	41.1	31.2	CH	1.28	5.36	4.53
13977	Calle 26 con carrera 92	1	0.7	0.9	Limo café con rastros de raíces		69.9	39.8	30.1		MH	0.2	5.53	3.43
		2	1.1	1.3	Limo café con rastros de raíces		96.5	56.5	40		MH	0.1	5.31	2.52
13977-6	Calle 26 con carrera 92	1	0.5	0.7	Limo gris oscuro con rastros de raíces	72.7	106	58.1	47.9	30.5	MH	0.06	3.6	3.41
		2	0.6	0.8	Limo gris oscuro	84	112.6	57.1	55.5	48.4	MH	0.1	4.56	2.36
13977-7	Calle 52A con carrera 90	1	0.8	1	Limo algo arenoso café claro	75.2	121.1	72.1	49	6.4	MH	0.78	4.81	2.28
		2	0.7	0.9	Limo café claro con restros de arena	99	112.3	67.2	45	70.6	MH	0.62	4.59	1.76
		3	1	1.2	Limo café claro algo arenoso	91.5	125.1	60.5	64.5	48	MH	0.2	5.7	1.83
14000	Autonorte km 7	1	0.8	1	Arcilla gris oscura con vetas de óxido		32.7	17	15.6		CL	0.1	7.37	4.28
		2	0.6	0.8	Arcilla gris oscura		78.1	27.6	50.4		CH	2.12	7.17	3.76
14017-1	Carrera 96A con 136	1	1	1.2	Limo café oscuro	65.6	87	67.7	19.3	-10.9	MH	0.54	5.66	4.53
14116	Calle 170 con carrera 15	1	1.3	1.5	Arena arcillosa café oscura con rastros de grava		77.6	29.1	48.6		SC	0.06	2.07	1.42
		2	1	1.2	Arcilla arenosa café clara con restros de raíces		79.6	18.2	61.4		CH	0	4.97	2.79
14160-1	Avenida 63 con carrera 74A	1	1	1.2	Limo café oscuro con rastros de raíces		100.3	57	42.6		MH	0.08	4.01	2.62
14170-6	Avenida Boyacá con calle 13 Edén	1	1.2	1.4								0.12	2.09	1.12
14170-7	Avenida Boyacá con calle 13 Edén	1	1.2	1.4	Arcilla algo arenosa con grava fina (Relleno)	19.9	31.5	12.9	18.6	37.8		0.1	2.98	3.33
		2	1.2	1.4	Grava gruesa a fina angular con fragmento de ladrillo (Relleno)	18.5	40.1	17.5	22.6	4.3		1.5	11.57	5.76
		3	1.3	1.5	Arena arcillosa con fragmentos de vidrio(Relleno)	11.1	38.5	13.8	24.7	-10.7		0.14	10.95	4.79
1211-17	Carrera 71D con calle 13	2	0.9	1.1								0.72	6.55	5.36
14802	Transversal 73A entre Esperanza y calle 25	1	1.2	1.4	Arcilla con rastros de arena gris oscura	35.2	419.9	23.6	26.4	44.1	CL	0.16	3.01	2.66
		2	1.2	1.4	Arcilla gris oscura con vetas de óxido	33.4	60.1	23.8	36.3	26.4	CH	1.1	4.81	4.27
		3	1.1	1.3	Arcilla gris oscura verdosa	56.6	75.3	22.1	53.1	64.8	CH	0.54	4.12	3.97
		4	1.8	2	Limo café oscuro	38.4	65.6	42.8	22.8	-19.1	MH	0.16	4.15	3.07
		5	1.3	1.5	Arcilla limosa gris oscura con vetas de óxido	51.2	70.1	32.2	37.9	50.2	CH-MH	1.1	2.87	0.79
		6	1.25	1.45	Limo café	39.2	74.2	56.7	17.5	-99.9	MH	0.34	4.45	2.62
		7	1.35	1.55	Limo café oscuro	61.4	82.7	59.7	23	7.2	MH	0.22	4.45	1.98
		8	1.2	1.4	Arcilla gris clara con vetas de óxido	43.9	72.1	21.2	50.9	44.6	CH	0.88	3.56	3.29
		9	1.3	1.5	Arcilla gris clara con vetas de óxido	36.8	69.4	20.3	49.1	33.5	CH	2.88	6.1	4.27
14861	Calle 180 con carrera 6A	1	1	1.2	Arena café clara con rastros de raíces	9.9	25.5	13.4	12.1	-28.3	SC	0.48	7.53	1.95
15207	Calle 164 con carrera 74	1	0.8	1	Arcilla gris oscura con rastros de raíces	36.1	74.9	29.2	45.7	15	CH	0.34	2.32	2.19
15233-4	Calle 1 con carrera 4	1	0.7	0.9	Arcilla algo arenosa gris oscura	23.3	37.8	17	20.8	30.4	CL	0.62	5.99	3.49
		2	1.2	1.4	Arcilla algo arenosa café clara	20.1	35.1	17.9	17.2	13	CL	0.46	6.72	5.73
		3	0.2	0.4	Lutita algo arenosa café clara con vetas de óxido	5.3	25.3	14.4	10.9	-83.7	CL	0.94	103	29.16
15379A	Transversal 39 con calle 20	1	0.75	0.95	Arcilla gris oscura	31.8	53.9	24.1	29.7	25.7	CH	1.14	9.92	6.74
		2	1.4	1.6	Arcilla gris oscura con vetas de óxido	41.2	50.3	25.3	25	63.5	CH	0.04	2.58	1.76
		4	1	1.2	Arcilla café oscura con rastros de raíces	32.6	47.3	25.2	22.1	33.4	CL	0.14	4.85	1.8
15465-2	Calle 132 con 72	1	0.7	0.9	Limo con rastros de arena café oscuro	49.1	75.1	43.9	31.1	16.7	MH	0.68	7.97	6.93
15551-1	Avenida el dorado y calle 44 entre carreras 45 y 50	1	0.8	1	Arcilla gris oscura	48.9	83.1	35.1	48	28.8	CH	1.24	4.48	3.86
		2	0.9	1.1	Arcilla gris oscura con rastros de raíces	46	76.5	31.1	45.4	32.9	CH	1.02	5.29	3.74
		3	0.9	1.1	Arcilla gris oscura	31.9	47	23.8	23.2	34.9	CL	1.86	3.31	2.66
		4	0.7	0.9	Arcilla gris oscura con rastros de raíces	52.3	83.1	35.5	47.6	35.3	CH	0.48	3.12	2.7
15611	Diagonal 150 entrte carrera 142 y 145	1	0.8	1								0.4	2.17	1.8
		2	1.5	1.7								0.92	8.27	8.5
		3	0.9	1.1								0.76	3.56	4.12
		4	1	1.2								0.84	3.56	3.37
15627-1	Calle 57C sur con carrera 81D	1	1	1.2	Arrcilla algo arenosa café clara con vetas de óxido	20.5	40.1	15.3	24.9	21	CL	0.6	3.56	3.14
		2	1.5	1.7	Arcilla algo arenosa café clara	25.6	27.7	19.8	7.9	73.5	CL	0.12	5.4	3.03
		3	1.2	1.4	Grava gruesa a fina anfular gris oscura	17.8	33	16.4	16.6	8.5	GC	0.5	3.82	1.98
		4	1	1.2	Limo arcilloso algo arenoso con basura (Relleno)	18.6	40.8	27.1	13.7	-61.3		1.66	3.75	0.71
15807	Calle 109 entre carreras 2E y 5	1	0.7	0.9	Arcilla arenosa gris oscura	9.7	32.7	16.8	16	-44.7	CL	1.64	80.36	11.98
		2	0.6	0.8	Arcilla arenosa gris oscura con negro	22.9	55.4	22.4	33	1.7	CH	2.02	21.64	3.14
		3	0.7	0.9	Limo algo arenoso café claro	29.5	56	32	24	-10.3	MH	0.32	26.34	20.18
		4	0.6	0.8	Arena arcillosa gris oscura	13.6	30.9	19.2	11.7	-48.5	SC	0.26	45.62	5.43
15909	Carrera 45 con calle 26	1	0.7	0.9	Arcilla gris oscura con vetas de óxido	38.2	78.4	29.3	49.1	18.2	CH	3.16	14.7	6.7
15971-4	Av. América con carrera 68	1	1.5	1.7	Arcilla arenosa café oscura	11.6	30.6	15.9	14.7	-28.7	CL	1.06	13.37	3.71
16317-1	Av. Jorge Uribe Botero entre Calles 168 y 170	1	0.8	1	Arena algo arcillosa con grava (Relleno)	15.1	24.7	15.8	8.9	-7.6		0.1	9	4.27
		2	0.8	1	Grava gruesa a fina con restros de ladrillo (Relleno)	14.7	25.5	14.5	11	2		0.02	17.27	3.11
		3	0.8	1	Arcilla con grava fina y fragmentos de ladrillo (Relleno)	35.6	82.1	29.9	52.2	10.9		2.18	7.46	3.33
		4	1	1.2	Arcilla gris oscura con vetas de óxido	69.7	105.9	33.8	72.1	49.7	CH	0.34	3.42	2.92
		5	1.3	1.5	Arena arcillosa con algo de grava (Relleno)	33.5	53.4	16.1	37.3	46.7		0	7.35	4.53
		6	1.2	1.4	Grava gruesa a fina con fragmentos de ladrillo (Relleno)	27.6	43.2	25.7	17.5	11.1		0.24	5.66	1.87
		7	0.7	0.9	Arcilla arenosa gris oscura	15.1	27.2	16.5	10.7	-12.8	CL	0.28	5.4	2.77
		8	0.8	1	Grava fina angular con fragmentos de ladrillo (Relleno)	34.9	59.8	30.3	29.5	15.4		3.4	18.92	2.02
16466	Calle 24F con carrera 101	1	1.1	1.3	Limo con rastros de grava fina	76	105.9	66.2	39.7	24.7	MH	0.28	4.08	3.97
		2	1	1.2	Fragmentos de concreto asfáltico (Relleno)	58.6	100.6	47.3	53.3	21.3		0.6	1.51	1.68
16567	Carrera 2 E con calle 70	1	0.9	1.1	Limo con rastros de arena café oscuro	49.1	67.2	36.7	30.5	40.6	MH	0.06	9.85	5.62
		2	0.9	1.1	Arcilla, limo, con fragmentos de concreto (Relleno)	14	39.3	23	16.3	-55.3		0.18	3.05	1.24
16779	Autopista Sur con Avenida Villavicencio	1										1.22	6.03	3.86
		2										2.22	8.71	3.82
		3										2.02	5.88	4.49
16808	Colegio Santa Teresita	1	0.7	0.9	Limo arcilloso con rastros de arena café claro	29.9	71.2	33.6	37.6	-10	MH-CH	0.9	6.1	4.6

Rango CBR		Totales	
		Cantidad	Porcentaje
0	0.99	12	6%
1	1.99	43	20%
2	2.99	50	23%
3	3.99	43	20%
4	4.99	28	13%
5	100	37	17%
Total		213	100%

ANEXO 2: Base de datos con los proyectos dentro de la zona delimitada.

						Propiedades índice					Clasificación	CBR		
						Wn	LL	LP	IP	IL		Exp	Sin Sat.	Sat.
Referencia LFO	Localización	Muestra	Profundidad		Descripción	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	USCS	(%)	(%)	(%)
4241-9	Carrera 87 entre calles 34 y 38	1	0.8	1	Limo café oscuro con vetas de óxido	28.7	61.2	33.3	27.9	-23.3	MH		9.5	2.6
		2	0.8	1	Limo café oscuro	66.4	86.1	59.3	26.8	26.5	MH		3.4	2.8
		3	0.7	0.9	Limo café oscuro con amarillo oscuro	45.1	73.3	41.9	31.4	10.1	MH		11.6	4.2
		4	0.5	0.7	Arcilla negra	25	62	24.2	37.8	2.1	CH		13.1	0.8
		5	0.8	1	Arcilla habana con vetas de óxido	45.3	81.2	26.4	54.8	34.4	CH		4.9	2.2
5549-4	Carrera 51 con calle 214	1	0.9	1.15	Limo café oscuro con rastros de raices		118	61.3	56.8		MH	0.04	2.42	2.01
6852-3	Autonorte km 14 vía inmaculada	1	0.9	1.1	Limo negro con rastros de arena con raices	63.4	106.3	64.7	41.5	-3.3	MH	0	2.72	1.72
		2	0.8	1	Limo gris oscuro con raices	65.9	100.4	59.4	41	16	MH	0.04	3.75	2.12
		3	0.3	0.5	Limo gris oscuro con rastros de arena y raices	93.2	92.9	63	29.9	101.1	MH	0.08	2.13	1.5
7181-3	Calle 160 con Carrera 13	1	1	1.2	Limo negro orgánico		156.6	100.3	56.3		OH	0.1	2.66	2.19
		2	1	1.2	Limo negro algo orgánico		118.5	68	50.5		MH	0.04	3.07	2.71
11844-14	Calle 153 con carrera 19	1	0.6	0.8								0.12	4.74	3.54
		2	1.6	1.8									10.14	2.7
12407-1	Carrera 57 entre calles 25 y 26	1	1.2	1.4	Limo café claro		84.6	50	34.6		MH	0.32	13.31	3.81
		2	1.2	1.4	Limo café claro		86	64.4	21.7		MH	0.32	12.9	4.59
12407-12	Calle 26 entre carrera 59 y 62	1	0.8	1	Limo café oscuro	43.2	85.6	39	46.6	9.1	MH	0.34	9.99	3.16
		2	1	1.2	Arena amarilla oscura arcillosa con grava	10.2	30.4	16.4	14	-44.3	SC	0.08	33.69	14.18
		3	0.75	0.95	Limo gris oscuro	61.8	86.4	57.4	29	15.2	MH	0.22	4.48	3.37
		4	0.7	0.9	Arena amarilla oscura algo limosa con grava	7.7	18.4	15.3	3.1	-241	SM	0.1	14.66	14.3
12846-3	Calle 145 con carrera 54	1	1.05	1.25	Limo negro con algo de raices	66.7	94.9	69.2	25.7	-9.6	MH	0.26	4.59	2.02
		2	1.4	1.6	Limo café oscuro	75.9	123.2	67.6	55.6	15	MH	0.16	5.29	3.82
		3	1.05	1.25	Limo café oscuro	67.5	107.5	76.8	30.6	-30.2	MH	0.62	5.73	4.78
12981	Av El Dorado con AV Ciudad de Cali	1	0.7	0.9	Limo café oscuro con raices		94.1	65.5	28.6		MH	0.08	3.28	2.71
13206	Calle 140 con carrera 128	1	1	1.2	Limo café claro		96.7	51.6	45.1		MH	0	4.71	3.14
		2	1.3	1.5	Arcilla limosa con rastros de arena café		87.5	37.6	44.9		MH-CH	0	4.5	3.14
13405-4A	Calle 153 entre carreras 101 y 103B	1	1	1.2	Limo café oscuro con rastros de raices	56.9	87.8	65.1	22.7	-36.2	MH	0.52	8.38	4.45
		2	1.7	1.9	Limo gris oscuro	98.1	111.2	55.1	56	76.7	MH	0	3.93	2.52
		3	1.4	1.6	Limo negro	86.1	104.1	68.2	35.9	49.8	MH	0.02	6.25	4.87
		4	0.9	1.1	Arcilla limosa gris oscura con negro	62.8	74.5	34.4	40.2	70.9	MH-CH	0.02	1.87	2.77
13516	Calle 25 entre Boyacá y Av. Constitución	1	0.5	0.7	Limo café oscuro con rastros de raices		98.7	58.5	40.2		MH	0.08	6.29	5.05
		2	0.6	0.8	Limo café oscuro con rastros de raices		103.7	64.5	39.2		MH	0.12	3.14	2.56
13516-1	Entre Av. Esperanza y calle 26 y entre Boyacá y Av. Constitución	1	1	1.2	Limo café oscuro		103.2	54.3	50.8		MH	0.06	3.51	2.66
		2	0.6	0.8	Limo café claro		112.2	64.3	47.9		MH	0.02	5.03	3.84
		3	0.7	0.9	Limo café oscuro		91.4	54.1	37.3		MH	1.08	5.19	3.84
13643	Calle 213 con carreras 93 y 94	1	0.6	0.8	Limo negro		128	75.3	50.7		MH	0.14	6.25	5.42
		2	0.9	1.1	Limo café oscuro		115	66.8	48.2		MH	0.12	3.38	2.71
		3	1	1.2	Limo café oscuro		101.9	66.5	35.4		MH	0.04	7.68	6.05
		4	0.6	0.8	Limo café con rastros de raices		101.7	66	35.7		MH	0.1	5.73	4.8
13977	Calle 26 con carrera 92	1	0.7	0.9	Limo café con rastros de raices		69.9	39.8	30.1		MH	0.2	5.53	4.43
		2	1.1	1.3	Limo café con rastros de raices		96.5	56.5	40		MH	0.1	5.31	2.52
13977-6	Calle 26 con carrera 92	1	0.5	0.7	Limo gris oscuro con rastros de raices	72.7	106	58.1	47.9	30.5	MH	0.06	3.6	2.42
		2	0.6	0.8	Limo gris oscuro	84	112.6	57.1	55.5	48.4	MH	0.1	4.56	2.36
13977-7	Calle 52A con carrera 90	1	0.8	1	Limo algo arenoso café claro	75.2	121.1	72.1	49	6.4	MH	0.78	4.81	2.28
		2	0.7	0.9	Limo café claro con restros de arena	99	112.3	67.2	45	70.6	MH	0.62	4.59	1.76
		3	1	1.2	Limo café claro algo arenoso	91.5	125.1	60.5	64.5	48	MH	0.2	5.7	1.83
14116	Calle 170 con carrera 15	1	1.3	1.5	Arena arcillosa café oscura con restros de grava		77.8	29.1	48.8		SC	0.08	2.07	1.42
		2	1	1.2	Arcilla arenosa café clara con restros de raices		79.6	18.2	61.4		CH	0	4.97	2.79
14160-1	Avenida 63 con carrera 74A	1	1	1.2	Limo café oscuro con rastros de raices		100.1	57	42.6		MH	0.08	4.01	2.62
14802	Transversal 73A entre Esperanza y calle 25	1	1.2	1.4	Arcilla con rastros de arena gris oscura	35.2	419.9	23.6	26.4	44.3	CL	0.16	3.01	2.66
		2	1.2	1.4	Arcilla gris oscura con vetas de óxido	53.4	60.1	23.8	36.3	26.4	CH	1.1	4.81	4.27
		3	1.1	1.3	Arcilla gris oscura verdosa	56.6	75.3	22.1	53.1	64.8	CH	0.54	4.12	3.27
		4	1.8	2	Limo café oscuro	38.4	65.6	42.8	22.8	-19.1	MH	0.16	4.15	3.07
		5	1.3	1.5	Arcilla limosa gris oscura con vetas de óxido	51.2	70.1	32.2	37.9	50.2	CH-MH	1.1	2.87	2.26
		6	1.25	1.45	Limo café	39.2	74.2	56.7	17.5	-99.3	MH	0.34	4.45	2.62
		7	1.35	1.55	Limo café oscuro	61.4	82.7	59.7	23	7.2	MH	0.22	4.45	1.98
		8	1.2	1.4	Arcilla gris clara con vetas de óxido	43.9	72.1	23.2	50.9	44.6	CH	0.88	3.56	2.73
		9	1.3	1.5	Arcilla gris clara con vetas de óxido	36.8	69.4	20.3	49.1	33.5	CH	2.88	6.1	4.27
15551-1	Avenida el dorado y calle 44 entre carreras 45 y 50	1	0.8	1	Arcilla gris oscura	48.9	83.1	35.1	48	28.8	CH	1.24	4.48	3.36
		2	0.9	1.1	Arcilla gris oscura con rastros de raices	46	76.5	31.2	45.4	32.9	CH	1.02	5.29	3.24
		3	0.9	1.1	Arcilla gris oscura	31.9	47	23.8	23.2	34.9	CL	1.86	3.31	2.66
		4	0.7	0.9	Arcilla gris oscura con rastros de raices	52.1	83.1	35.5	47.6	35.3	CH	0.48	3.12	2.7
15909	Carrera 45 con calle 26	1	0.7	0.9	Arcilla gris oscura con vetas de óxido	38.2	78.4	29.3	49.1	18.2	CH	3.16	14.7	6.7
16317-1	Av. Jorge Uribe Botero entre Calles 168 y 170	1	0.8	1	Arena algo arcillosa con grava (Relleno)	15.1	24.7	15.8	8.9	-7.6		0.1	9	4.27
		2	0.8	1	Grava gruesa a fina con restros de ladrillo (Relleno)	14.7	25.5	14.5	11	2		0.02	17.27	4.11
		3	0.8	1	Arcilla con grava fina y fragmentos de ladrillo (Relleno)	35.6	82.1	29.9	52.2	10.9		2.18	7.46	3.33
		4	1	1.2	Arcilla gris oscura con vetas de óxido	69.7	105.9	33.8	72.1	49.7	CH	0.34	3.42	2.92
		5	1.3	1.5	Arena arcillosa con algo de grava (Relleno)	33.5	53.4	16.1	37.3	46.7		0	7.35	4.59
		6	1.2	1.4	Grava gruesa a fina con fragmentos de ladrillo (Relleno)	27.6	63.2	25.7	17.5	11.1		0.24	5.66	1.87
		7	0.7	0.9	Arcilla arenosa gris oscura	15.1	27.2	16.5	10.7	-12.8	CL	0.28	5.4	2.77
		8	0.8	1	Grava fina angular con fragmentos de ladrillo (Relleno)	34.9	59.8	30.3	29.5	15.4		3.4	18.92	3.02

Rango CBR		Totales		Filtrados	
		Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
0.1	0.99	3	4%	3	5%
1	1.99	7	10%	6	9%
2	2.99	25	36%	24	38%
3	3.99	17	24%	15	23%
4	4.99	11	16%	9	14%
5	100	7	10%	7	11%
Total		70	100%	64	100%

ANEXO 3: Registro ensayos de laboratorio realizados.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	115.28
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	227.47
Masa recipiente + suelo seco (g)	170.7
Contenido de humedad (%)	**102.4**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	68.7
Masa de la muestra parafinada (g)	73.9
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	15.2
Temperatura del agua (º)	15
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99910
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**53.16**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	68.7
Volumen de la muestra (cm^3)	53.16
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.29
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**12.68**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

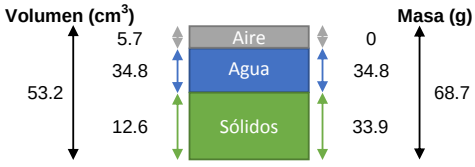
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	174.11	672.21	23.4	0.99745	499.37
2	174.12	672.32	21.4	0.99791	499.24
3	174.11	672.89	16.6	0.99885	499.35
4	174.11	672.84	16.4	0.99888	499.29
5	174.11	672.87	16.8	0.99881	499.35
Prom	**174.11**	**672.63**			**499.32**
Desv.	**0.00**	**0.33**			**0.05**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.65
Temperatura de ensayo (ºC)	16.4
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99888
Masa picnómetro vacío (g)	174.11
Volumen picnómetro (cm^3)	499.32
Masa picnómetro con agua (g)	672.88
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	704.05
Gravedad específica sin corregir	2.69
Factor de corrección	1.00067
Gravedad específica corregida	**2.69**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**3.21**
η (%)	**76.24**
S (%)	**85.85**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA)
INV - E - 123

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

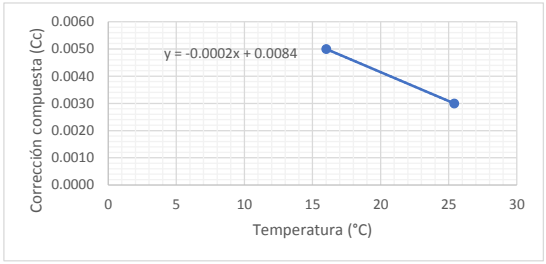
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	17.1
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	33.4
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	33.4
Masa del agua (g)	0
Masa material seco (g)	16.3
Humedad higroscópica (%)	0.0
Factor corrección Ch	**1.0000**

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H

Rango de temperaturas (ºC)	16	25.4
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0050	1.0030
Corrección compuesta (Cc)	0.0050	0.0030



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	51.2
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	51.2
Gravedad específica del suelo - Gs	2.69
Gravedad específica del agua - G_1	1.000
$Constante\ A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_S}{G_S - g_1}\right]$	
A	3109

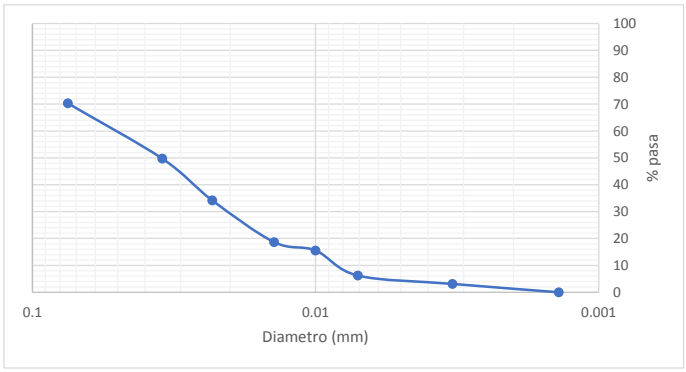
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	10:19

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (ºC)	Cc	$R_{CORREGIDO}$	% suelo suspensión	K	L (cm)	ϕ partículas (mm)
10:21	2	1.021	16.2	0.0050	1.016	49.74	0.01415	12.1	0.0348
10:24	5	1.016	16.2	0.0050	1.011	34.20	0.01415	13.4	0.0232
10:34	15	1.011	16.5	0.0049	1.006	18.65	0.01415	14.7	0.0140
10:49	30	1.010	16.8	0.0048	1.005	15.54	0.01415	15.0	0.0100
11:19	60	1.007	18.0	0.0046	1.002	6.22	0.01382	15.8	0.0071
14:36	250	1.005	23.2	0.0035	1.001	3.11	0.01298	16.0	0.0033
10:19	1440	1.004	23.0	0.0035	1.000	0.00	0.01301	16.3	0.0014

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	51.2
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	15.2
% Retenido en tamiz No 200	29.7
% Pasa el tamiz No 200	70.3

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	$W_{RETENIDO}$ (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.00	100.0	0.0
2.000	No 10	0.15	0.30	99.7	0.3
0.850	No 20	0.19	0.38	99.3	0.7
0.425	No 40	0.38	0.75	98.6	1.4
0.150	No 100	4.64	9.07	89.5	10.5
0.075	No 200	9.81	19.17	70.3	29.7



Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	1
Fina	0.425 - 0.075	28
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	70

Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas	4.75 - 0.075	30
Finos	< 0.075	70

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

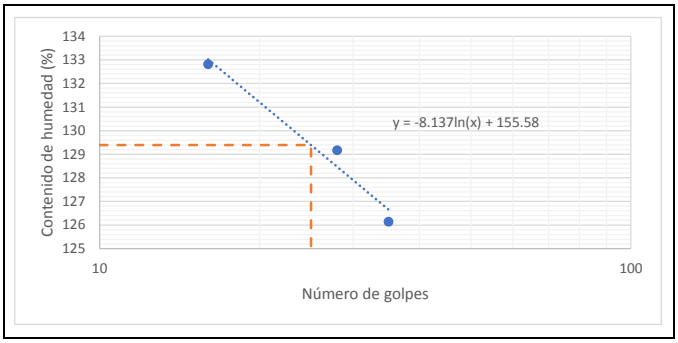
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	56G	C5	88
Masa del recipiente (g)	25.0079	6.7685	6.7927
No. Golpes	35	28	16
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	31.4601	14.7754	14.6711
Masa recipiente + suelo seco (g)	27.861	10.2623	10.1766
Contenido de humedad (%)	126	129	133



LL (%)	**129**

2. Determinación límite plástico

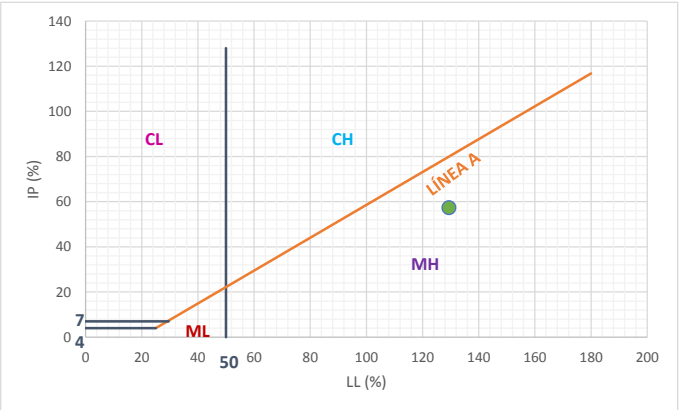
Ensayo	1	2
Número recipiente	56P	82
Masa del recipiente (g)	11.0618	6.7643
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	17.6066	13.5536
Masa recipiente + suelo seco (g)	14.8772	10.6995
Contenido de humedad (%)	72	73

LP (%)	**72**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**57**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**MH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Agosto 09 de 2019

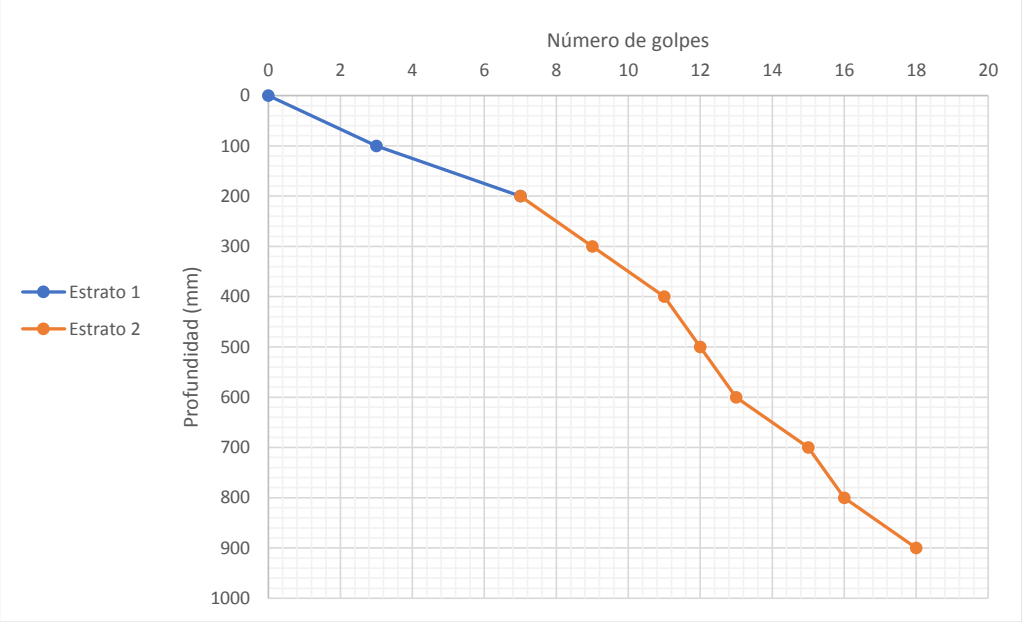
Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
3	100	100	33	1	33
4	200	100	25	1	25
2	300	100	50	1	50
2	400	100	50	1	50
1	500	100	100	1	100
1	600	100	100	1	100
2	700	100	50	1	50
1	800	100	100	1	100
2	900	100	50	1	50

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	28	200
2	69	700

DN subrasante (mm/golpe)	**60**



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**69**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

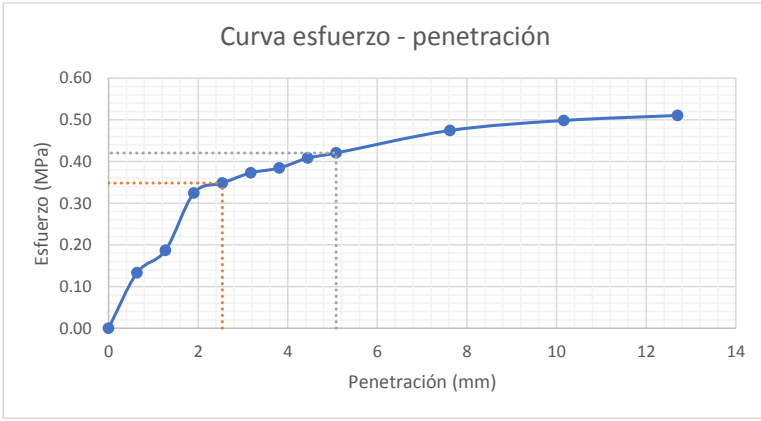
Humedad natural	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	106.83
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	695.56
Masa recipiente + muestra seca (g)	395.86
Contenido de humedad (%)	103.7

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	26.21	0.13
0.050	1.270	36.87	0.19
0.075	1.905	63.98	0.32
0.100	2.540	68.72	0.35
0.125	3.175	73.55	0.37
0.150	3.810	75.83	0.38
0.175	4.445	80.57	0.41
0.200	5.080	82.94	0.42
0.300	7.620	93.60	0.47
0.400	10.160	98.34	0.50
0.500	12.700	100.71	0.51

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.35
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.42
$CBR_{2,54}$ (%)	5.06
$CBR_{5,08}$ (%)	4.07
CBR sin imersión (%)	**5.06**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

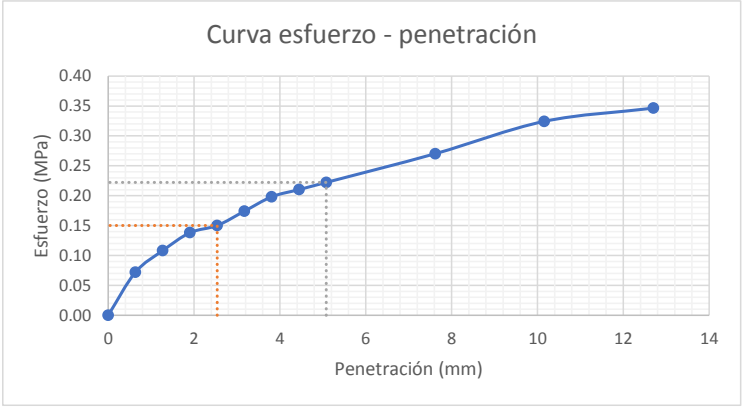
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	106.83
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	695.56
Masa recipiente + muestra seca (g)	395.86
Contenido de humedad (%)	103.7

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		4.54	
Diámetro del pistón (mm)		49.64	
Área del pistón (mm^2)		1935.32	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	14.218	0.07
0.050	1.270	21.326	0.11
0.075	1.905	27.250	0.14
0.100	2.540	29.620	0.15
0.125	3.175	34.359	0.17
0.150	3.810	39.098	0.20
0.175	4.445	41.468	0.21
0.200	5.080	43.838	0.22
0.300	7.620	53.316	0.27
0.400	10.160	63.979	0.32
0.500	12.700	68.349	0.35



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.15
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.22
$CBR_{2,54}$ (%)	2.18
$CBR_{5,08}$ (%)	2.15
CBR con inmersión (%)	**2.18**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	-
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	-
Masa recipiente + muestra seca (g)	-
Contenido de humedad (%)	N/A

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	128.75	128.63	128.59	128.98	128.74
Diámetro (mm)	62.89	62.83	62.99	63.12	62.96

Área (mm^2)	3113.04
Volumen (cm^3)	400.77
Masa húmeda muestra (g)	517.03
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.29

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	64	57	7	20.56	18.31	2.25	0.093	0.092	0.093	0.00072	25.48
1	41.4	12.4	26	23	3	8.35	7.39	0.96	0.033	0.032	0.033	0.00025	29.27
2	41.4	24.8	78	71	7	25.06	22.81	2.25	0.108	0.108	0.108	0.00084	27.19
3	41.4	37.3	85	75	10	27.30	24.09	3.21	0.118	0.119	0.119	0.00092	26.17
4	41.4	49.7	147	132	15	47.22	42.40	4.82	0.245	0.246	0.246	0.00191	22.24
5	41.4	62	194	175	19	62.32	56.22	6.10	0.392	0.392	0.392	0.00304	18.46
6	27.6	12.4	31	29	2	9.96	9.32	0.64	0.044	0.043	0.044	0.00034	27.57
7	27.6	24.8	65	59	6	20.88	18.95	1.93	0.101	0.101	0.101	0.00078	24.16
8	27.6	37.3	121	109	12	38.87	35.01	3.85	0.196	0.196	0.196	0.00152	23.00
9	27.6	49.7	160	143	17	51.40	45.94	5.46	0.264	0.265	0.265	0.00205	22.36
10	27.6	62	229	209	20	73.56	67.14	6.42	0.445	0.445	0.445	0.00346	19.42
11	13.8	12.4	33	33	0	10.60	10.60	0.00	0.050	0.050	0.050	0.00039	27.29
12	13.8	24.8	67	61	6	21.52	19.59	1.93	0.100	0.099	0.100	0.00077	25.35
13	13.8	37.3	113	103	10	36.30	33.09	3.21	0.169	0.169	0.169	0.00131	25.20
14	13.8	49.7	145	131	14	46.58	42.08	4.50	0.228	0.229	0.229	0.00177	23.71
15	13.8	62	185	166	19	59.43	53.32	6.10	0.321	0.319	0.320	0.00249	21.45

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	121
Masa recipiente (g)	115.39
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	632.42
Masa recipiente + muestra seca (g)	372.32
Masa del agua (g)	260.1
Masa material seco (g)	256.93
Masa material húmedo (g)	517.03
Humedad (%)	101.23

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	121
Masa recipiente (g)	115.39
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	631.06
Masa recipiente + muestra seca (g)	372.32
Masa del agua (g)	258.74
Masa material seco (g)	256.93
Masa material húmedo (g)	515.67
Humedad (%)	100.70

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

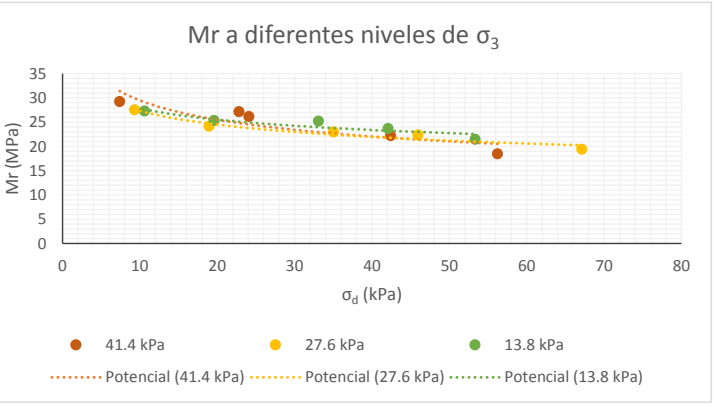
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

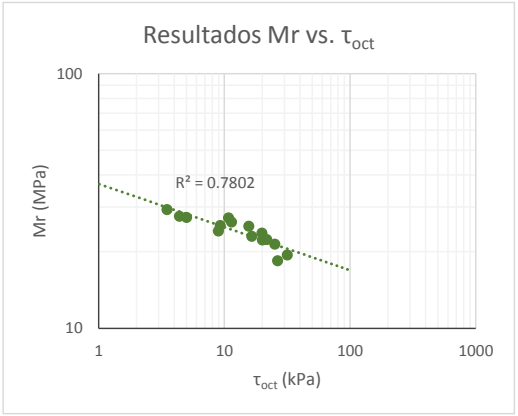
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

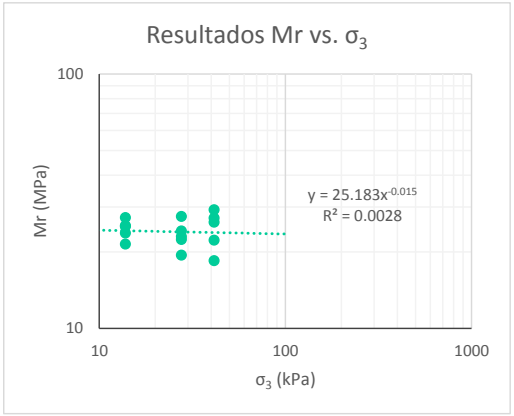
Ecuaciones

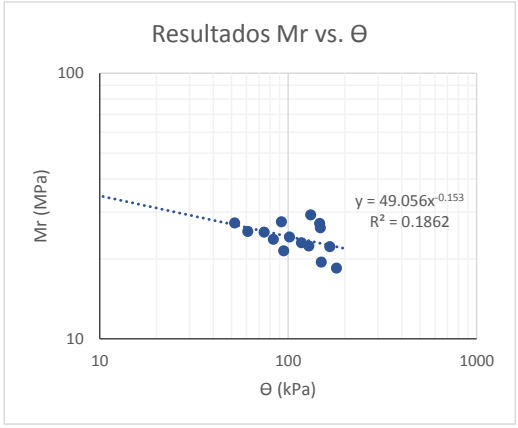
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

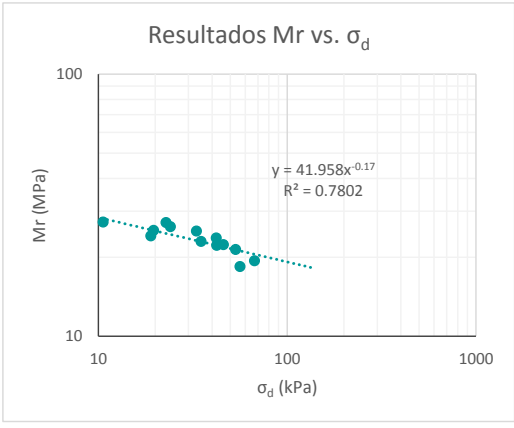
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	7.39	41.40	3.4829	131.588	29.3
2	22.81	41.40	10.7515	147.007	27.2
3	24.09	41.40	11.3572	148.292	26.2
4	42.40	41.40	19.9886	166.602	22.2
5	56.22	41.40	26.5001	180.415	18.5
6	9.32	27.60	4.3914	92.116	27.6
7	18.95	27.60	8.9343	101.753	24.2
8	35.01	27.60	16.5058	117.814	23.0
9	45.94	27.60	21.6543	128.736	22.4
10	67.14	27.60	31.6487	149.937	19.4
11	10.60	13.80	4.9972	52.001	27.3
12	19.59	13.80	9.2372	60.995	25.4
13	33.09	13.80	15.5972	74.487	25.2
14	42.08	13.80	19.8372	83.481	23.7
15	53.32	13.80	25.1372	94.724	21.5











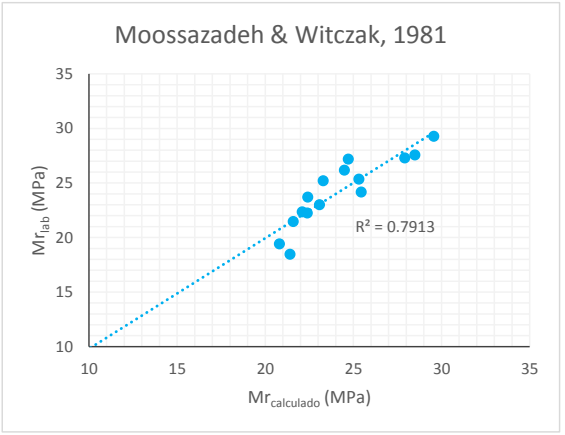
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

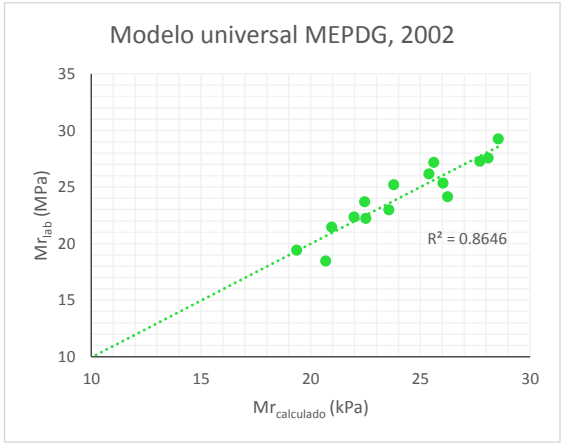
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	19.462			**k_1**	0.295	
		k_2	-0.159			**k_2**	0.007	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.645	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	29.3	29.555	-0.3	0.1	29.3	28.551	0.7	0.5
2	27.2	24.702	2.5	6.2	27.2	25.606	1.6	2.5
3	26.2	24.487	1.7	2.8	26.2	25.383	0.8	0.6
4	22.2	22.380	-0.1	0.0	22.2	22.515	-0.3	0.1
5	18.5	21.398	-2.9	8.6	18.5	20.680	-2.2	4.9
6	27.6	28.485	-0.9	0.8	27.6	28.081	-0.5	0.3
7	24.2	25.440	-1.3	1.6	24.2	26.232	-2.1	4.3
8	23.0	23.073	-0.1	0.0	23.0	23.557	-0.6	0.3
9	22.4	22.097	0.3	0.1	22.4	21.978	0.4	0.1
10	19.4	20.802	-1.4	1.9	19.4	19.361	0.1	0.0
11	27.3	27.905	-0.6	0.4	27.3	27.709	-0.4	0.2
12	25.4	25.306	0.0	0.0	25.4	26.022	-0.7	0.4
13	25.2	23.282	1.9	3.7	25.2	23.781	1.4	2.0
14	23.7	22.407	1.3	1.7	23.7	22.452	1.3	1.6
15	21.5	21.579	-0.1	0.0	21.5	20.952	0.5	0.3
			Σ	28.0			**Σ**	18.1





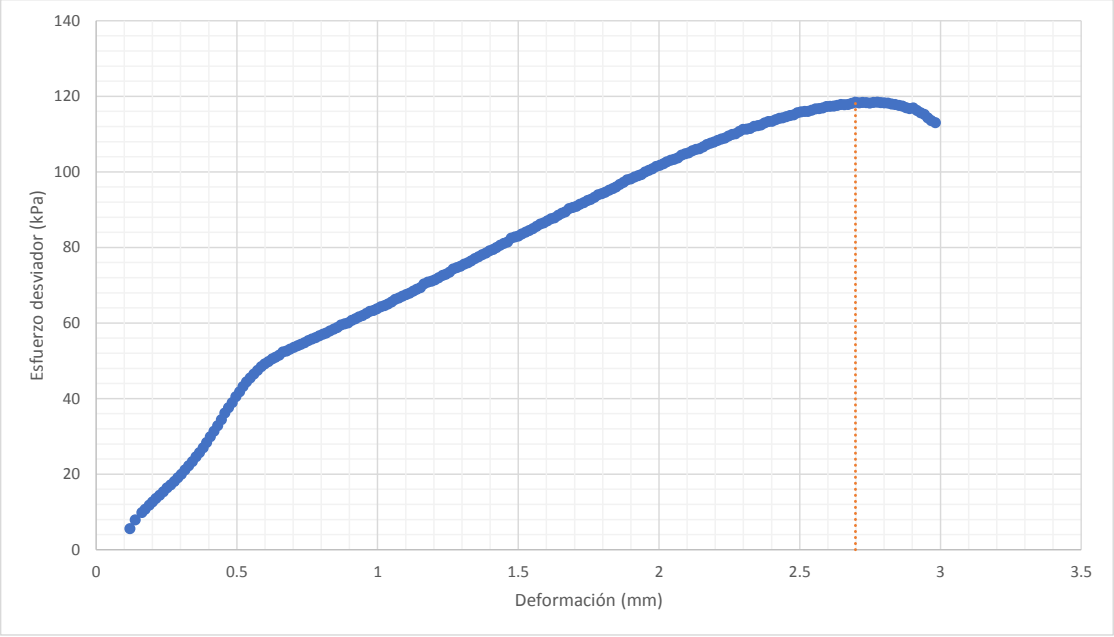
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.129
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

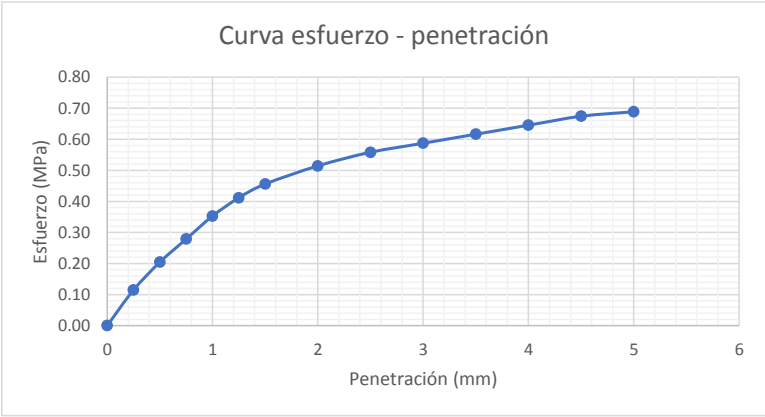
Humedad natural	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	104.95
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	234.42
Masa recipiente + muestra seca (g)	167.77
Contenido de humedad (%)	**106.1**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	2.35	0.11
0.020	0.500	4.19	0.20
0.030	0.750	5.71	0.28
0.039	1.000	7.23	0.35
0.049	1.250	8.44	0.41
0.059	1.500	9.34	0.46
0.079	2.000	10.54	0.51
0.098	2.500	11.44	0.56
0.118	3.000	12.03	0.59
0.138	3.500	12.63	0.62
0.157	4.000	13.22	0.65
0.177	4.500	13.82	0.67
0.197	5.000	14.11	0.69

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 16 a 22 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

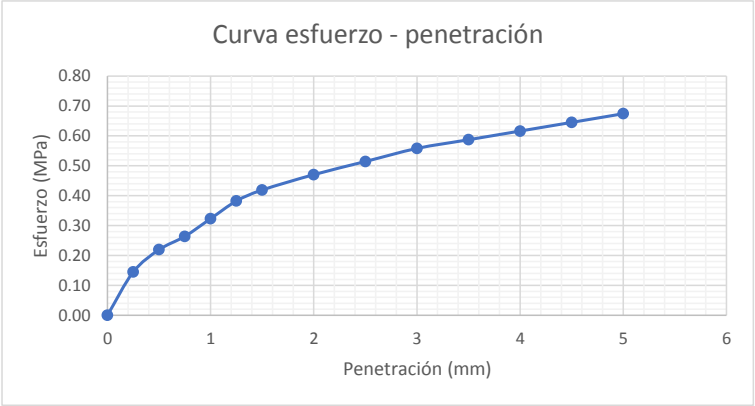
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	104.95
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	234.42
Masa recipiente + muestra seca (g)	167.77
Contenido de humedad (%)	106.10

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	2.96	0.14
0.020	0.500	4.49	0.22
0.030	0.750	5.41	0.26
0.039	1.000	6.62	0.32
0.049	1.250	7.83	0.38
0.059	1.500	8.59	0.42
0.079	2.000	9.64	0.47
0.098	2.500	10.54	0.51
0.118	3.000	11.44	0.56
0.138	3.500	12.03	0.59
0.157	4.000	12.63	0.62
0.177	4.500	13.22	0.65
0.197	5.000	13.82	0.67



Humedad final	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	122.29
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	241.88
Masa recipiente + muestra seca (g)	180.25
Contenido de humedad (%)	**106.33**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	119.76
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	296.29
Masa recipiente + suelo seco (g)	216.9
Contenido de humedad (%)	**81.7**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	154.1
Masa de la muestra parafinada (g)	158.5
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	41.5
Temperatura del agua (º)	15.8
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99898
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**112.39**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	154.1
Volumen de la muestra (cm^3)	112.39
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.37
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**13.45**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

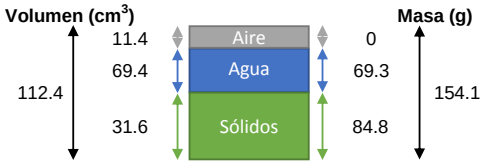
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	174.11	672.21	23.4	0.99745	499.37
2	174.12	672.32	21.4	0.99791	499.24
3	174.11	672.89	16.6	0.99885	499.35
4	174.11	672.84	16.4	0.99888	499.29
5	174.11	672.87	16.8	0.99881	499.35
Prom	**174.11**	**672.63**			**499.32**
Desv.	**0.00**	**0.33**			**0.05**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	50.3
Temperatura de ensayo (ºC)	15.4
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99904
Masa picnómetro vacío (g)	174.11
Volumen picnómetro (cm^3)	499.32
Masa picnómetro con agua (g)	672.96
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	704.5
Gravedad específica sin corregir	2.68
Factor de corrección	1.00084
Gravedad específica corregida	**2.68**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**2.55**
η (%)	**71.86**
S (%)	**85.90**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA)
INV - E - 123

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

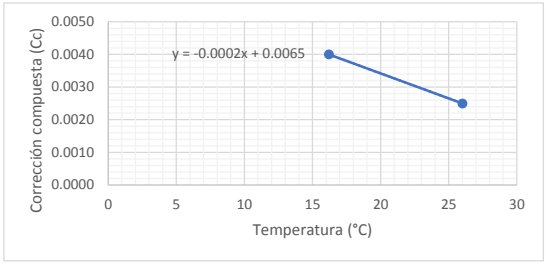
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	9.5
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	25.6
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	25.4
Masa del agua (g)	0.2
Masa material seco (g)	15.9
Humedad higroscópica (%)	1.3
Factor corrección Ch	**0.9876**

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H

Rango de temperaturas (ºC)	16.2	26.0
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0040	1.0025
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0025



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.1
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	49.5
Gravedad específica del suelo - Gs	2.68
Gravedad específica del agua - G_1	1.000
$Constante\ A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_S}{G_S - g_1}\right]$	
A	3224

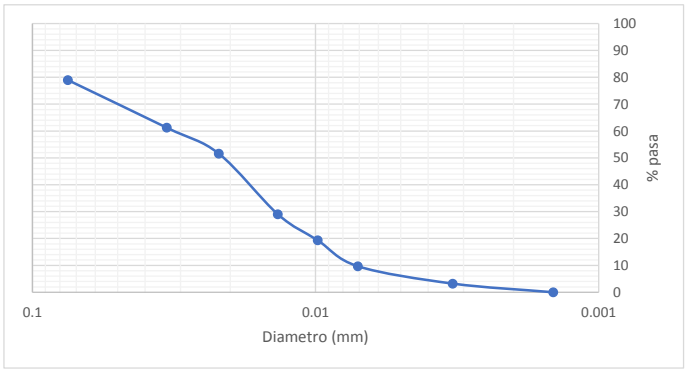
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	10:04

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (ºC)	Cc	$R_{CORREGIDO}$	% suelo suspensión	K	L (cm)	ϕ partículas (mm)
10:06	2	1.023	16.6	0.0039	1.019	61.26	0.01412	11.3	0.0336
10:09	5	1.020	16.6	0.0039	1.016	51.59	0.01412	12.1	0.0220
10:19	15	1.013	16.8	0.0039	1.009	29.02	0.01412	13.9	0.0136
10:34	30	1.010	17.0	0.0039	1.006	19.34	0.01404	14.7	0.0098
11:04	60	1.007	17.6	0.0038	1.003	9.67	0.01394	15.5	0.0071
14:21	250	1.004	23.1	0.0029	1.001	3.22	0.01296	16.0	0.0033
10:04	1440	1.004	19.2	0.0035	1.000	0.00	0.01359	16.3	0.0014

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	49.5
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	10.4
% Retenido en tamiz No 200	21.0
% Pasa el tamiz No 200	79.0

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	$W_{RETENIDO}$ (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.00	100.0	0.0
2.000	No 10	0.00	0.00	100.0	0.0
0.850	No 20	0.00	0.00	100.0	0.0
0.425	No 40	0.70	1.41	98.6	1.4
0.150	No 100	3.60	7.28	91.3	8.7
0.075	No 200	6.10	12.33	79.0	21.0



Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	1
Fina	0.425 - 0.075	20
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	79

Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas	4.75 - 0.075	21
Finos	< 0.075	79

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

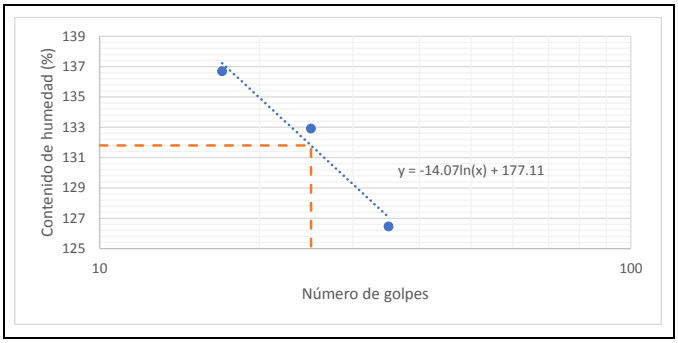
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	56N	88	C5
Masa del recipiente (g)	24.99	6.79	6.766
No. Golpes	35	25	17
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	31.39	12.86	12.26
Masa recipiente + suelo seco (g)	27.816	9.396	9.087
Contenido de humedad (%)	126	133	137



LL (%)	**132**

2. Determinación límite plástico

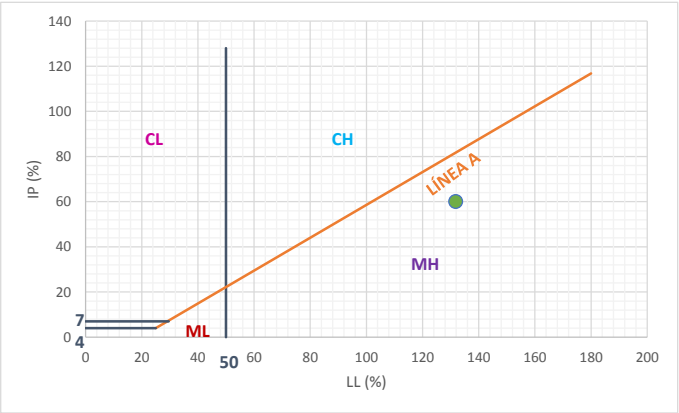
Ensayo	1	2
Número recipiente	82	56V
Masa del recipiente (g)	6.759	11.048
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	12.981	17.427
Masa recipiente + suelo seco (g)	10.386	14.761
Contenido de humedad (%)	72	72

LP (%)	**72**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**60**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**MH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Agosto 09 de 2019

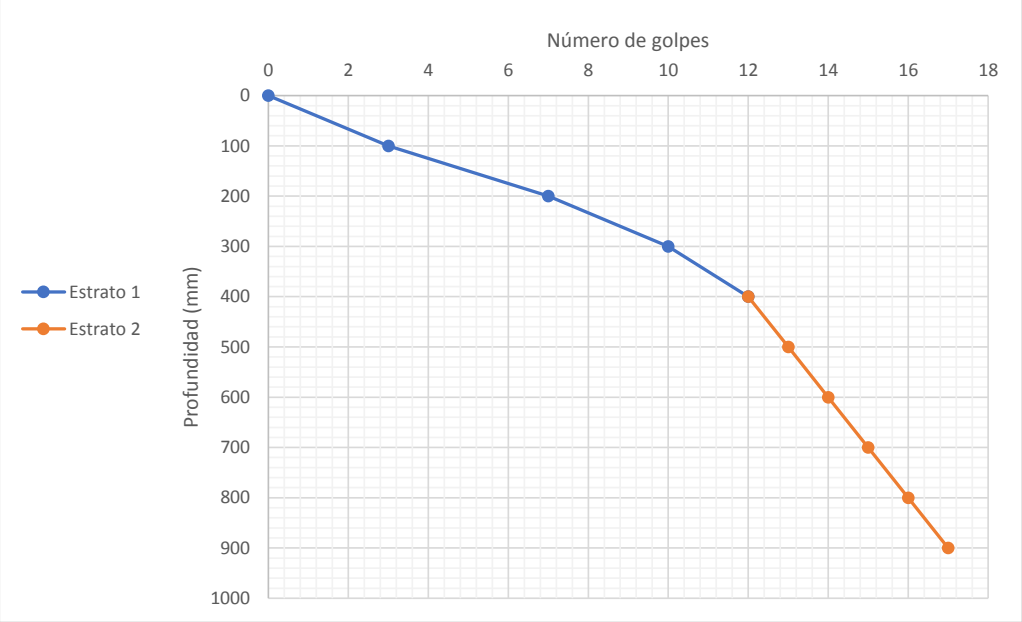
Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
3	100	100	33	1	33
4	200	100	25	1	25
3	300	100	33	1	33
2	400	100	50	1	50
1	500	100	100	1	100
1	600	100	100	1	100
1	700	100	100	1	100
1	800	100	100	1	100
1	900	100	100	1	100

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	32	200
2	100	700

DN subrasante (mm/golpe)	**85**



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**100**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

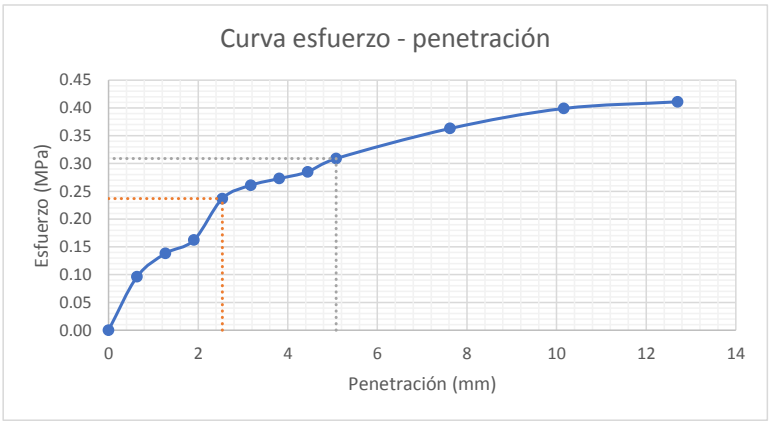
Humedad natural	
# recipiente	M1
Masa recipiente (g)	143.49
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	337.69
Masa recipiente + muestra seca (g)	250.29
Contenido de humedad (%)	81.8

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	18.96	0.10
0.050	1.270	27.25	0.14
0.075	1.905	31.99	0.16
0.100	2.540	46.73	0.24
0.125	3.175	51.47	0.26
0.150	3.810	53.84	0.27
0.175	4.445	56.21	0.28
0.200	5.080	60.95	0.31
0.300	7.620	71.61	0.36
0.400	10.160	78.72	0.40
0.500	12.700	81.09	0.41

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.24
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.31
$CBR_{2,54}$ (%)	3.44
$CBR_{5,08}$ (%)	2.99
CBR sin imersión (%)	**3.44**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

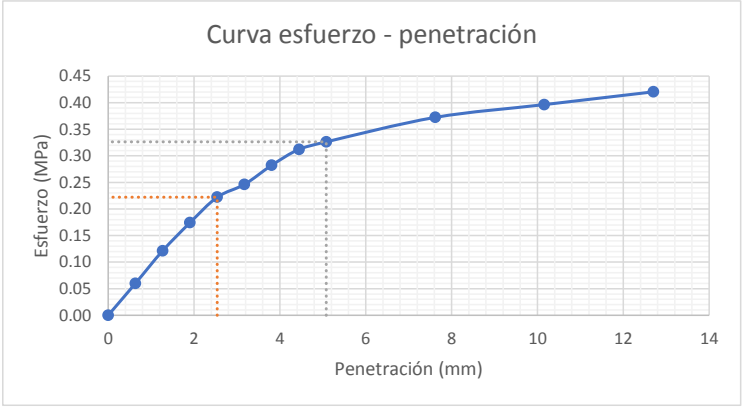
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	M1
Masa recipiente (g)	143.49
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	337.69
Masa recipiente + muestra seca (g)	250.29
Contenido de humedad (%)	81.8

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		4.54	
Diámetro del pistón (mm)		49.64	
Área del pistón (mm^2)		1935.32	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	11.85	0.06
0.050	1.270	23.96	0.12
0.075	1.905	34.36	0.17
0.100	2.540	43.84	0.22
0.125	3.175	48.58	0.25
0.150	3.810	55.69	0.28
0.175	4.445	61.61	0.31
0.200	5.080	64.38	0.33
0.300	7.620	73.46	0.37
0.400	10.160	78.20	0.40
0.500	12.700	82.94	0.42



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.22
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.33
$CBR_{2,54}$ (%)	3.23
$CBR_{5,08}$ (%)	3.16
CBR con inmersión (%)	**3.23**

Humedad final	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	122.27
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	283.41
Masa recipiente + muestra seca (g)	207.23
Contenido de humedad (%)	**89.7**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	132.08	132.75	132.26	132.2	132.32
Diámetro (mm)	60.51	62.57	62.14	61.64	61.72

Área (mm^2)	2991.38
Volumen (cm^3)	395.83
Masa húmeda muestra (g)	541.06
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.37

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	71	64	7	23.73	21.39	2.34	0.129	0.128	0.129	0.00097	22.03
1	41.4	12.4	21	19	2	7.02	6.35	0.67	0.028	0.028	0.028	0.00021	30.02
2	41.4	24.8	62	55	7	20.73	18.39	2.34	0.083	0.084	0.084	0.00063	29.14
3	41.4	37.3	107	97	10	35.77	32.43	3.34	0.167	0.167	0.167	0.00126	25.69
4	41.4	49.7	154	139	15	51.48	46.47	5.01	0.262	0.261	0.262	0.00198	23.51
5	41.4	62	190	171	19	63.52	57.16	6.35	0.390	0.390	0.390	0.00295	19.40
6	27.6	12.4	29	27	2	9.69	9.03	0.67	0.040	0.041	0.041	0.00031	29.49
7	27.6	24.8	55	48	7	18.39	16.05	2.34	0.079	0.079	0.079	0.00060	26.88
8	27.6	37.3	114	103	11	38.11	34.43	3.68	0.181	0.180	0.181	0.00136	25.24
9	27.6	49.7	123	108	15	41.12	36.10	5.01	0.250	0.250	0.250	0.00189	19.11
10	27.6	62	179	160	19	59.84	53.49	6.35	0.417	0.418	0.418	0.00316	16.95
11	13.8	12.4	35	31	4	11.70	10.36	1.34	0.046	0.047	0.047	0.00035	29.49
12	13.8	24.8	68	62	6	22.73	20.73	2.01	0.106	0.105	0.106	0.00080	26.00
13	13.8	37.3	73	63	10	24.40	21.06	3.34	0.123	0.123	0.123	0.00093	22.66
14	13.8	49.7	110	95	15	36.77	31.76	5.01	0.211	0.211	0.211	0.00159	19.92
15	13.8	62	171	152	19	57.16	50.81	6.35	0.443	0.444	0.444	0.00335	15.16

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	107.68
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	648.74
Masa recipiente + muestra seca (g)	409.46
Masa del agua (g)	239.28
Masa material seco (g)	301.78
Masa material húmedo (g)	541.06
Humedad (%)	79.29

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	107.68
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	647.89
Masa recipiente + muestra seca (g)	409.46
Masa del agua (g)	238.43
Masa material seco (g)	301.78
Masa material húmedo (g)	540.21
Humedad (%)	79.01

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

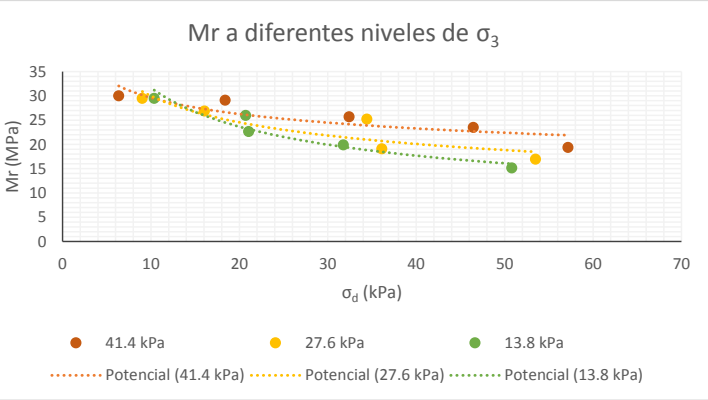
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

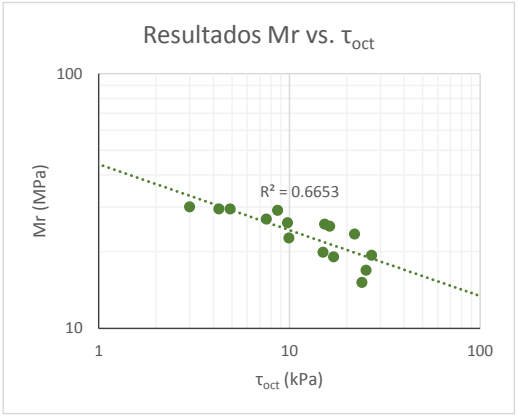
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

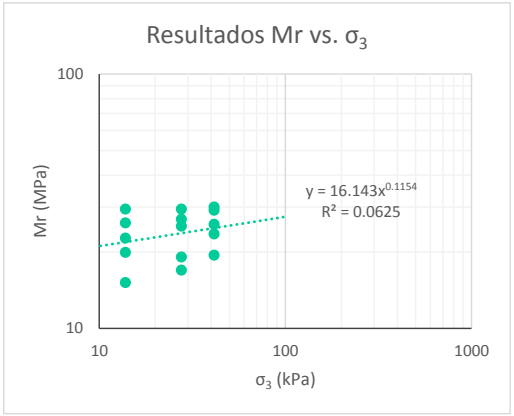
Ecuaciones

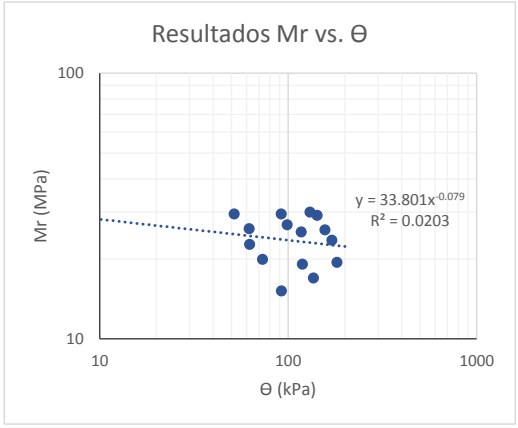
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

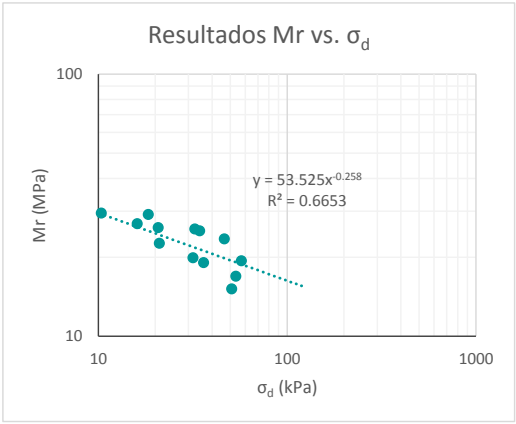
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	6.35	41.40	2.9942	130.552	30.0
2	18.39	41.40	8.6673	142.586	29.1
3	32.43	41.40	15.2860	156.627	25.7
4	46.47	41.40	21.9047	170.667	23.5
5	57.16	41.40	26.9475	181.364	19.4
6	9.03	27.60	4.2549	91.826	29.5
7	16.05	27.60	7.5642	98.846	26.9
8	34.43	27.60	16.2315	117.232	25.2
9	36.10	27.60	17.0195	118.904	19.1
10	53.49	27.60	25.2140	136.287	17.0
11	10.36	13.80	4.8852	51.763	29.5
12	20.73	13.80	9.7704	62.126	26.0
13	21.06	13.80	9.9280	62.461	22.7
14	31.76	13.80	14.9708	73.158	19.9
15	50.81	13.80	23.9533	92.213	15.2











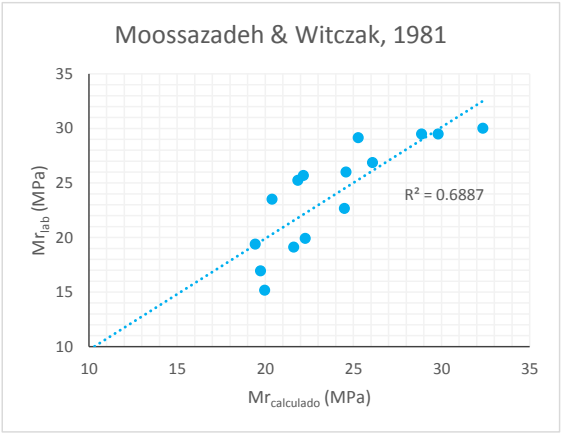
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

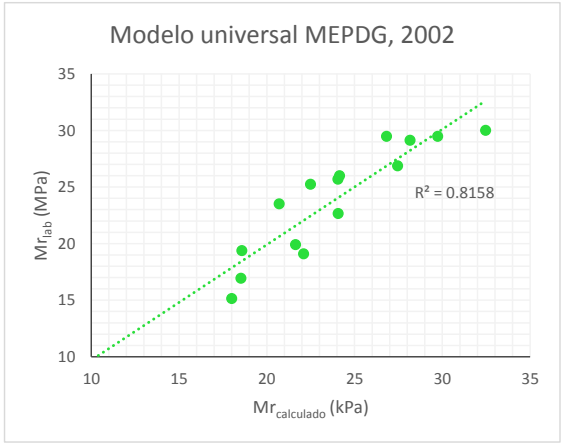
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	16.985			**k_1**	0.334	
		k_2	-0.232			**k_2**	0.150	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-2.957	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	30.0	32.341	-2.3	5.4	30.0	32.461	-2.4	6.0
2	29.1	25.274	3.9	14.9	29.1	28.152	1.0	1.0
3	25.7	22.157	3.5	12.5	25.7	24.045	1.6	2.7
4	23.5	20.383	3.1	9.8	23.5	20.707	2.8	7.9
5	19.4	19.426	0.0	0.0	19.4	18.571	0.8	0.7
6	29.5	29.809	-0.3	0.1	29.5	29.729	-0.2	0.1
7	26.9	26.085	0.8	0.6	26.9	27.453	-0.6	0.3
8	25.2	21.851	3.4	11.5	25.2	22.486	2.8	7.6
9	19.1	21.612	-2.5	6.3	19.1	22.095	-3.0	8.9
10	17.0	19.728	-2.8	7.7	17.0	18.521	-1.6	2.5
11	29.5	28.869	0.6	0.4	29.5	26.814	2.7	7.2
12	26.0	24.581	1.4	2.0	26.0	24.145	1.9	3.4
13	22.7	24.490	-1.8	3.4	22.7	24.064	-1.4	2.0
14	19.9	22.264	-2.3	5.5	19.9	21.630	-1.7	2.9
15	15.2	19.965	-4.8	23.1	15.2	17.992	-2.8	8.0
			Σ	103.2			**Σ**	61.1





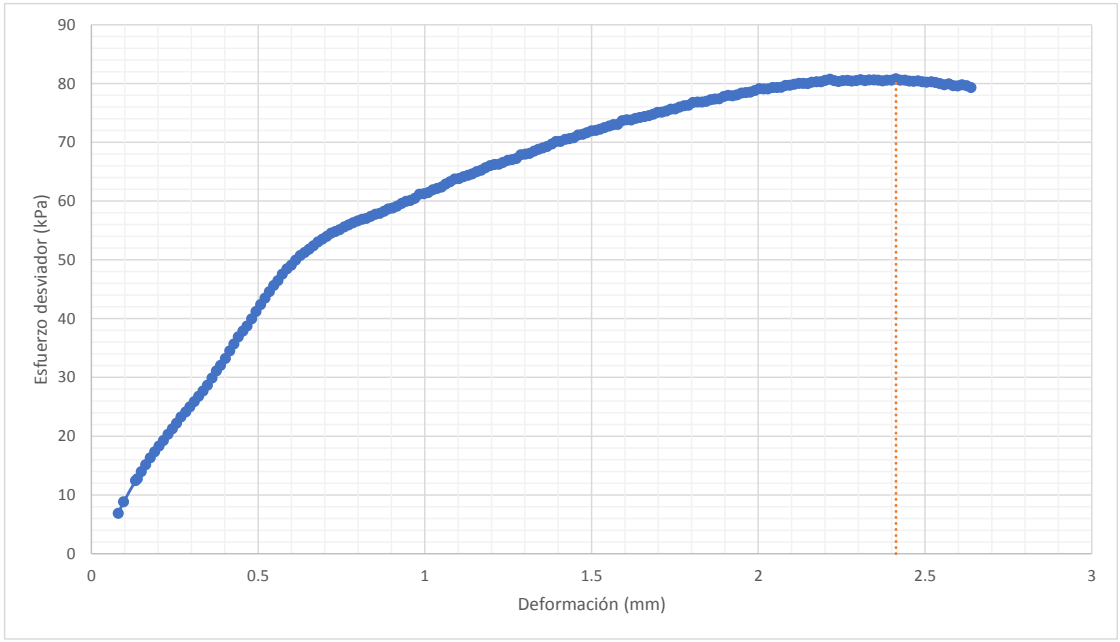
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.132
Máximo esfuerzo (kPa)	80.81
Máxima deformación (mm)	2.413
Máxima deformación (%)	1.823

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

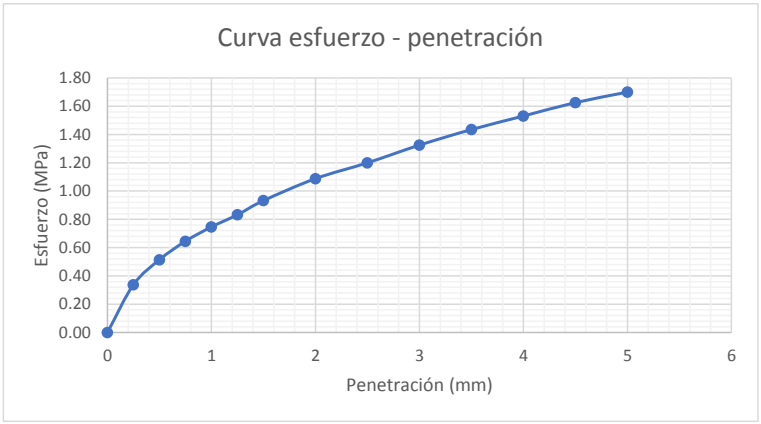
Humedad natural	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	104.52
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	242.04
Masa recipiente + muestra seca (g)	180.69
Contenido de humedad (%)	**80.5**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	6.93	0.34
0.020	0.500	10.54	0.51
0.030	0.750	13.22	0.65
0.039	1.000	15.30	0.75
0.049	1.250	17.06	0.83
0.059	1.500	19.11	0.93
0.079	2.000	22.29	1.09
0.098	2.500	24.59	1.20
0.118	3.000	27.15	1.32
0.138	3.500	29.41	1.43
0.157	4.000	31.37	1.53
0.177	4.500	33.31	1.63
0.197	5.000	34.83	1.70

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

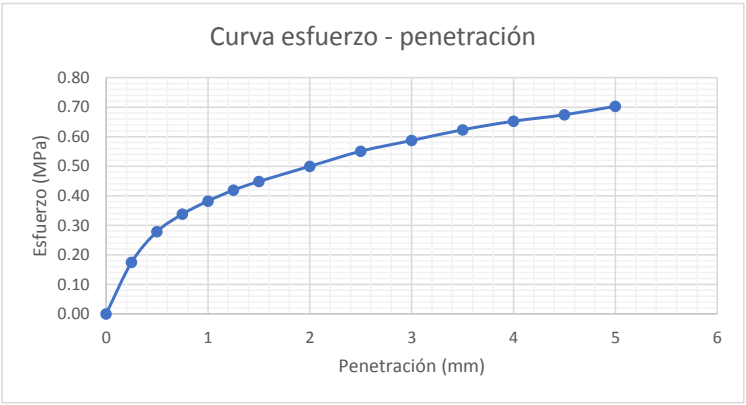
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Agosto 23 a 29 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	104.52
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	242.04
Masa recipiente + muestra seca (g)	180.69
Contenido de humedad (%)	80.54

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	3.58	0.17
0.020	0.500	5.71	0.28
0.030	0.750	6.93	0.34
0.039	1.000	7.83	0.38
0.049	1.250	8.59	0.42
0.059	1.500	9.19	0.45
0.079	2.000	10.24	0.50
0.098	2.500	11.29	0.55
0.118	3.000	12.03	0.59
0.138	3.500	12.78	0.62
0.157	4.000	13.37	0.65
0.177	4.500	13.82	0.67
0.197	5.000	14.41	0.70



Humedad final	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	116.46
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	251.46
Masa recipiente + muestra seca (g)	188.24
Contenido de humedad (%)	**88.07**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	17.13
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	47.06
Masa recipiente + suelo seco (g)	32.39
Contenido de humedad (%)	**96.1**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	118.5
Masa de la muestra parafinada (g)	128.3
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	30.6
Temperatura del agua (º)	15
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99910
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**87.25**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	118.5
Volumen de la muestra (cm^3)	87.25
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.36
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**13.32**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

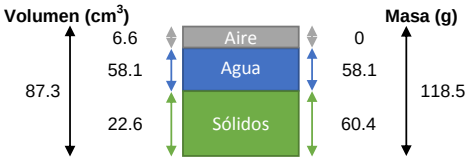
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	147.42	646.47	16.4	0.99888	499.61
2	147.41	646.47	16.4	0.99888	499.62
3	147.41	646.45	16.4	0.99888	499.60
4	147.42	646.49	16.4	0.99888	499.63
5	147.42	646.47	16.8	0.99881	499.64
Prom	**147.42**	**646.47**			**499.62**
Desv.	**0.01**	**0.01**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	50.1
Temperatura de ensayo (ºC)	21.5
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99789
Masa picnómetro vacío (g)	147.42
Volumen picnómetro (cm^3)	499.62
Masa picnómetro con agua (g)	645.98
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	677.4
Gravedad específica sin corregir	2.68
Factor de corrección	0.99968
Gravedad específica corregida	**2.68**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**2.87**
η (%)	**74.14**
S (%)	**89.85**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA)
INV - E - 123

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

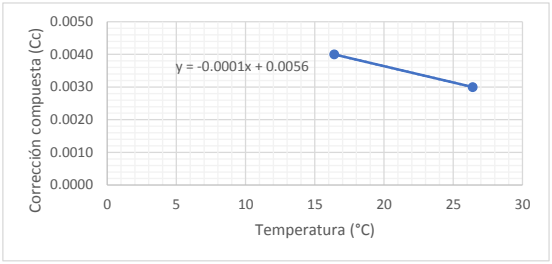
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	17.1
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	33.4
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	33.4
Masa del agua (g)	0
Masa material seco (g)	16.3
Humedad higroscópica (%)	0.0
Factor corrección Ch	**1.0000**

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H

Rango de temperaturas (ºC)	16.4	26.4
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0040	1.0030
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0030



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	50.0
Gravedad específica del suelo - Gs	2.68
Gravedad específica del agua - G_1	1.000
$Constante\ A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_S}{G_S - g_1}\right]$	
A	3190

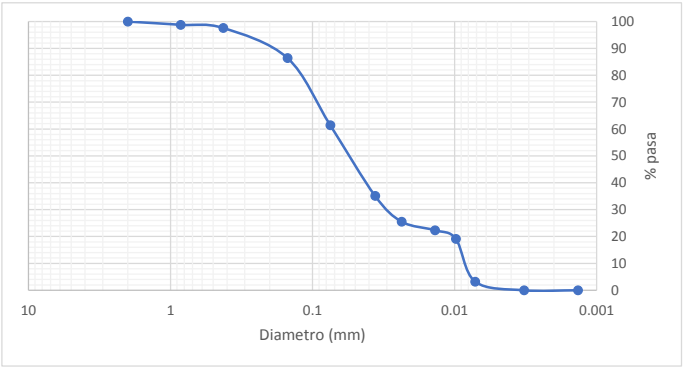
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	11:35

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (ºC)	Cc	$R_{CORREGIDO}$	% suelo suspensión	K	L (cm)	ϕ partículas (mm)
11:37	2	1.015	17.2	0.0039	1.011	35.10	0.01401	13.4	0.0363
11:40	5	1.012	17.2	0.0039	1.008	25.52	0.01401	14.2	0.0236
11:50	15	1.011	17.6	0.0039	1.007	22.33	0.01401	14.4	0.0137
12:05	30	1.010	17.8	0.0039	1.006	19.14	0.01401	14.7	0.0098
12:35	60	1.005	18.0	0.0038	1.001	3.19	0.01386	16.0	0.0072
15:52	250	1.003	25.4	0.0031	1.000	0.00	0.01272	16.3	0.0032
11:35	1440	1.003	25.0	0.0031	1.000	0.00	0.01275	16.3	0.0014

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	50.0
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	19.3
% Retenido en tamiz No 200	38.6
% Pasa el tamiz No 200	61.4

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	$W_{RETENIDO}$ (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.00	100.0	0.0
2.000	No 10	0.00	0.00	100.0	0.0
0.850	No 20	0.60	1.20	98.8	1.2
0.425	No 40	0.60	1.20	97.6	2.4
0.150	No 100	5.60	11.20	86.4	13.6
0.075	No 200	12.50	25.00	61.4	38.6



Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	2
Fina	0.425 - 0.075	36
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	61

Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas	4.75 - 0.075	39
Finos	< 0.075	61

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

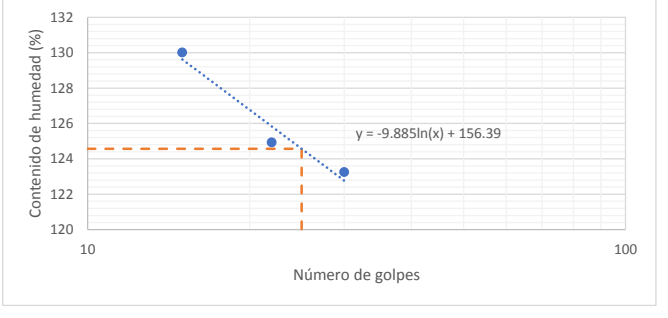
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	74	73	63
Masa del recipiente (g)	11.21	10.812	10.804
No. Golpes	30	22	15
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	23.005	21.141	21.799
Masa recipiente + suelo seco (g)	16.493	15.404	15.584
Contenido de humedad (%)	123	125	130



LL (%)	**125**

2. Determinación límite plástico

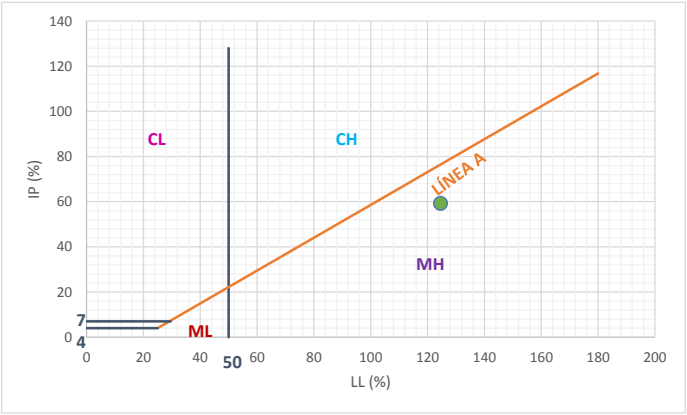
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	59	57
Masa del recipiente (g)	11.303	11.081
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	18.531	17.945
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.672	15.239
Contenido de humedad (%)	65	65

LP (%)	**65**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**59**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**MH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Agosto 09 de 2019

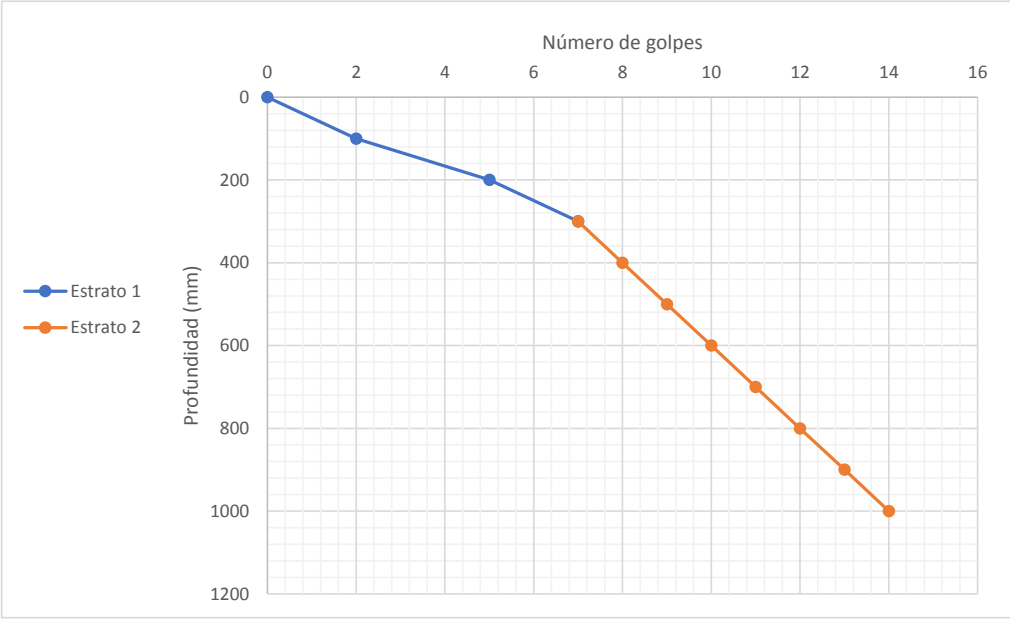
Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
2	100	100	50	1	50
3	200	100	33	1	33
2	300	100	50	1	50
1	400	100	100	1	100
1	500	100	100	1	100
1	600	100	100	1	100
1	700	100	100	1	100
1	800	100	100	1	100
1	900	100	100	1	100
1	1000	100	100	1	100

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	41	300
2	100	700

DN subrasante (mm/golpe)	**92**



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**100**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

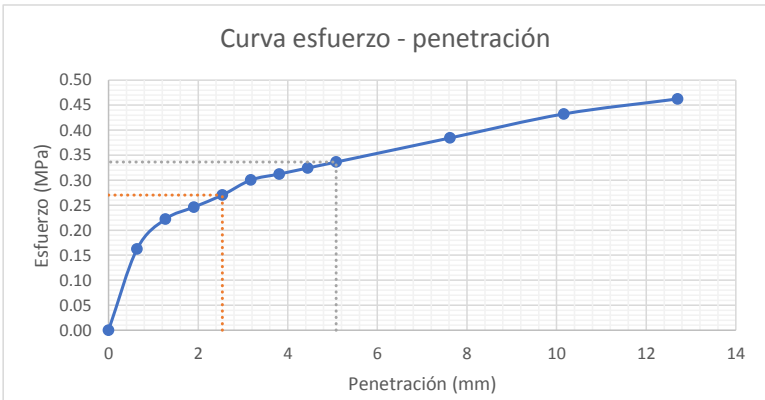
Humedad natural	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	104.92
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	311.86
Masa recipiente + muestra seca (g)	207.15
Contenido de humedad (%)	102.4

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	31.99	0.16
0.050	1.270	43.84	0.22
0.075	1.905	48.58	0.25
0.100	2.540	53.32	0.27
0.125	3.175	59.24	0.30
0.150	3.810	61.61	0.31
0.175	4.445	63.98	0.32
0.200	5.080	66.35	0.34
0.300	7.620	75.83	0.38
0.400	10.160	85.31	0.43
0.500	12.700	91.23	0.46

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.27
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.34
$CBR_{2,54}$ (%)	3.92
$CBR_{5,08}$ (%)	3.25
CBR sin imersión (%)	**3.92**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

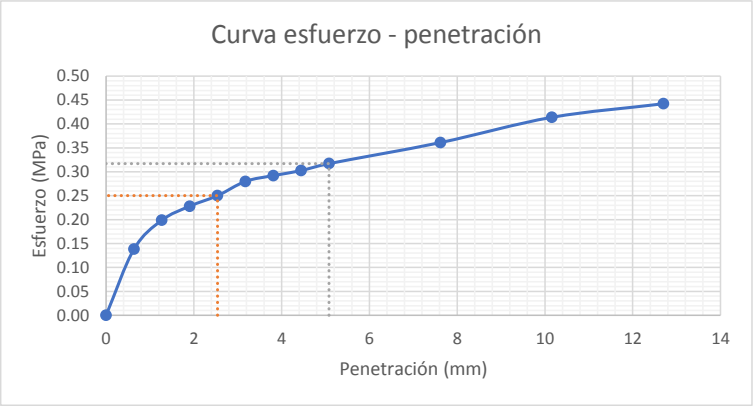
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	104.92
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	311.86
Masa recipiente + muestra seca (g)	207.15
Contenido de humedad (%)	102.4

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	27.25	0.14
0.050	1.270	39.21	0.20
0.075	1.905	44.98	0.23
0.100	2.540	49.36	0.25
0.125	3.175	55.21	0.28
0.150	3.810	57.61	0.29
0.175	4.445	59.66	0.30
0.200	5.080	62.55	0.32
0.300	7.620	71.24	0.36
0.400	10.160	81.65	0.41
0.500	12.700	87.24	0.44



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.25
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.32
$CBR_{2,54}$ (%)	3.63
$CBR_{5,08}$ (%)	3.07
CBR con inmersión (%)	**3.63**

Humedad final	
# recipiente	50
Masa recipiente (g)	104.47
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	327.13
Masa recipiente + muestra seca (g)	206.02
Contenido de humedad (%)	**119.3**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	130.76	130.53	130.59	130.88	130.69
Diámetro (mm)	62.93	63.03	62.95	62.8	62.93

Área (mm^2)	3110.07
Volumen (cm^3)	406.46
Masa húmeda muestra (g)	531.42
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.31

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	79	73	6	25.40	23.47	1.93	0.066	0.068	0.067	0.00051	45.78
1	41.4	12.4	38	36	2	12.22	11.58	0.64	0.034	0.035	0.035	0.00026	43.85
2	41.4	24.8	74	67	7	23.79	21.54	2.25	0.070	0.072	0.071	0.00054	39.65
3	41.4	37.3	116	105	11	37.30	33.76	3.54	0.115	0.115	0.115	0.00088	38.37
4	41.4	49.7	159	145	14	51.12	46.62	4.50	0.177	0.178	0.178	0.00136	34.33
5	41.4	62	198	178	20	63.66	57.23	6.43	0.249	0.249	0.249	0.00191	30.04
6	27.6	12.4	31	29	2	9.97	9.32	0.64	0.030	0.030	0.030	0.00023	40.62
7	27.6	24.8	65	59	6	20.90	18.97	1.93	0.069	0.070	0.070	0.00053	35.67
8	27.6	37.3	109	99	10	35.05	31.83	3.22	0.124	0.124	0.124	0.00095	33.55
9	27.6	49.7	154	140	14	49.52	45.01	4.50	0.197	0.197	0.197	0.00151	29.86
10	27.6	62	200	181	19	64.31	58.20	6.11	0.287	0.286	0.287	0.00219	26.55
11	13.8	12.4	26	23	3	8.36	7.40	0.96	0.026	0.026	0.026	0.00020	37.17
12	13.8	24.8	81	74	7	26.04	23.79	2.25	0.095	0.094	0.095	0.00072	32.91
13	13.8	37.3	111	100	11	35.69	32.15	3.54	0.135	0.135	0.135	0.00103	31.13
14	13.8	49.7	164	149	15	52.73	47.91	4.82	0.202	0.200	0.201	0.00154	31.15
15	13.8	62	203	184	19	65.27	59.16	6.11	0.265	0.265	0.265	0.00203	29.18

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	5
Masa recipiente (g)	110.98
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	642.4
Masa recipiente + muestra seca (g)	375.85
Masa del agua (g)	266.55
Masa material seco (g)	264.87
Masa material húmedo (g)	531.42
Humedad (%)	100.63

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	5
Masa recipiente (g)	110.98
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	639.05
Masa recipiente + muestra seca (g)	375.85
Masa del agua (g)	263.2
Masa material seco (g)	264.87
Masa material húmedo (g)	528.07
Humedad (%)	99.37

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

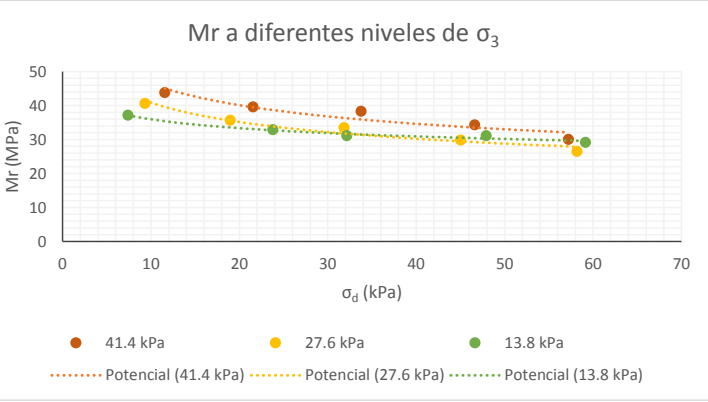
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

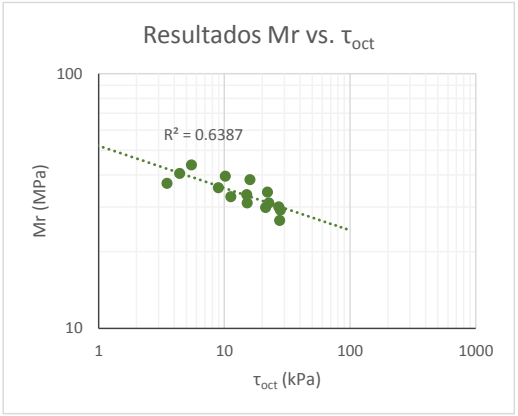
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

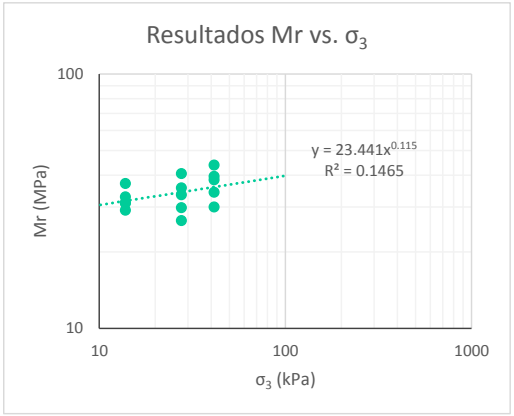
Ecuaciones

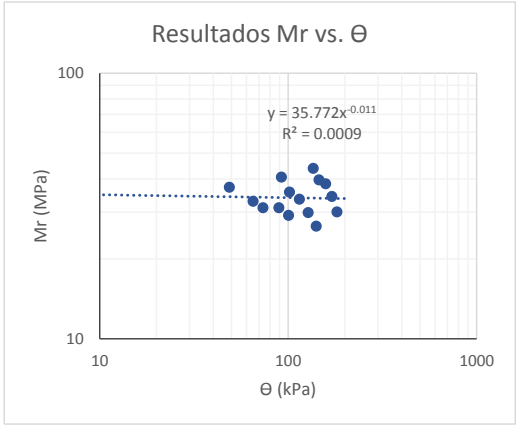
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

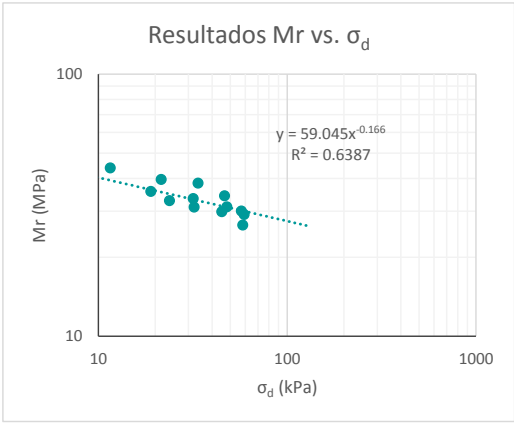
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.58	41.40	5.4566	135.775	43.8
2	21.54	41.40	10.1554	145.743	39.7
3	33.76	41.40	15.9152	157.961	38.4
4	46.62	41.40	21.9781	170.823	34.3
5	57.23	41.40	26.9801	181.433	30.0
6	9.32	27.60	4.3956	92.125	40.6
7	18.97	27.60	8.9428	101.771	35.7
8	31.83	27.60	15.0058	114.632	33.5
9	45.01	27.60	21.2203	127.815	29.9
10	58.20	27.60	27.4348	140.998	26.5
11	7.40	13.80	3.4862	48.795	37.2
12	23.79	13.80	11.2164	65.194	32.9
13	32.15	13.80	15.1573	73.554	31.1
14	47.91	13.80	22.5844	89.309	31.2
15	59.16	13.80	27.8895	100.563	29.2











ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Moossazadeh & Witczak, 1981

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$$

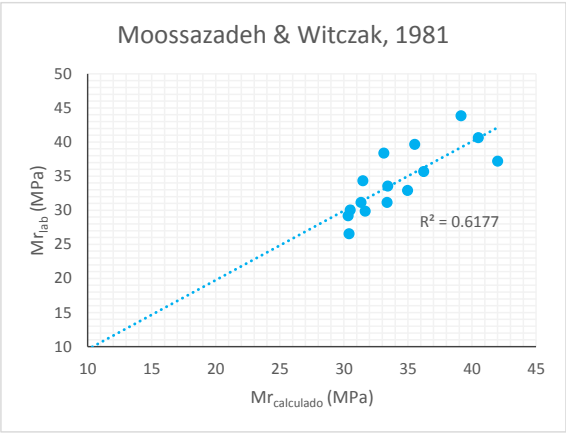
k_1	27.859
k_2	-0.156
P_a (kPa)	102

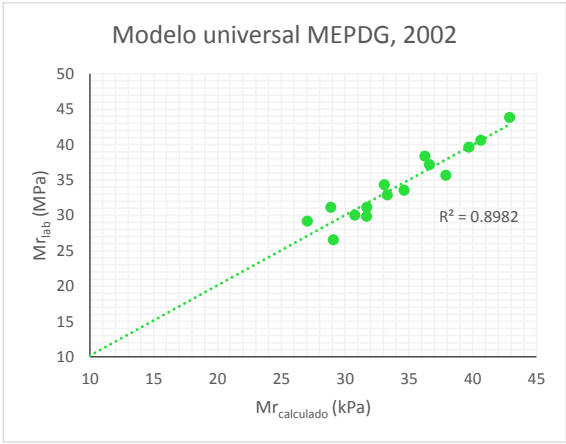
Modelo universal MEPDG, 2002

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$$

k_1	0.444
k_2	0.193
k_3	-2.128
P_a (kPa)	102

Ciclo	Mr_{lab} (MPa)	Mr_{cal} (MPa)	Difer (MPa)	$Difer^2$ (Mpa)	Mr_{lab} (MPa)	Mr_{cal} (MPa)	Difer (MPa)	$Difer^2$ (MPa)
1	43.8	39.161	4.7	22.0	43.8	42.880	1.0	0.9
2	39.7	35.533	4.1	17.0	39.7	39.686	0.0	0.0
3	38.4	33.121	5.2	27.5	38.4	36.233	2.1	4.6
4	34.3	31.490	2.8	8.1	34.3	33.062	1.3	1.6
5	30.0	30.495	-0.5	0.2	30.0	30.749	-0.7	0.5
6	40.6	40.509	0.1	0.0	40.6	40.631	0.0	0.0
7	35.7	36.247	-0.6	0.3	35.7	37.891	-2.2	4.9
8	33.5	33.427	0.1	0.0	33.5	34.621	-1.1	1.1
9	29.9	31.663	-1.8	3.2	29.9	31.670	-1.8	3.3
10	26.5	30.416	-3.9	15.0	26.5	29.067	-2.5	6.3
11	37.2	42.005	-4.8	23.3	37.2	36.596	0.6	0.3
12	32.9	34.985	-2.1	4.3	32.9	33.296	-0.4	0.2
13	31.1	33.375	-2.2	5.1	31.1	31.688	-0.6	0.3
14	31.2	31.356	-0.2	0.0	31.2	28.865	2.3	5.2
15	29.2	30.337	-1.2	1.3	29.2	27.026	2.2	4.6
			Σ	127.4			**Σ**	33.9





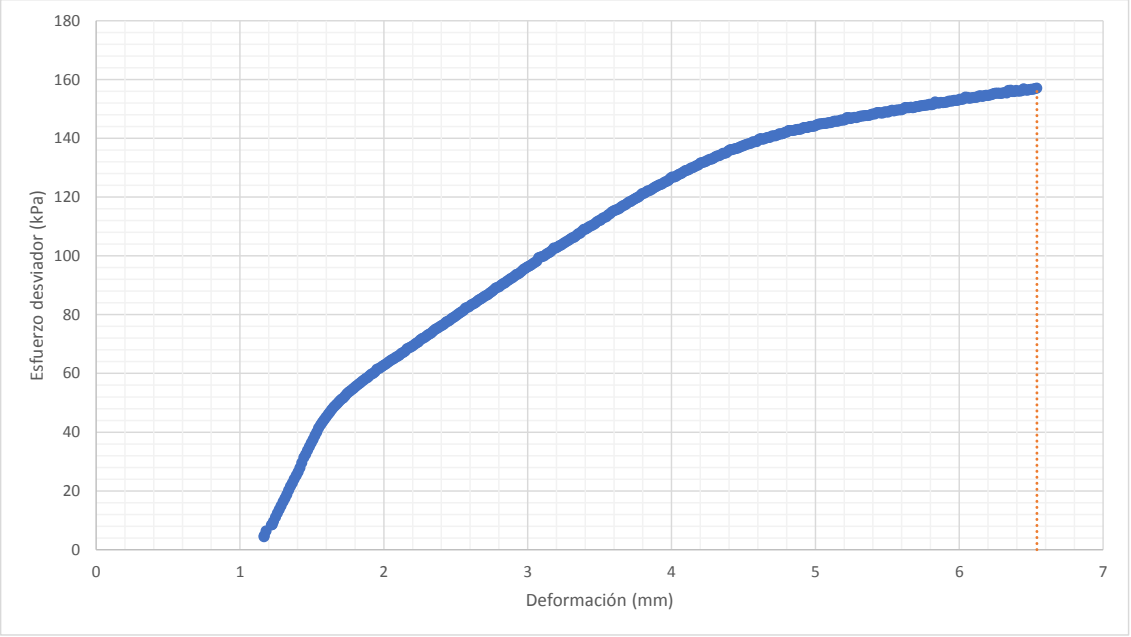
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.131
Máximo esfuerzo (kPa)	157.10
Máxima deformación (mm)	6.54
Máxima deformación (%)	5.005

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

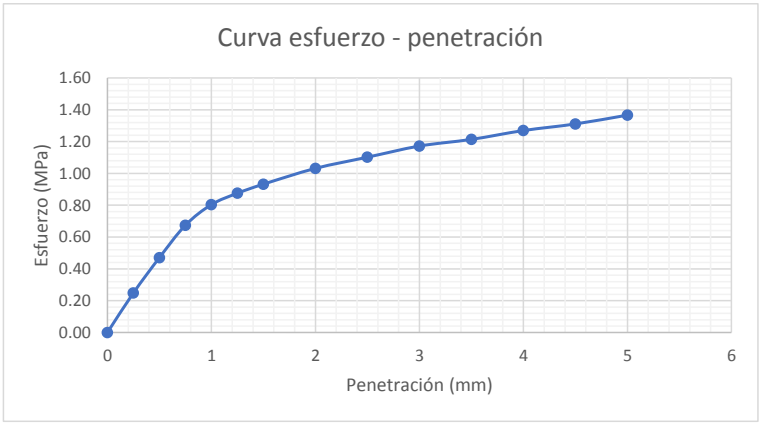
Humedad natural	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	115.34
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	228.36
Masa recipiente + muestra seca (g)	169.94
Contenido de humedad (%)	**107.0**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	5.10	0.25
0.020	0.500	9.64	0.47
0.030	0.750	13.82	0.67
0.039	1.000	16.47	0.80
0.049	1.250	17.94	0.88
0.059	1.500	19.11	0.93
0.079	2.000	21.14	1.03
0.098	2.500	22.58	1.10
0.118	3.000	24.02	1.17
0.138	3.500	24.88	1.21
0.157	4.000	26.02	1.27
0.177	4.500	26.87	1.31
0.197	5.000	28.00	1.37

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

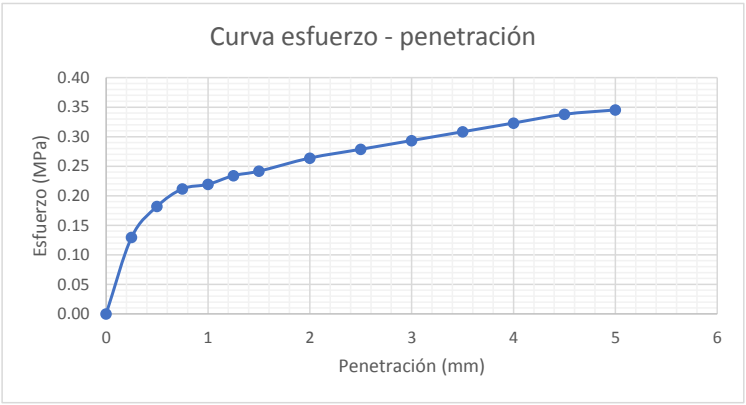
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 02 a 06 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	115.34
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	228.36
Masa recipiente + muestra seca (g)	169.94
Contenido de humedad (%)	107.00

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	2.66	0.13
0.020	0.500	3.73	0.18
0.030	0.750	4.34	0.21
0.039	1.000	4.49	0.22
0.049	1.250	4.80	0.23
0.059	1.500	4.95	0.24
0.079	2.000	5.41	0.26
0.098	2.500	5.71	0.28
0.118	3.000	6.02	0.29
0.138	3.500	6.32	0.31
0.157	4.000	6.62	0.32
0.177	4.500	6.93	0.34
0.197	5.000	7.08	0.35



Humedad final	
# recipiente	7
Masa recipiente (g)	105.9
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	237.69
Masa recipiente + muestra seca (g)	168.58
Contenido de humedad (%)	**110.26**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	17.64
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	63.16
Masa recipiente + suelo seco (g)	41.03
Contenido de humedad (%)	**94.6**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	93.5
Masa de la muestra parafinada (g)	97.8
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	26.7
Temperatura del agua (º)	19
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99841
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**66.59**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	93.5
Volumen de la muestra (cm^3)	66.59
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.40
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**13.77**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

4. Calibración del picnómetro

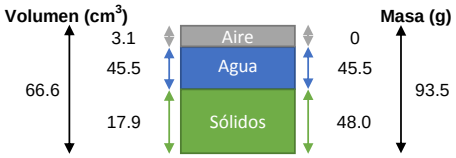
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.2
Temperatura de ensayo (ºC)	18.4
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99852
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	642.06
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	672.94
Gravedad específica sin corregir	2.69
Factor de corrección	1.00032
Gravedad específica corregida	**2.69**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**2.72**
η (%)	**73.09**
S (%)	**93.54**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA)
INV - E - 123

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

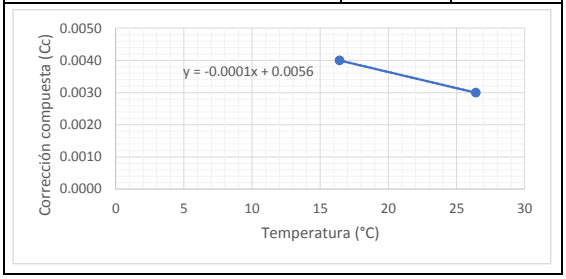
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	7.03
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	19.25
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	18.86
Masa del agua (g)	0.39
Masa material seco (g)	11.83
Humedad higroscópica (%)	3.3
Factor corrección Ch	**0.9681**

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H

Rango de temperaturas (ºC)	16.4	26.4
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0040	1.0030
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0030



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.35
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	48.7
Gravedad específica del suelo - Gs	2.69
Gravedad específica del agua - G_1	1.000
$Constante\ A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_S}{G_S - g_1}\right]$	
A	3266

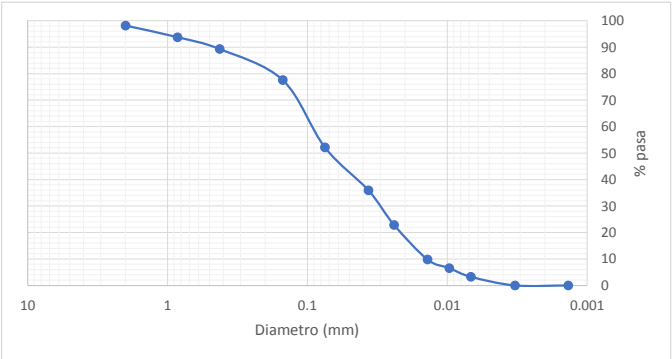
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	11:35

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (ºC)	Cc	$R_{CORREGIDO}$	% suelo suspensión	K	L (cm)	ϕ partículas (mm)
11:37	2	1.016	16.2	0.0040	1.011	35.92	0.01415	13.4	0.0366
11:40	5	1.012	16.2	0.0040	1.007	22.86	0.01415	14.4	0.0240
11:50	15	1.007	19.6	0.0037	1.003	9.80	0.01362	15.5	0.0138
12:05	30	1.006	21.0	0.0035	1.002	6.53	0.01332	15.8	0.0097
12:35	60	1.004	22.6	0.0034	1.001	3.27	0.01313	16.0	0.0068
15:52	250	1.003	24.8	0.0032	1.000	0.00	0.01283	16.3	0.0033
11:35	1440	1.003	24.6	0.0032	1.000	0.00	0.01283	16.3	0.0014

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	48.7
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	23.3
% Retenido en tamiz No 200	47.8
% Pasa el tamiz No 200	52.2

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	$W_{RETENIDO}$ (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.00	100.0	0.0
2.000	No 10	0.89	1.83	98.2	1.8
0.850	No 20	2.14	4.39	93.8	6.2
0.425	No 40	2.18	4.47	89.3	10.7
0.150	No 100	5.72	11.73	77.6	22.4
0.075	No 200	12.39	25.42	52.2	47.8



Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	2
Media	2 - 0.425	9
Fina	0.425 - 0.075	37
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	52

Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas	4.75 - 0.075	48
Finos	< 0.075	52

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

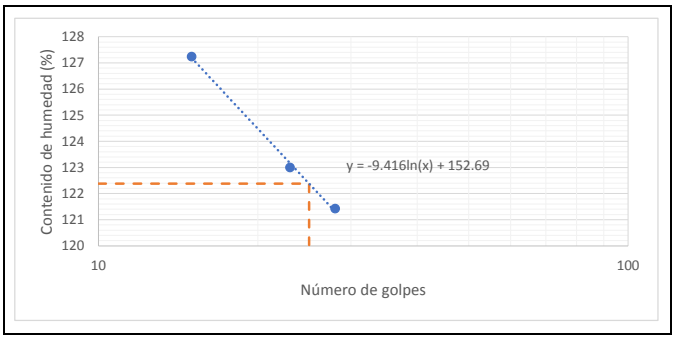
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	12	A1	55
Masa del recipiente (g)	9.563	10.518	12.051
No. Golpes	15	23	28
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	18.655	20.535	21.227
Masa recipiente + suelo seco (g)	13.564	15.01	16.195
Contenido de humedad (%)	127	123	121



LL (%)	122

2. Determinación límite plástico

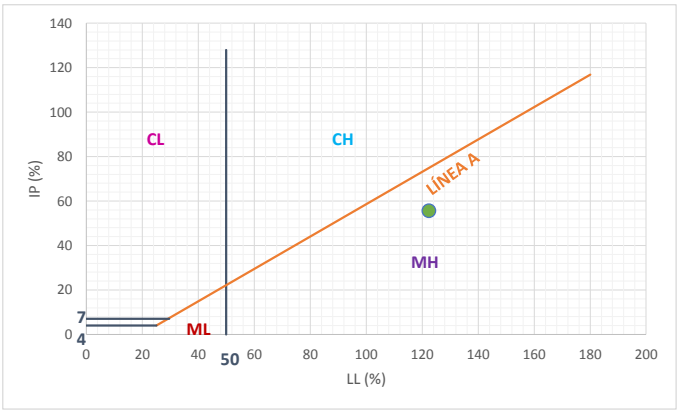
Ensayo	1	2
Número recipiente	62	71
Masa del recipiente (g)	10.934	11.472
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	17.728	17.803
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.009	15.27
Contenido de humedad (%)	67	67

LP (%)	67

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	56

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Septiembre 06 de 2019

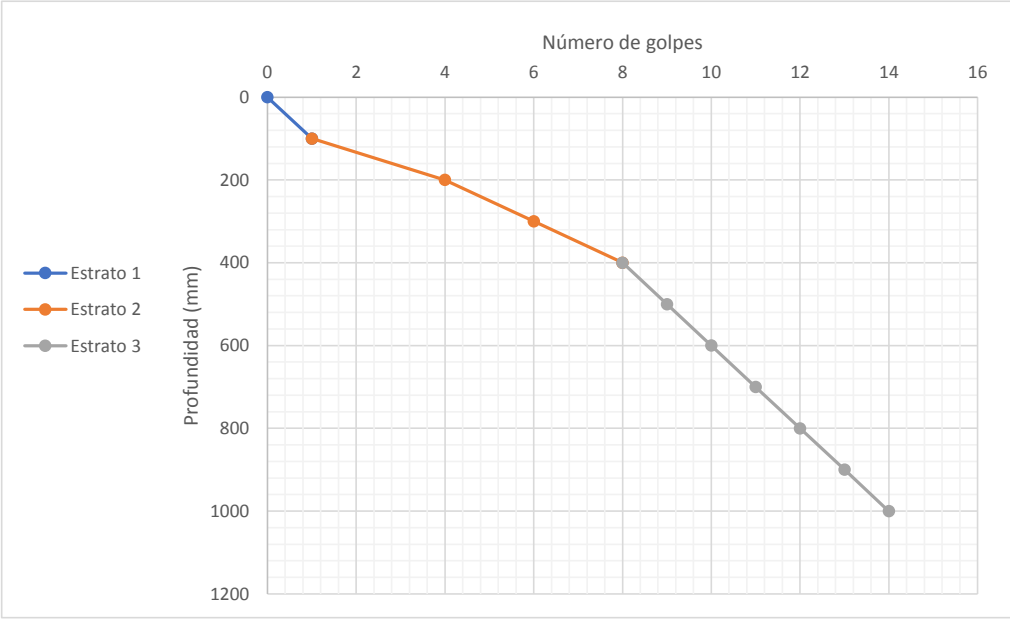
Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
3	200	100	33	1	33
2	300	100	50	1	50
2	400	100	50	1	50
1	500	100	100	1	100
1	600	100	100	1	100
1	700	100	100	1	100
1	800	100	100	1	100
1	900	100	100	1	100
1	1000	100	100	1	100

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	100	100
2	50	300
3	100.00	600

DN subrasante (mm/golpe)	**85**



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**50**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

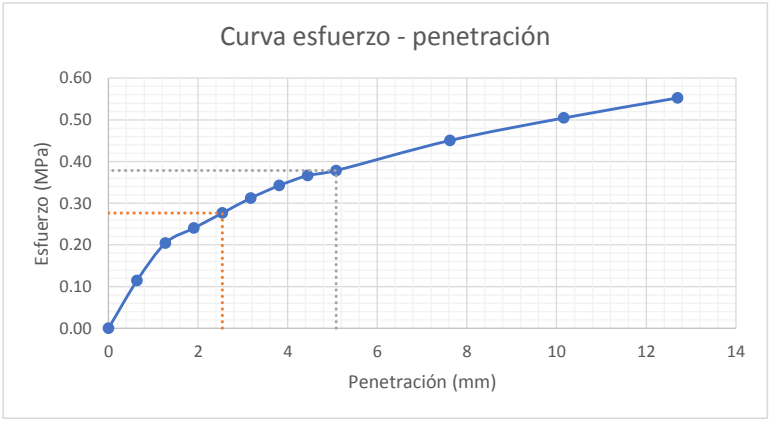
Humedad natural	
# recipiente	8
Masa recipiente (g)	112.27
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	229.7
Masa recipiente + muestra seca (g)	172.27
Contenido de humedad (%)	95.7

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	22.51	0.11
0.050	1.270	40.28	0.20
0.075	1.905	47.39	0.24
0.100	2.540	54.50	0.28
0.125	3.175	61.61	0.31
0.150	3.810	67.53	0.34
0.175	4.445	72.27	0.37
0.200	5.080	74.64	0.38
0.300	7.620	88.86	0.45
0.400	10.160	99.52	0.50
0.500	12.700	109.00	0.55

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.28
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.38
$CBR_{2,54}$ (%)	4.01
$CBR_{5,08}$ (%)	3.66
CBR sin imersión (%)	**4.01**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

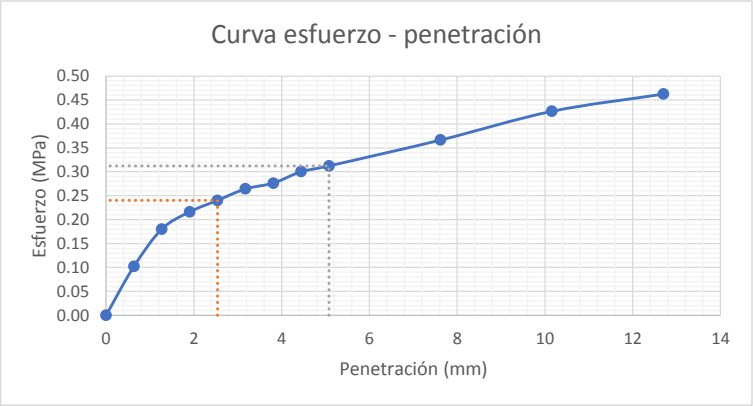
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	8
Masa recipiente (g)	112.27
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	229.7
Masa recipiente + muestra seca (g)	172.27
Contenido de humedad (%)	95.7

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	20.14	0.10
0.050	1.270	35.54	0.18
0.075	1.905	42.65	0.22
0.100	2.540	47.39	0.24
0.125	3.175	52.13	0.26
0.150	3.810	54.50	0.28
0.175	4.445	59.24	0.30
0.200	5.080	61.61	0.31
0.300	7.620	72.27	0.37
0.400	10.160	84.12	0.43
0.500	12.700	91.23	0.46



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.24
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.31
$CBR_{2,54}$ (%)	3.49
$CBR_{5,08}$ (%)	3.02
CBR con inmersión (%)	**3.49**

Humedad final	
# recipiente	50
Masa recipiente (g)	104.47
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	327.13
Masa recipiente + muestra seca (g)	206.02
Contenido de humedad (%)	**119.3**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	121.22	121.02	120.68	121.02	120.99
Diámetro (mm)	60.64	61.55	61.26	61.24	61.17

Área (mm^2)	2939.02
Volumen (cm^3)	355.58
Masa húmeda muestra (g)	473.22
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.33

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	77	71	6	26.20	24.16	2.04	0.070	0.070	0.070	0.00058	41.75
1	41.4	12.4	28	26	2	9.53	8.85	0.68	0.018	0.018	0.018	0.00015	59.46
2	41.4	24.8	69	63	6	23.48	21.44	2.04	0.048	0.049	0.049	0.00040	53.47
3	41.4	37.3	116	106	10	39.47	36.07	3.40	0.087	0.088	0.088	0.00072	49.87
4	41.4	49.7	135	120	15	45.93	40.83	5.10	0.124	0.125	0.125	0.00103	39.68
5	41.4	62	183	164	19	62.27	55.80	6.46	0.177	0.178	0.178	0.00147	38.03
6	27.6	12.4	29	27	2	9.87	9.19	0.68	0.022	0.022	0.022	0.00018	50.52
7	27.6	24.8	75	70	5	25.52	23.82	1.70	0.077	0.077	0.077	0.00064	37.42
8	27.6	37.3	118	108	10	40.15	36.75	3.40	0.131	0.131	0.131	0.00108	33.94
9	27.6	49.7	138	124	14	46.95	42.19	4.76	0.152	0.153	0.153	0.00126	33.47
10	27.6	62	182	164	18	61.93	55.80	6.12	0.179	0.180	0.180	0.00148	37.61
11	13.8	12.4	18	15	3	6.12	5.10	1.02	0.011	0.011	0.011	0.00009	56.13
12	13.8	24.8	97	91	6	33.00	30.96	2.04	0.092	0.093	0.093	0.00076	40.50
13	13.8	37.3	123	113	10	41.85	38.45	3.40	0.120	0.120	0.120	0.00099	38.76
14	13.8	49.7	143	128	15	48.66	43.55	5.10	0.149	0.150	0.150	0.00124	35.25
15	13.8	62	181	163	18	61.59	55.46	6.12	0.192	0.193	0.193	0.00159	34.86

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	108.46
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	581.68
Masa recipiente + muestra seca (g)	348.97
Masa del agua (g)	232.71
Masa material seco (g)	240.51
Masa material húmedo (g)	473.22
Humedad (%)	96.76

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	108.46
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	580.4
Masa recipiente + muestra seca (g)	348.97
Masa del agua (g)	231.43
Masa material seco (g)	240.51
Masa material húmedo (g)	471.94
Humedad (%)	96.22

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

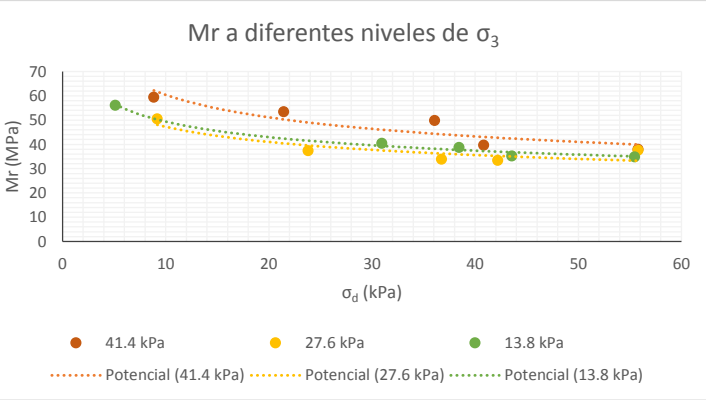
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

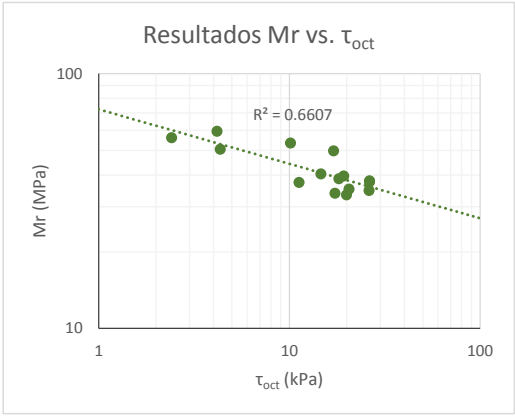
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

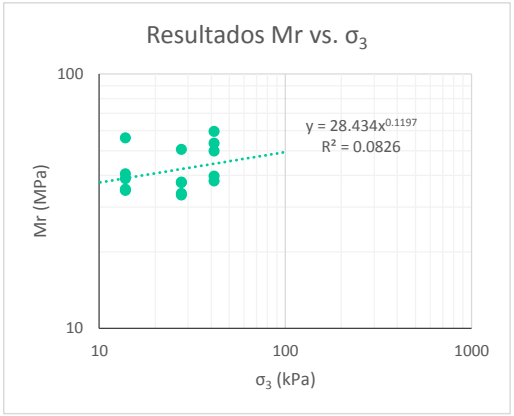
Ecuaciones

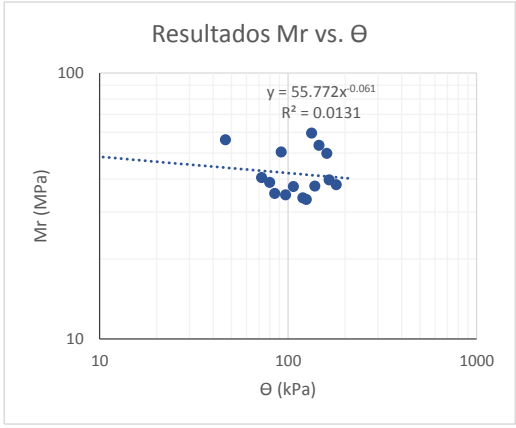
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

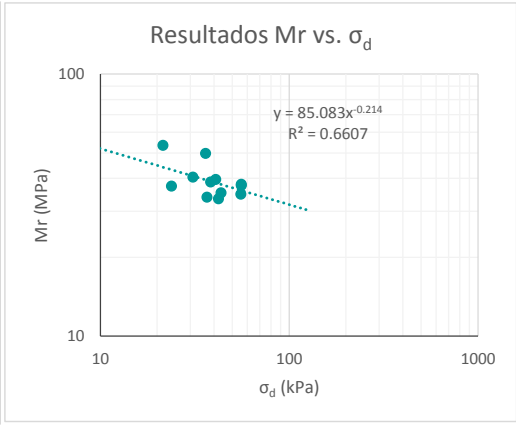
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	8.85	41.40	4.1703	133.046	59.5
2	21.44	41.40	10.1049	145.636	53.5
3	36.07	41.40	17.0019	160.266	49.9
4	40.83	41.40	19.2474	165.030	39.7
5	55.80	41.40	26.3048	180.001	38.0
6	9.19	27.60	4.3307	91.987	50.5
7	23.82	27.60	11.2277	106.617	37.4
8	36.75	27.60	17.3227	119.547	33.9
9	42.19	27.60	19.8890	124.991	33.5
10	55.80	27.60	26.3048	138.601	37.6
11	5.10	13.80	2.4059	46.504	56.1
12	30.96	13.80	14.5960	72.363	40.5
13	38.45	13.80	18.1247	79.848	38.8
14	43.55	13.80	20.5306	84.952	35.2
15	55.46	13.80	26.1444	96.861	34.9











ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

Moossazadeh & Witczak, 1981

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$$

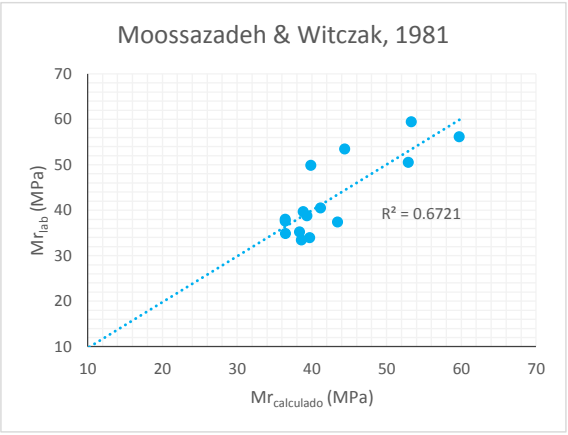
k_1	32.168
k_2	-0.207
P_a (kPa)	102

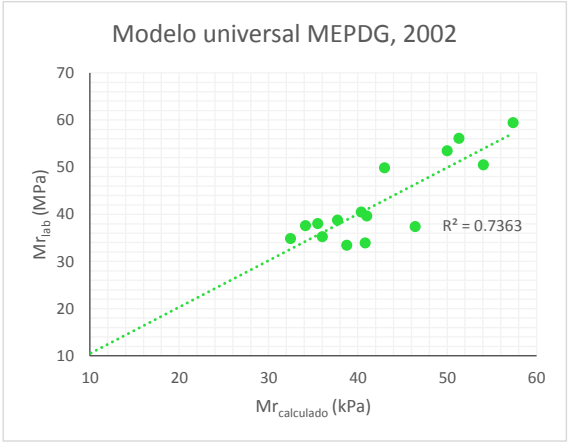
Modelo universal MEPDG, 2002

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$$

k_1	0.604
k_2	0.150
k_3	-2.777
P_a (kPa)	102

Ciclo	Mr_{lab} (MPa)	Mr_{cal} (MPa)	Difer (MPa)	$Difer^2$ (Mpa)	Mr_{lab} (MPa)	Mr_{cal} (MPa)	Difer (MPa)	$Difer^2$ (MPa)
1	59.5	53.320	6.1	37.7	59.5	57.361	2.1	4.4
2	53.5	44.406	9.1	82.2	53.5	49.996	3.5	12.1
3	49.9	39.879	10.0	99.8	49.9	42.973	6.9	47.5
4	39.7	38.869	0.8	0.7	39.7	40.980	-1.3	1.7
5	38.0	36.439	1.6	2.5	38.0	35.483	2.6	6.5
6	50.5	52.906	-2.4	5.7	50.5	54.037	-3.5	12.4
7	37.4	43.450	-6.0	36.3	37.4	46.404	-9.0	80.7
8	33.9	39.725	-5.8	33.5	33.9	40.814	-6.9	47.3
9	33.5	38.607	-5.1	26.4	33.5	38.731	-5.3	27.7
10	37.6	36.439	1.2	1.4	37.6	34.115	3.5	12.2
11	56.1	59.740	-3.6	13.0	56.1	51.306	4.8	23.3
12	40.5	41.156	-0.7	0.4	40.5	40.354	0.1	0.0
13	38.8	39.355	-0.6	0.3	38.8	37.702	1.1	1.1
14	35.2	38.354	-3.1	9.7	35.2	36.017	-0.8	0.6
15	34.9	36.485	-1.6	2.7	34.9	32.438	2.4	5.9
			Σ	352.2			**Σ**	283.3





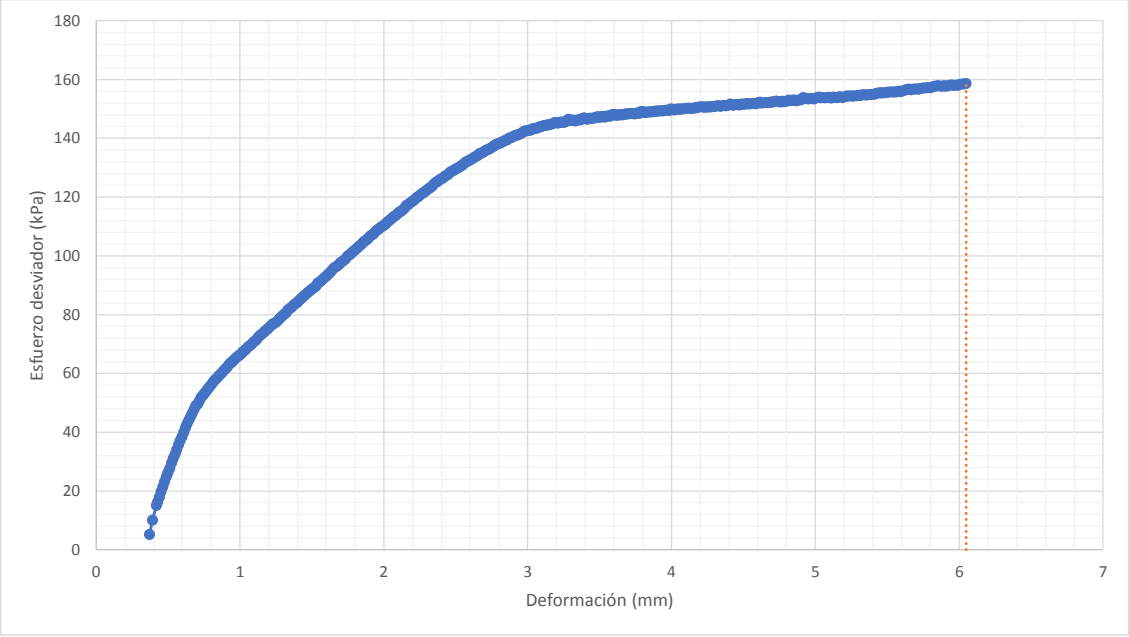
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.121
Máximo esfuerzo (kPa)	158.67
Máxima deformación (mm)	6.048
Máxima deformación (%)	4.999

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

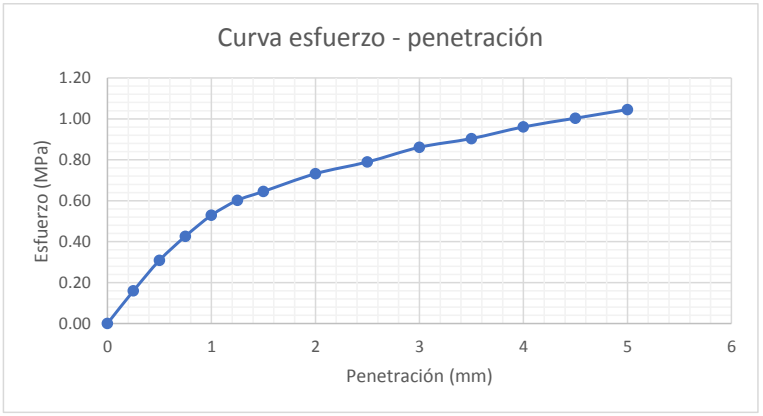
Humedad natural	
# recipiente	15
Masa recipiente (g)	109.58
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	237.58
Masa recipiente + muestra seca (g)	174.48
Contenido de humedad (%)	**97.2**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	3.27	0.16
0.020	0.500	6.32	0.31
0.030	0.750	8.74	0.43
0.039	1.000	10.84	0.53
0.049	1.250	12.33	0.60
0.059	1.500	13.22	0.65
0.079	2.000	15.00	0.73
0.098	2.500	16.18	0.79
0.118	3.000	17.65	0.86
0.138	3.500	18.52	0.90
0.157	4.000	19.69	0.96
0.177	4.500	20.56	1.00
0.197	5.000	21.43	1.05

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

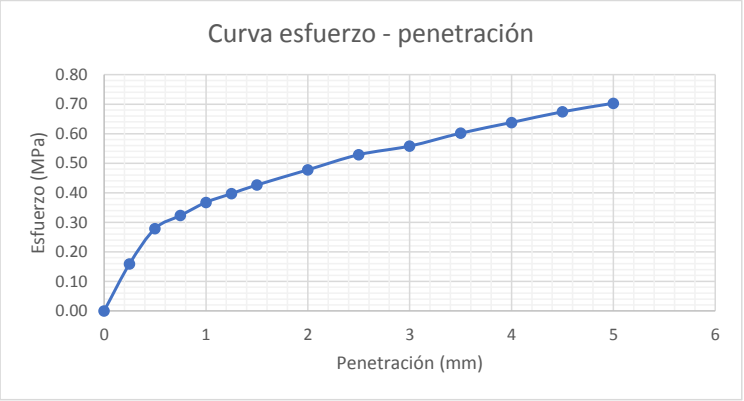
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Septiembre 13 a 19 de 2019	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	15
Masa recipiente (g)	109.58
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	237.58
Masa recipiente + muestra seca (g)	174.48
Contenido de humedad (%)	97.23

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	21
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	3.27	0.16
0.020	0.500	5.71	0.28
0.030	0.750	6.62	0.32
0.039	1.000	7.53	0.37
0.049	1.250	8.14	0.40
0.059	1.500	8.74	0.43
0.079	2.000	9.79	0.48
0.098	2.500	10.84	0.53
0.118	3.000	11.44	0.56
0.138	3.500	12.33	0.60
0.157	4.000	13.08	0.64
0.177	4.500	13.82	0.67
0.197	5.000	14.41	0.70



Humedad final	
# recipiente	15
Masa recipiente (g)	109.5
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	242.64
Masa recipiente + muestra seca (g)	176.58
Contenido de humedad (%)	**98.48**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	7.19
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	34.07
Masa recipiente + suelo seco (g)	20.18
Contenido de humedad (%)	**106.9**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	115.2
Masa de la muestra parafinada (g)	120.6
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	30.6
Temperatura del agua (º)	16
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99895
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**84.29**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	115.2
Volumen de la muestra (cm^3)	84.29
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.37
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**13.41**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

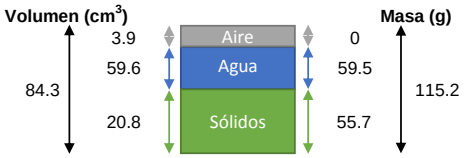
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	48.42
Temperatura de ensayo (ºC)	21.5
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99789
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	641.75
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	672.1
Gravedad específica sin corregir	2.68
Factor de corrección	0.99968
Gravedad específica corregida	**2.68**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**3.05**
η (%)	**75.32**
S (%)	**93.87**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA)
INV - E - 123

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

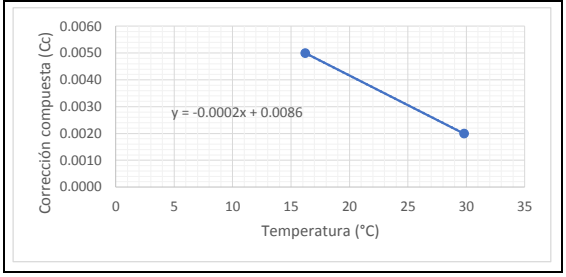
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	6.79
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	20.95
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	20.95
Masa del agua (g)	0
Masa material seco (g)	14.16
Humedad higroscópica (%)	0.0
Factor corrección Ch	**1.0000**

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H

Rango de temperaturas (ºC)	16.2	29.8
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0050	1.0020
Corrección compuesta (Cc)	0.0050	0.0020



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.18
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	50.2
Gravedad específica del suelo - Gs	2.68
Gravedad específica del agua - G_1	1.000
$Constante\ A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_S}{G_S - g_1}\right]$	
A	3179

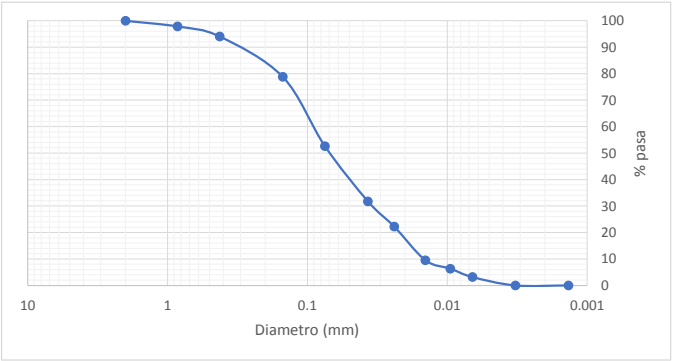
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	08:23

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (ºC)	Cc	$R_{CORREGIDO}$	% suelo suspensión	K	L (cm)	ϕ partículas (mm)
08:25	2	1.015	16.6	0.0049	1.010	31.79	0.01412	13.7	0.0369
08:28	5	1.012	16.6	0.0049	1.007	22.25	0.01412	14.4	0.0240
08:38	15	1.008	16.8	0.0049	1.003	9.54	0.01412	15.5	0.0143
08:53	30	1.006	22.4	0.0036	1.002	6.36	0.01311	15.8	0.0095
09:23	60	1.004	24.6	0.0031	1.001	3.18	0.01281	16.0	0.0066
12:40	250	1.003	25.0	0.0031	1.000	0.00	0.01275	16.3	0.0033
08:23	1440	1.003	24.8	0.0031	1.000	0.00	0.01281	16.3	0.0014

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	50.2
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	23.8
% Retenido en tamiz No 200	47.4
% Pasa el tamiz No 200	52.6

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	$W_{RETENIDO}$ (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.00	100.0	0.0
2.000	No 10	0.02	0.04	100.0	0.0
0.850	No 20	1.07	2.13	97.8	2.2
0.425	No 40	1.89	3.77	94.1	5.9
0.150	No 100	7.66	15.27	78.8	21.2
0.075	No 200	13.13	26.17	52.6	47.4



Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	6
Fina	0.425 - 0.075	41
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	53

Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas	4.75 - 0.075	47
Finos	< 0.075	53

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

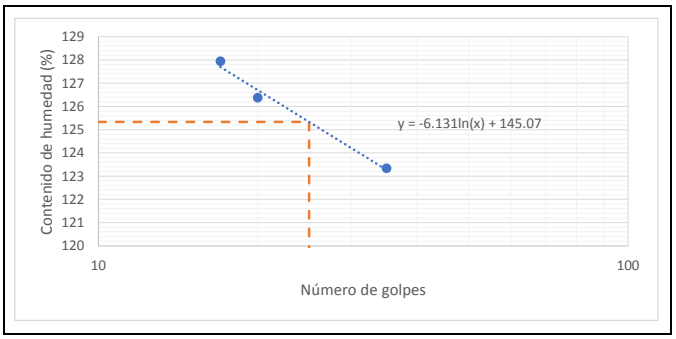
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	A1	55	62
Masa del recipiente (g)	10.622	12.105	11
No. Golpes	35	20	17
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	19.587	20.911	20.004
Masa recipiente + suelo seco (g)	14.636	15.995	14.95
Contenido de humedad (%)	123	126	128



LL (%)	**125**

2. Determinación límite plástico

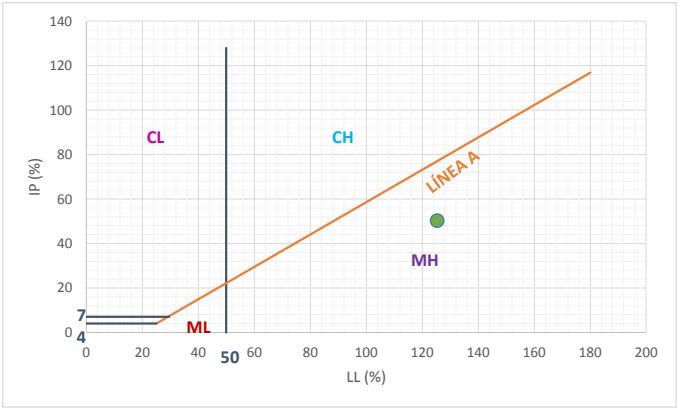
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	12	64
Masa del recipiente (g)	9.653	10.999
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	15.6	17.248
Masa recipiente + suelo seco (g)	13.032	14.587
Contenido de humedad (%)	76	74

LP (%)	**75**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**50**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**MH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Septiembre 06 de 2019

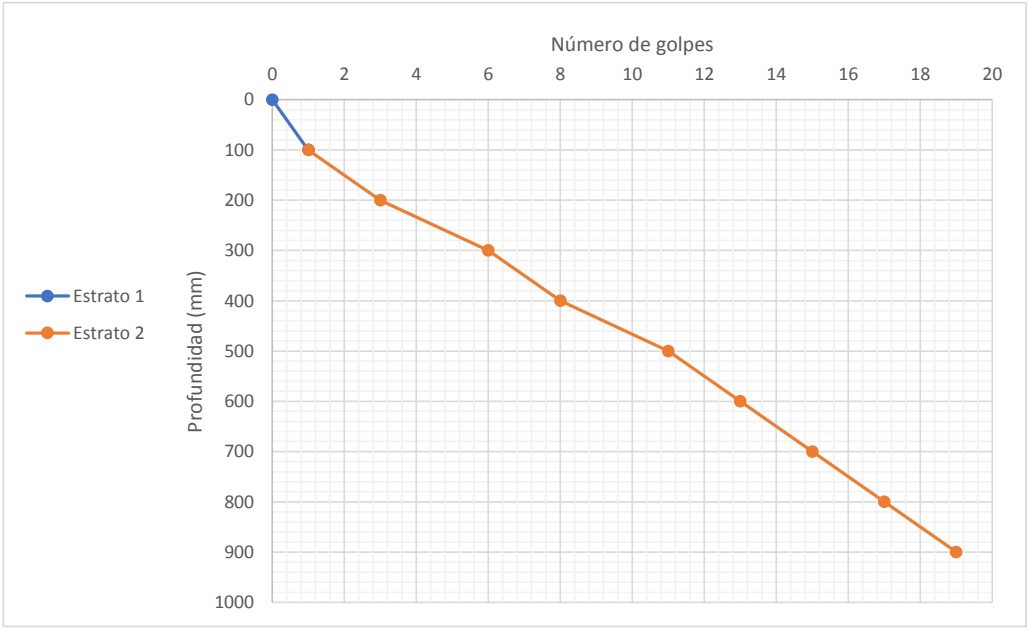
Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
2	200	100	50	1	50
3	300	100	33	1	33
2	400	100	50	1	50
3	500	100	33	1	33
2	600	100	50	1	50
2	700	100	50	1	50
2	800	100	50	1	50
2	900	100	50	1	50

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	100	100
2	44	800

DN subrasante (mm/golpe)	**50**



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**44**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

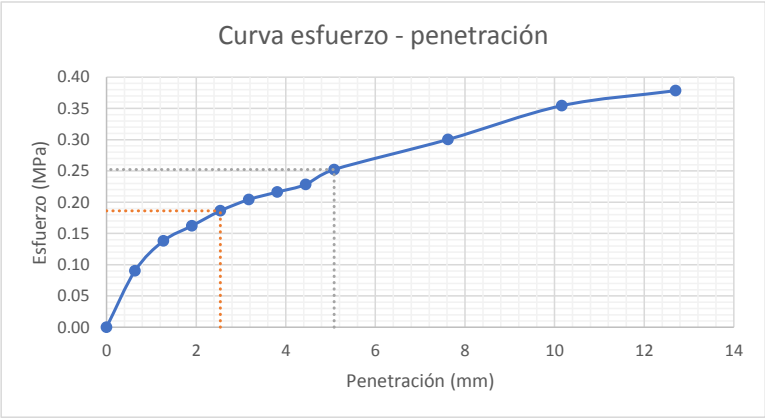
Humedad natural	
# recipiente	23
Masa recipiente (g)	115.25
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	239.5
Masa recipiente + muestra seca (g)	174.96
Contenido de humedad (%)	108.1

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	17.77	0.09
0.050	1.270	27.25	0.14
0.075	1.905	31.99	0.16
0.100	2.540	36.73	0.19
0.125	3.175	40.28	0.20
0.150	3.810	42.65	0.22
0.175	4.445	45.02	0.23
0.200	5.080	49.76	0.25
0.300	7.620	59.24	0.30
0.400	10.160	69.90	0.35
0.500	12.700	74.64	0.38

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.19
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.25
$CBR_{2,54}$ (%)	2.70
$CBR_{5,08}$ (%)	2.44
CBR sin imersión (%)	**2.70**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

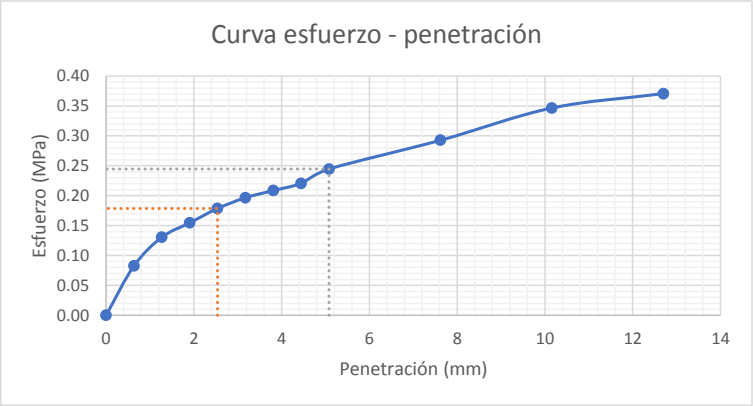
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	23
Masa recipiente (g)	115.25
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	239.5
Masa recipiente + muestra seca (g)	174.96
Contenido de humedad (%)	108.1

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	16.27	0.08
0.050	1.270	25.75	0.13
0.075	1.905	30.49	0.15
0.100	2.540	35.23	0.18
0.125	3.175	38.78	0.20
0.150	3.810	41.15	0.21
0.175	4.445	43.52	0.22
0.200	5.080	48.26	0.24
0.300	7.620	57.74	0.29
0.400	10.160	68.40	0.35
0.500	12.700	73.14	0.37



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.18
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.24
$CBR_{2,54}$ (%)	2.59
$CBR_{5,08}$ (%)	2.37
CBR con inmersión (%)	**2.59**

Humedad final	
# recipiente	20
Masa recipiente (g)	107.86
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	299.42
Masa recipiente + muestra seca (g)	199.42
Contenido de humedad (%)	**109.2**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	127.46	127.08	127.44	127.98	127.49
Diámetro (mm)	61.57	61.89	61.91	62.11	61.87

Área (mm^2)	3006.42
Volumen (cm^3)	383.29
Masa húmeda muestra (g)	518.98
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.35

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	80	73	7	26.61	24.28	2.33	0.072	0.072	0.072	0.00056	42.99
1	41.4	12.4	43	41	2	14.30	13.64	0.67	0.041	0.041	0.041	0.00032	42.41
2	41.4	24.8	70	63	7	23.28	20.96	2.33	0.072	0.071	0.072	0.00056	37.36
3	41.4	37.3	113	103	10	37.59	34.26	3.33	0.145	0.144	0.145	0.00113	30.23
4	41.4	49.7	142	127	15	47.23	42.24	4.99	0.184	0.182	0.183	0.00144	29.43
5	41.4	62	238	220	18	79.16	73.18	5.99	0.470	0.470	0.470	0.00369	19.85
6	27.6	12.4	40	38	2	13.30	12.64	0.67	0.038	0.039	0.039	0.00030	41.86
7	27.6	24.8	77	71	6	25.61	23.62	2.00	0.084	0.084	0.084	0.00066	35.84
8	27.6	37.3	117	106	11	38.92	35.26	3.66	0.146	0.146	0.146	0.00115	30.79
9	27.6	49.7	167	152	15	55.55	50.56	4.99	0.226	0.226	0.226	0.00177	28.52
10	27.6	62	213	193	20	70.85	64.20	6.65	0.291	0.290	0.291	0.00228	28.17
11	13.8	12.4	40	38	2	13.30	12.64	0.67	0.038	0.038	0.038	0.00030	42.41
12	13.8	24.8	78	71	7	25.94	23.62	2.33	0.074	0.075	0.075	0.00058	40.41
13	13.8	37.3	119	109	10	39.58	36.26	3.33	0.145	0.145	0.145	0.00114	31.88
14	13.8	49.7	153	139	14	50.89	46.23	4.66	0.229	0.229	0.229	0.00180	25.74
15	13.8	62	182	163	19	60.54	54.22	6.32	0.287	0.286	0.287	0.00225	24.13

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	11
Masa recipiente (g)	108.34
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	627.32
Masa recipiente + muestra seca (g)	360.35
Masa del agua (g)	266.97
Masa material seco (g)	252.01
Masa material húmedo (g)	518.98
Humedad (%)	105.94

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	11
Masa recipiente (g)	108.34
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	625.43
Masa recipiente + muestra seca (g)	360.35
Masa del agua (g)	265.08
Masa material seco (g)	252.01
Masa material húmedo (g)	517.09
Humedad (%)	105.19

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

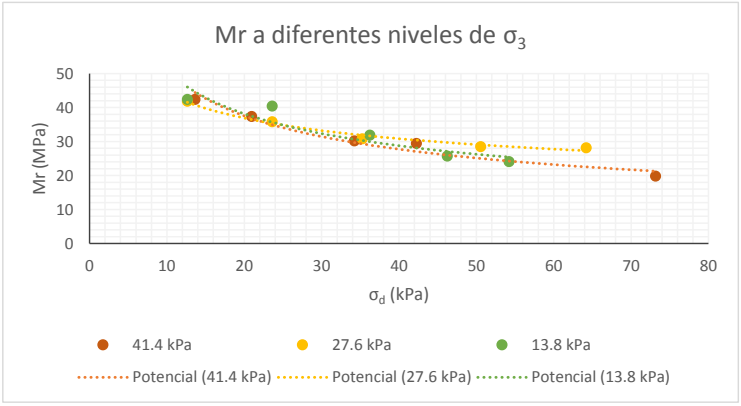
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

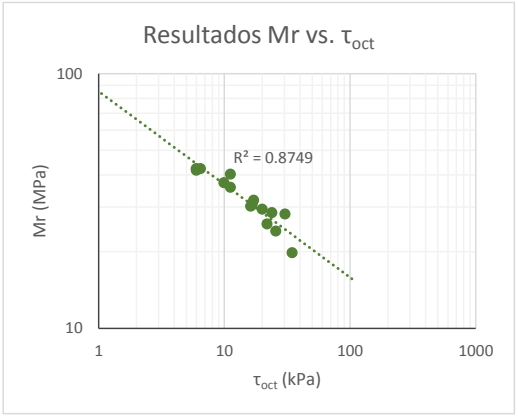
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

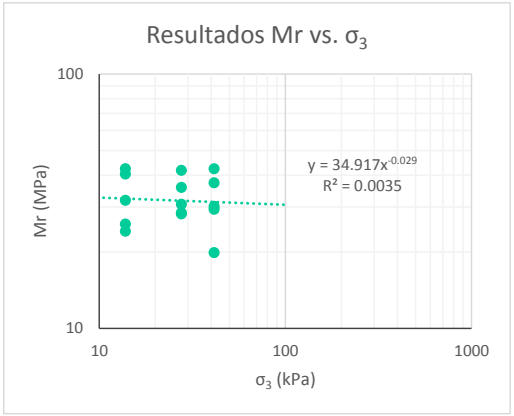
Ecuaciones

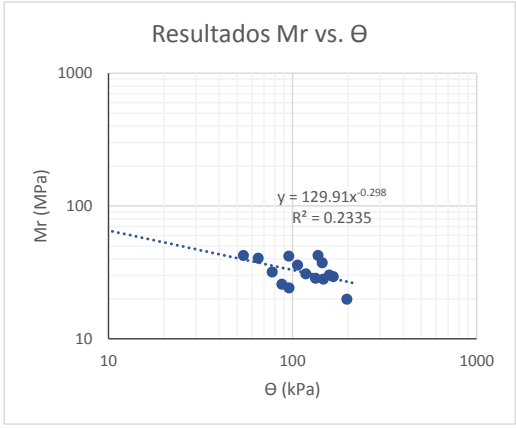
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

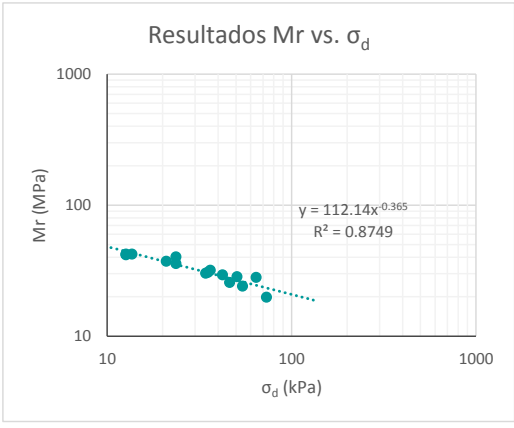
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	13.64	41.40	6.4288	137.837	42.4
2	20.96	41.40	9.8783	145.155	37.4
3	34.26	41.40	16.1503	158.460	30.2
4	42.24	41.40	19.9135	166.443	29.4
5	73.18	41.40	34.4958	197.377	19.8
6	12.64	27.60	5.9584	95.440	41.9
7	23.62	27.60	11.1327	106.416	35.8
8	35.26	27.60	16.6207	118.058	30.8
9	50.56	27.60	23.8335	133.358	28.5
10	64.20	27.60	30.2622	146.996	28.2
11	12.64	13.80	5.9584	54.040	42.4
12	23.62	13.80	11.1327	65.016	40.4
13	36.26	13.80	17.0911	77.656	31.9
14	46.23	13.80	21.7951	87.634	25.7
15	54.22	13.80	25.5583	95.617	24.1











ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

Moossazadeh & Witczak, 1981

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$$

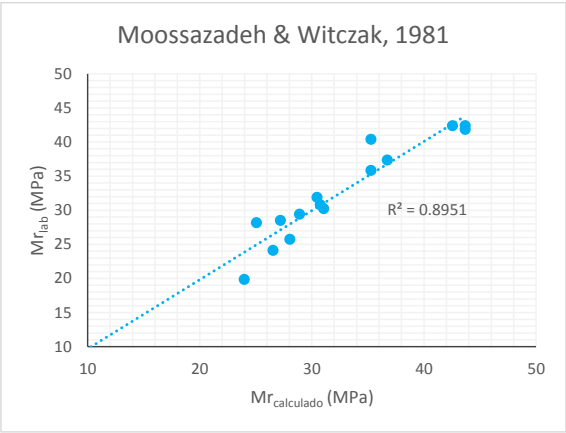
k_1	21.396
k_2	-0.342
P_a (kPa)	102

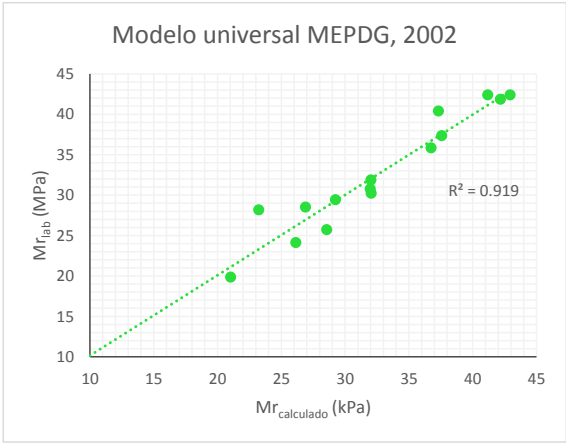
Modelo universal MEPDG, 2002

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$$

k_1	0.485
k_2	-0.031
k_3	-2.870
P_a (kPa)	102

Ciclo	Mr_{lab} (MPa)	Mr_{cal} (MPa)	Difer (MPa)	$Difer^2$ (Mpa)	Mr_{lab} (MPa)	Mr_{cal} (MPa)	Difer (MPa)	$Difer^2$ (MPa)
1	42.4	42.562	-0.2	0.0	42.4	41.163	1.2	1.5
2	37.4	36.750	0.6	0.4	37.4	37.564	-0.2	0.0
3	30.2	31.066	-0.8	0.7	30.2	32.034	-1.8	3.3
4	29.4	28.919	0.5	0.3	29.4	29.232	0.2	0.0
5	19.8	23.968	-4.1	17.0	19.8	21.025	-1.2	1.4
6	41.9	43.682	-1.8	3.3	41.9	42.161	-0.3	0.1
7	35.8	35.279	0.6	0.3	35.8	36.736	-0.9	0.8
8	30.8	30.762	0.0	0.0	30.8	31.963	-1.2	1.4
9	28.5	27.197	1.3	1.8	28.5	26.880	1.6	2.7
10	28.2	25.065	3.1	9.7	28.2	23.228	4.9	24.5
11	42.4	43.682	-1.3	1.6	42.4	42.917	-0.5	0.3
12	40.4	35.279	5.1	26.4	40.4	37.306	3.1	9.7
13	31.9	30.470	1.4	2.0	31.9	32.018	-0.1	0.0
14	25.7	28.041	-2.3	5.3	25.7	28.541	-2.8	7.8
15	24.1	26.555	-2.4	5.9	24.1	26.120	-2.0	4.0
			Σ	74.6			**Σ**	57.5





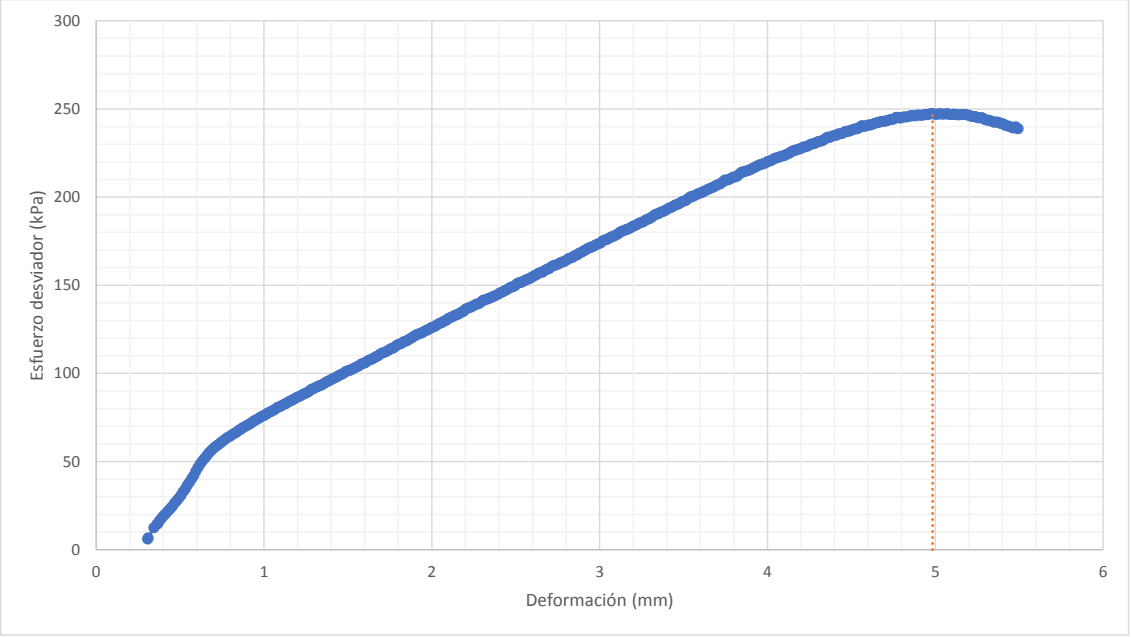
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.127
Máximo esfuerzo (kPa)	247.41
Máxima deformación (mm)	4.984
Máxima deformación (%)	3.907

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

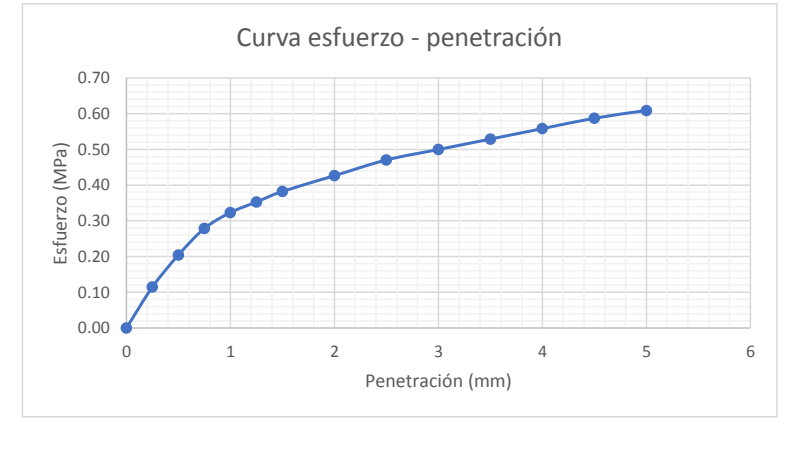
Humedad natural	
# recipiente	14
Masa recipiente (g)	106.9
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	234.69
Masa recipiente + muestra seca (g)	170.72
Contenido de humedad (%)	**100.2**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	2.35	0.11
0.020	0.500	4.19	0.20
0.030	0.750	5.71	0.28
0.039	1.000	6.62	0.32
0.049	1.250	7.23	0.35
0.059	1.500	7.83	0.38
0.079	2.000	8.74	0.43
0.098	2.500	9.64	0.47
0.118	3.000	10.24	0.50
0.138	3.500	10.84	0.53
0.157	4.000	11.44	0.56
0.177	4.500	12.03	0.59
0.197	5.000	12.48	0.61

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	**Profundidad (m):**	0.60 - 0.80

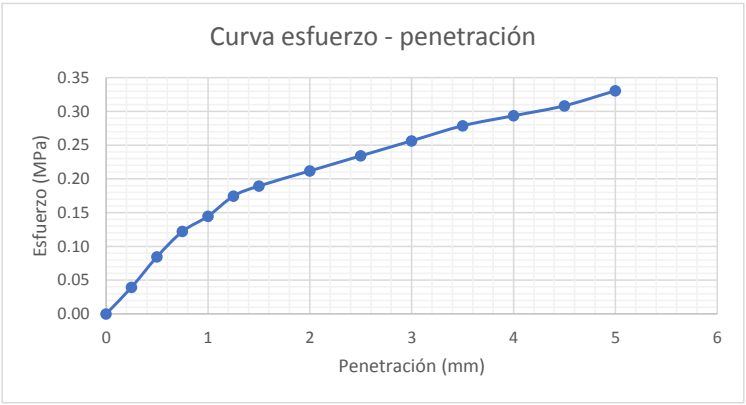
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	14
Masa recipiente (g)	106.9
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	234.69
Masa recipiente + muestra seca (g)	170.72
Contenido de humedad (%)	100.24

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	21
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	0.81	0.04
0.020	0.500	1.74	0.08
0.030	0.750	2.50	0.12
0.039	1.000	2.96	0.14
0.049	1.250	3.58	0.17
0.059	1.500	3.88	0.19
0.079	2.000	4.34	0.21
0.098	2.500	4.80	0.23
0.118	3.000	5.26	0.26
0.138	3.500	5.71	0.28
0.157	4.000	6.02	0.29
0.177	4.500	6.32	0.31
0.197	5.000	6.77	0.33



Humedad final	
# recipiente	17
Masa recipiente (g)	116.35
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	247.73
Masa recipiente + muestra seca (g)	178.83
Contenido de humedad (%)	**110.28**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	16.42
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	69.69
Masa recipiente + suelo seco (g)	42.61
Contenido de humedad (%)	**103.4**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	331.1
Masa de la muestra parafinada (g)	341.1
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	90.5
Temperatura del agua (º)	15.4
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99904
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**240.09**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	331.1
Volumen de la muestra (cm^3)	240.09
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.38
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**13.53**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

4. Calibración del picnómetro

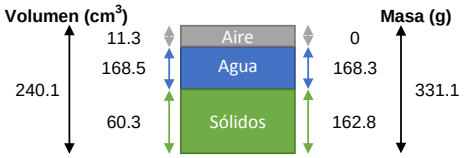
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	48
Temperatura de ensayo (ºC)	20.4
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99812
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	641.86
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	672.1
Gravedad específica sin corregir	2.70
Factor de corrección	0.99992
Gravedad específica corregida	**2.70**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**2.98**
η (%)	**74.89**
S (%)	**93.72**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA)
INV - E - 123

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

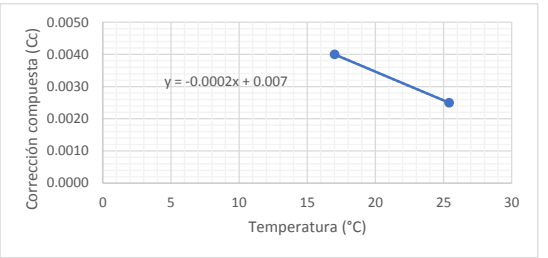
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	6.79
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	20.95
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	20.95
Masa del agua (g)	0
Masa material seco (g)	14.16
Humedad higroscópica (%)	0.0
Factor corrección Ch	**1.0000**

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H

Rango de temperaturas (ºC)	17	25.4
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0040	1.0025
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0025



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	50.0
Gravedad específica del suelo - Gs	2.70
Gravedad específica del agua - G_1	1.000
$Constante\ A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_S}{G_S - g_1}\right]$	
A	3176

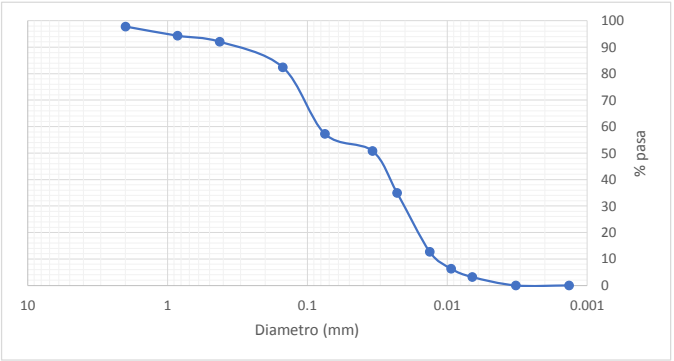
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	08:30

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (ºC)	Cc	$R_{CORREGIDO}$	% suelo suspensión	K	L (cm)	ϕ partículas (mm)
08:32	2	1.020	17.1	0.0040	1.016	50.82	0.01394	12.1	0.0343
08:35	5	1.015	17.1	0.0040	1.011	34.94	0.01394	13.4	0.0228
08:45	15	1.007	21.2	0.0032	1.004	12.71	0.01326	15.2	0.0134
09:00	30	1.005	23.2	0.0029	1.002	6.35	0.01296	15.8	0.0094
09:30	60	1.004	24.0	0.0027	1.001	3.18	0.01282	16.0	0.0066
12:47	250	1.003	25.0	0.0026	1.000	0.00	0.01267	16.3	0.0032
08:30	1440	1.003	25.0	0.0026	1.000	0.00	0.01267	16.3	0.0013

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	50.0
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	21.4
% Retenido en tamiz No 200	42.8
% Pasa el tamiz No 200	57.2

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	$W_{RETENIDO}$ (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.00	100.0	0.0
2.000	No 10	1.10	2.20	97.8	2.2
0.850	No 20	1.73	3.46	94.3	5.7
0.425	No 40	1.13	2.26	92.1	7.9
0.150	No 100	4.83	9.66	82.4	17.6
0.075	No 200	12.57	25.14	57.3	42.7



Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	2
Media	2 - 0.425	6
Fina	0.425 - 0.075	35
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	57

Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas	4.75 - 0.075	43
Finos	< 0.075	57

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

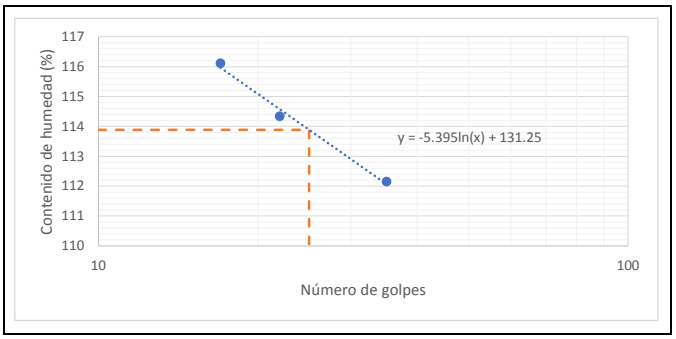
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	62	55	8
Masa del recipiente (g)	10.951	12.101	6.732
No. Golpes	17	22	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	22.418	24.282	16.701
Masa recipiente + suelo seco (g)	16.257	17.784	11.431
Contenido de humedad (%)	116	114	112



LL (%)	**114**

2. Determinación límite plástico

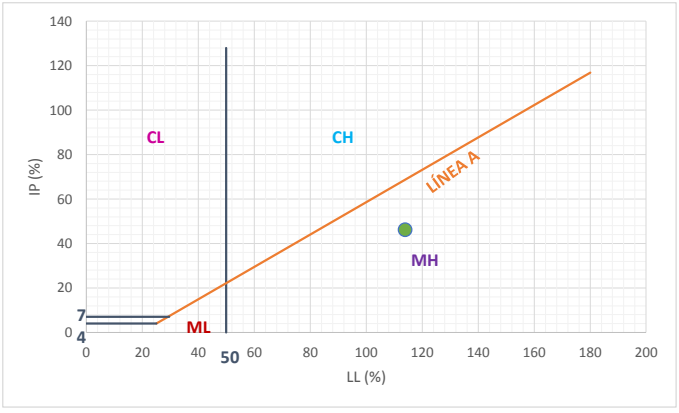
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	64	133
Masa del recipiente (g)	10.999	7.168
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	18.351	13.982
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.378	11.236
Contenido de humedad (%)	68	68

LP (%)	**68**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**46**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**MH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Septiembre 06 de 2019

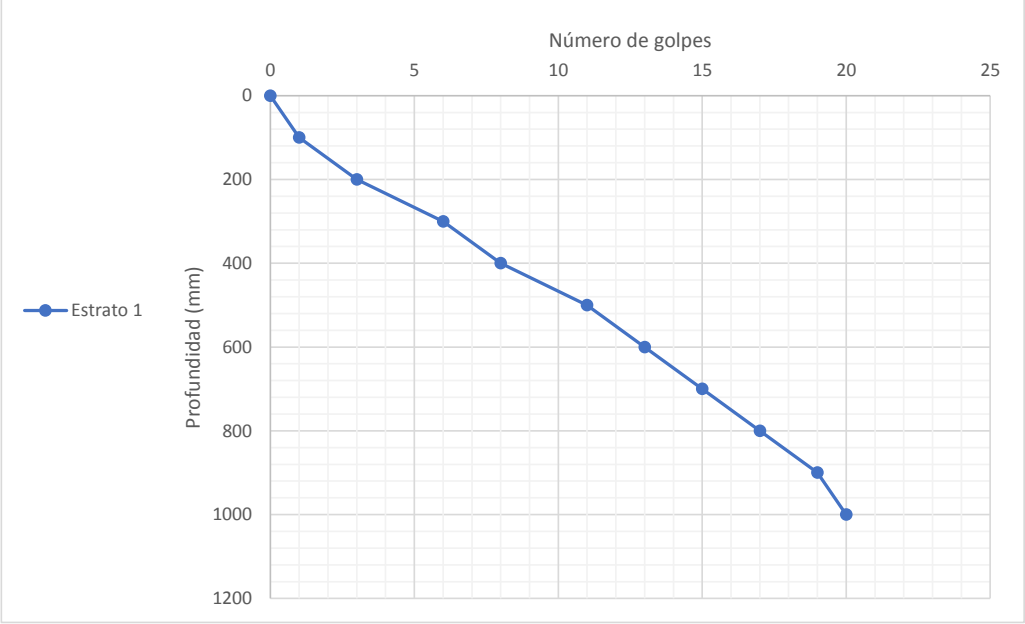
Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
2	200	100	50	1	50
3	300	100	33	1	33
2	400	100	50	1	50
3	500	100	33	1	33
2	600	100	50	1	50
2	700	100	50	1	50
2	800	100	50	1	50
2	900	100	50	1	50
1	1000	100	100	1	100

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	46	1000

DN subrasante (mm/golpe)	**46**



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**46**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

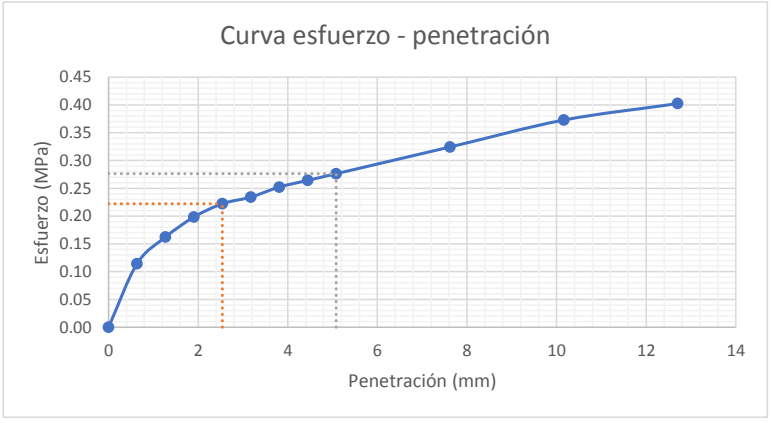
Humedad natural	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	106.13
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	267.48
Masa recipiente + muestra seca (g)	185.78
Contenido de humedad (%)	102.6

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	22.51	0.11
0.050	1.270	31.99	0.16
0.075	1.905	39.10	0.20
0.100	2.540	43.84	0.22
0.125	3.175	46.21	0.23
0.150	3.810	49.76	0.25
0.175	4.445	52.13	0.26
0.200	5.080	54.50	0.28
0.300	7.620	63.98	0.32
0.400	10.160	73.55	0.37
0.500	12.700	79.38	0.40

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.22
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.28
$CBR_{2,54}$ (%)	3.23
$CBR_{5,08}$ (%)	2.67
CBR sin imersión (%)	**3.23**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

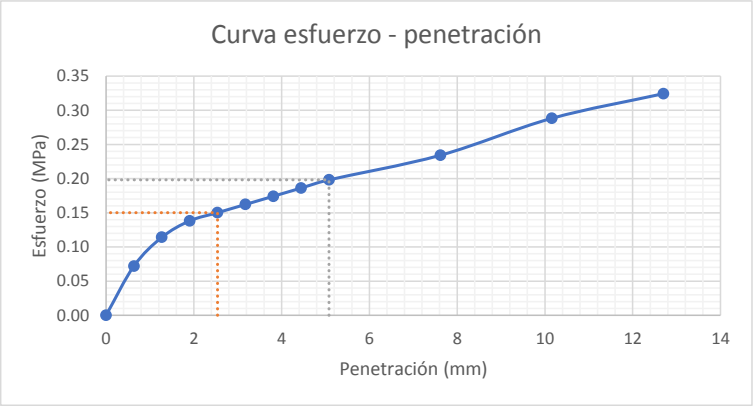
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	106.13
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	267.48
Masa recipiente + muestra seca (g)	185.78
Contenido de humedad (%)	102.6

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	14.22	0.07
0.050	1.270	22.51	0.11
0.075	1.905	27.25	0.14
0.100	2.540	29.62	0.15
0.125	3.175	31.99	0.16
0.150	3.810	34.36	0.17
0.175	4.445	36.73	0.19
0.200	5.080	39.10	0.20
0.300	7.620	46.21	0.23
0.400	10.160	56.87	0.29
0.500	12.700	63.98	0.32



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.15
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.20
$CBR_{2,54}$ (%)	2.18
$CBR_{5,08}$ (%)	1.92
CBR con inmersión (%)	**2.18**

Humedad final	
# recipiente	4
Masa recipiente (g)	108.43
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	248.28
Masa recipiente + muestra seca (g)	175.74
Contenido de humedad (%)	**107.8**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	126.56	126.34	126.35	126.96	126.55
Diámetro (mm)	62.16	61.71	61.6	61.71	61.80

Área (mm^2)	2999.14
Volumen (cm^3)	379.55
Masa húmeda muestra (g)	509.71
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.34

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	73	67	6	24.34	22.34	2.00	0.082	0.079	0.081	0.00064	35.12
1	41.4	12.4	39	38	1	13.00	12.67	0.33	0.044	0.044	0.044	0.00035	36.44
2	41.4	24.8	63	57	6	21.01	19.01	2.00	0.070	0.069	0.070	0.00055	34.61
3	41.4	37.3	109	99	10	36.34	33.01	3.33	0.136	0.136	0.136	0.00107	30.72
4	41.4	49.7	140	125	15	46.68	41.68	5.00	0.178	0.178	0.178	0.00141	29.63
5	41.4	62	167	147	20	55.68	49.01	6.67	0.220	0.221	0.221	0.00174	28.13
6	27.6	12.4	30	28	2	10.00	9.34	0.67	0.037	0.037	0.037	0.00029	31.93
7	27.6	24.8	76	69	7	25.34	23.01	2.33	0.099	0.099	0.099	0.00078	29.41
8	27.6	37.3	111	102	9	37.01	34.01	3.00	0.151	0.152	0.152	0.00120	28.41
9	27.6	49.7	142	128	14	47.35	42.68	4.67	0.181	0.181	0.181	0.00143	29.84
10	27.6	62	184	165	19	61.35	55.02	6.34	0.260	0.260	0.260	0.00205	26.78
11	13.8	12.4	41	39	2	13.67	13.00	0.67	0.053	0.052	0.053	0.00041	31.35
12	13.8	24.8	76	70	6	25.34	23.34	2.00	0.103	0.103	0.103	0.00081	28.68
13	13.8	37.3	120	109	11	40.01	36.34	3.67	0.166	0.167	0.167	0.00132	27.62
14	13.8	49.7	152	137	15	50.68	45.68	5.00	0.193	0.193	0.193	0.00153	29.95
15	13.8	62	174	156	18	58.02	52.01	6.00	0.249	0.248	0.249	0.00196	26.49

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	20
Masa recipiente (g)	107.6
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	617.31
Masa recipiente + muestra seca (g)	367.88
Masa del agua (g)	249.43
Masa material seco (g)	260.28
Masa material húmedo (g)	509.71
Humedad (%)	95.83

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	20
Masa recipiente (g)	107.6
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	614.6
Masa recipiente + muestra seca (g)	367.88
Masa del agua (g)	246.72
Masa material seco (g)	260.28
Masa material húmedo (g)	507
Humedad (%)	94.79

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

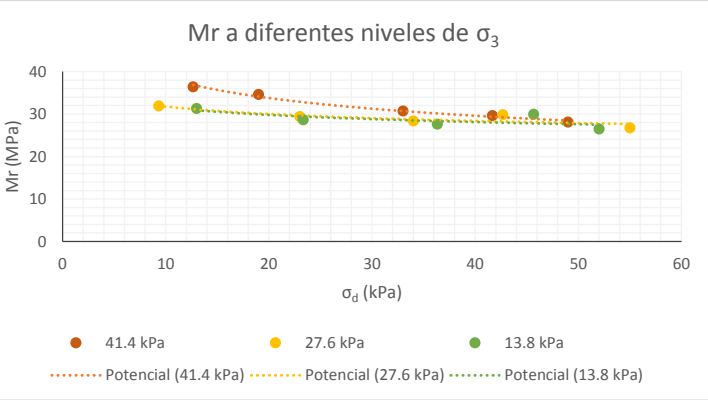
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

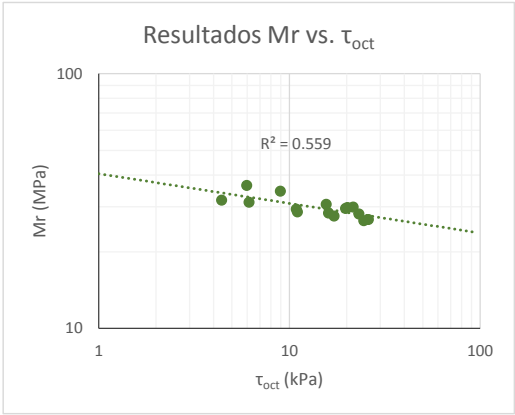
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

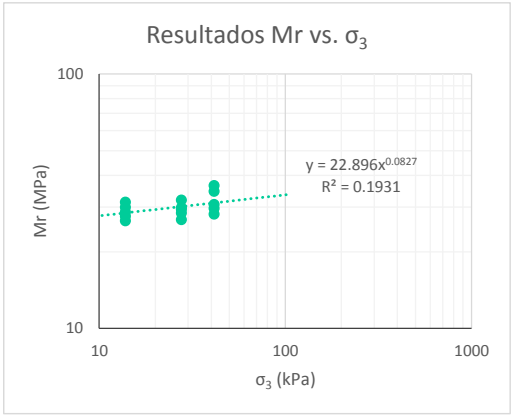
Ecuaciones

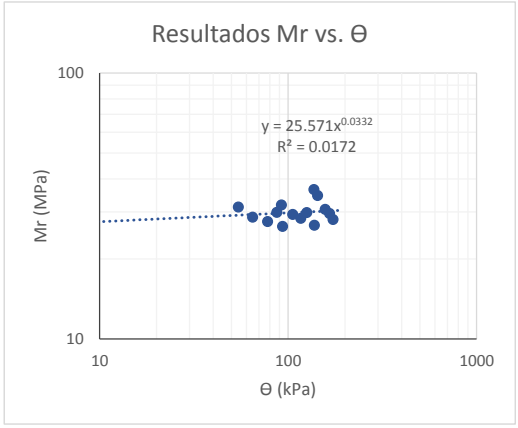
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

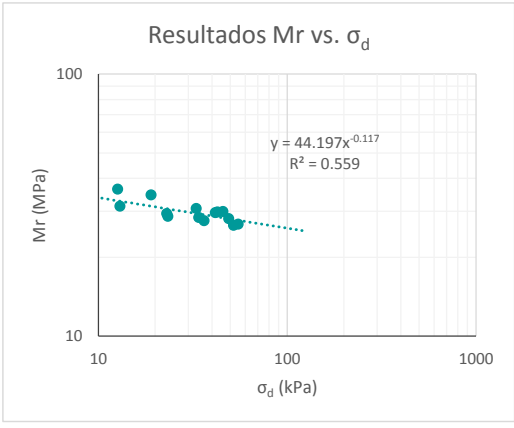
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	12.67	41.40	5.9728	136.870	36.4
2	19.01	41.40	8.9593	143.205	34.6
3	33.01	41.40	15.5608	157.209	30.7
4	41.68	41.40	19.6475	165.879	29.6
5	49.01	41.40	23.1055	173.214	28.1
6	9.34	27.60	4.4010	92.136	31.9
7	23.01	27.60	10.8454	105.807	29.4
8	34.01	27.60	16.0324	116.810	28.4
9	42.68	27.60	20.1190	125.479	29.8
10	55.02	27.60	25.9347	137.816	26.8
11	13.00	13.80	6.1300	54.404	31.3
12	23.34	13.80	11.0026	64.740	28.7
13	36.34	13.80	17.1326	77.744	27.6
14	45.68	13.80	21.5337	87.080	30.0
15	52.01	13.80	24.5201	93.415	26.5











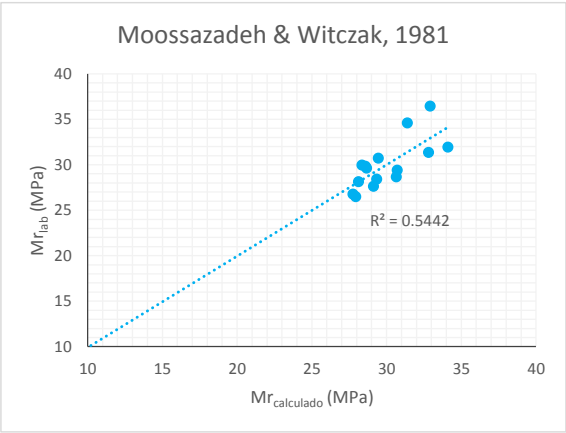
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

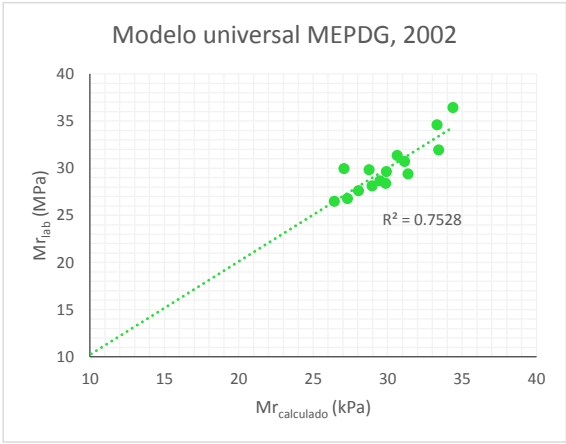
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	25.841			**k_1**	0.351	
		k_2	-0.116			**k_2**	0.123	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.367	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	36.4	32.914	3.5	12.4	36.4	34.385	2.1	4.2
2	34.6	31.402	3.2	10.3	34.6	33.311	1.3	1.7
3	30.7	29.454	1.3	1.6	30.7	31.136	-0.4	0.2
4	29.6	28.668	1.0	0.9	29.6	29.911	-0.3	0.1
5	28.1	28.134	0.0	0.0	28.1	28.940	-0.8	0.7
6	31.9	34.101	-2.2	4.7	31.9	33.414	-1.5	2.2
7	29.4	30.714	-1.3	1.7	29.4	31.362	-2.0	3.8
8	28.4	29.352	-0.9	0.9	28.4	29.854	-1.4	2.1
9	29.8	28.589	1.3	1.6	29.8	28.749	1.1	1.2
10	26.8	27.759	-1.0	1.0	26.8	27.290	-0.5	0.3
11	31.3	32.815	-1.5	2.2	31.3	30.633	0.7	0.5
12	28.7	30.662	-2.0	3.9	28.7	29.466	-0.8	0.6
13	27.6	29.127	-1.5	2.3	27.6	28.037	-0.4	0.2
14	30.0	28.365	1.6	2.5	30.0	27.056	2.9	8.4
15	26.5	27.940	-1.5	2.1	26.5	26.414	0.1	0.0
			Σ	48.1			**Σ**	26.1





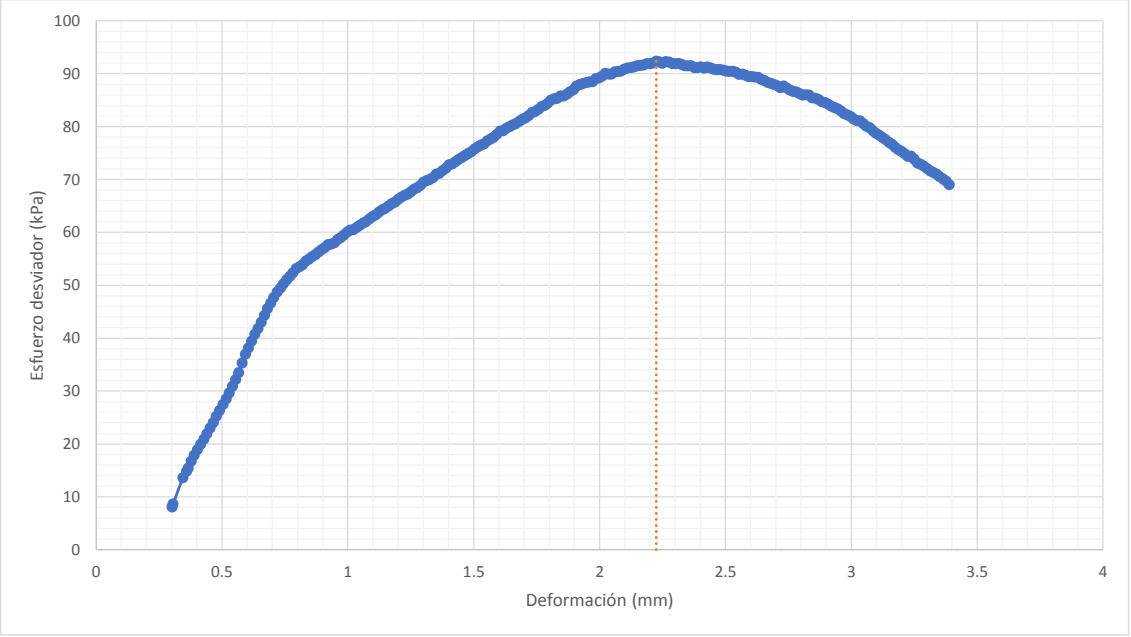
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.127
Máximo esfuerzo (kPa)	92.38
Máxima deformación (mm)	2.225
Máxima deformación (%)	1.758

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

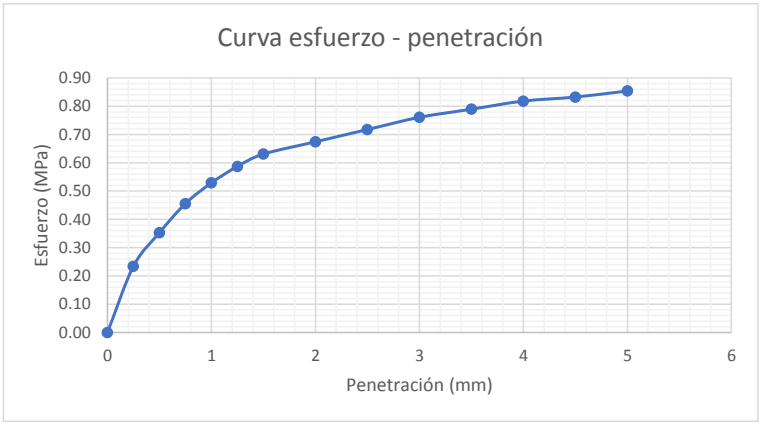
Humedad natural	
# recipiente	3
Masa recipiente (g)	110.74
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	234.1
Masa recipiente + muestra seca (g)	173.41
Contenido de humedad (%)	**96.84**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	4.80	0.23
0.020	0.500	7.23	0.35
0.030	0.750	9.34	0.46
0.039	1.000	10.84	0.53
0.049	1.250	12.03	0.59
0.059	1.500	12.93	0.63
0.079	2.000	13.82	0.67
0.098	2.500	14.71	0.72
0.118	3.000	15.59	0.76
0.138	3.500	16.18	0.79
0.157	4.000	16.77	0.82
0.177	4.500	17.06	0.83
0.197	5.000	17.50	0.85

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	**Fecha ensayos:**	Octubre 04 a 10 de 2019	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.60

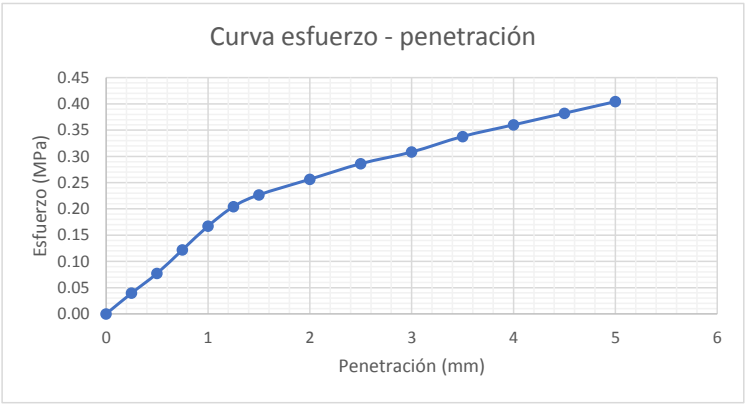
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	3
Masa recipiente (g)	110.74
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	234.1
Masa recipiente + muestra seca (g)	173.41
Contenido de humedad (%)	96.84

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	22
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	0.81	0.04
0.020	0.500	1.58	0.08
0.030	0.750	2.50	0.12
0.039	1.000	3.42	0.17
0.049	1.250	4.19	0.20
0.059	1.500	4.65	0.23
0.079	2.000	5.26	0.26
0.098	2.500	5.86	0.29
0.118	3.000	6.32	0.31
0.138	3.500	6.93	0.34
0.157	4.000	7.38	0.36
0.177	4.500	7.83	0.38
0.197	5.000	8.29	0.40



Humedad final	
# recipiente	3
Masa recipiente (g)	110.75
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	234.06
Masa recipiente + muestra seca (g)	165.17
Contenido de humedad (%)	**126.59**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	17.7
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	63.6
Masa recipiente + suelo seco (g)	39.70
Contenido de humedad (%)	**108.6**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	138.8
Masa de la muestra parafinada (g)	145.1
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	36.6
Temperatura del agua (º)	16.6
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99885
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**101.85**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	138.8
Volumen de la muestra (cm^3)	101.85
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.36
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**13.37**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

4. Calibración del picnómetro

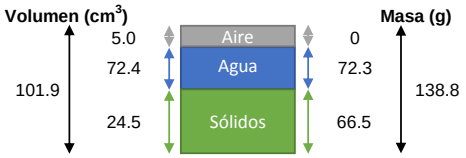
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.22
Temperatura de ensayo (ºC)	21.4
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99791
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	641.76
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	672.9
Gravedad específica sin corregir	2.72
Factor de corrección	0.99970
Gravedad específica corregida	**2.72**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**3.16**
η (%)	**75.97**
S (%)	**93.51**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA)
INV - E - 123

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

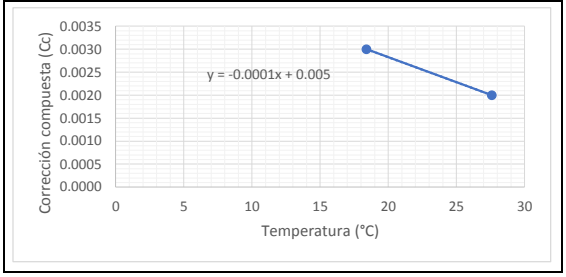
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	17.7
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	32.78
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	32.26
Masa del agua (g)	0.52
Masa material seco (g)	14.56
Humedad higroscópica (%)	3.6
Factor corrección Ch	**0.9655**

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H

Rango de temperaturas (ºC)	18.4	27.6
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0030	1.0020
Corrección compuesta (Cc)	0.0030	0.0020



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.56
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	48.8
Gravedad específica del suelo - Gs	2.72
Gravedad específica del agua - G_1	1.000
$Constante\ A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_S}{G_S - g_1}\right]$	
A	3239

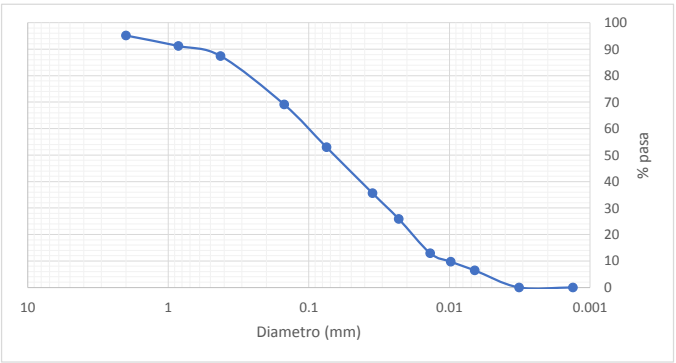
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	14:04

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (ºC)	Cc	$R_{CORREGIDO}$	% suelo suspensión	K	L (cm)	ϕ partículas (mm)
14:06	2	1.014	18.4	0.0030	1.011	35.63	0.01364	13.4	0.0353
14:09	5	1.011	18.4	0.0030	1.008	25.92	0.01364	14.2	0.0230
14:19	15	1.007	18.5	0.0030	1.004	12.96	0.01364	15.2	0.0137
14:34	30	1.006	18.8	0.0030	1.003	9.72	0.01364	15.5	0.0098
15:04	60	1.004	23.0	0.0025	1.002	6.48	0.01290	15.8	0.0066
18:21	250	1.002	25.8	0.0022	1.000	0.00	0.01254	16.3	0.0032
14:04	1440	1.002	26.0	0.0022	1.000	0.00	0.01246	16.3	0.0013

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	48.8
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	23.0
% Retenido en tamiz No 200	47.1
% Pasa el tamiz No 200	52.9

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	$W_{RETENIDO}$ (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.00	100.0	0.0
2.000	No 10	2.36	4.83	95.2	4.8
0.850	No 20	1.92	3.93	91.2	8.8
0.425	No 40	1.85	3.79	87.4	12.6
0.150	No 100	8.94	18.31	69.1	30.9
0.075	No 200	7.88	16.14	53.0	47.0



Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	5
Media	2 - 0.425	8
Fina	0.425 - 0.075	34
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	53

Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas	4.75 - 0.075	47
Finos	< 0.075	53

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

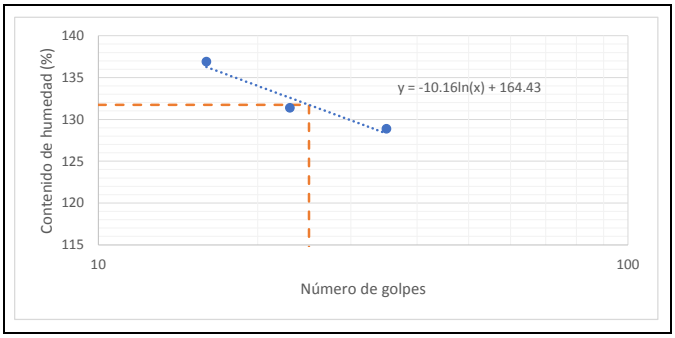
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	57	12	70
Masa del recipiente (g)	25.134	9.559	11.239
No. Golpes	35	23	16
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	32.506	16.45	19.609
Masa recipiente + suelo seco (g)	28.355	12.537	14.772
Contenido de humedad (%)	129	131	137



LL (%)	132

2. Determinación límite plástico

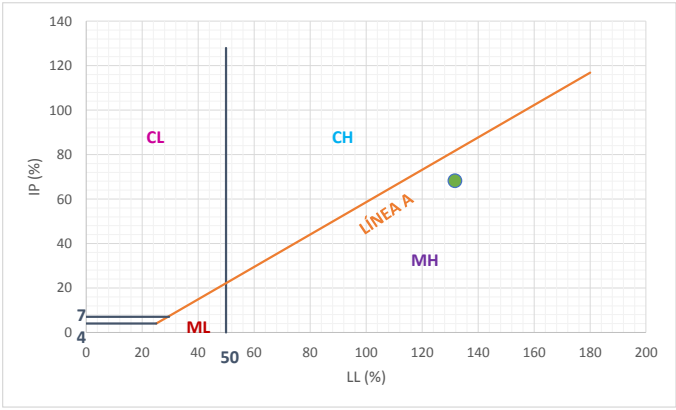
Ensayo	1	2
Número recipiente	A1	10
Masa del recipiente (g)	10.602	9.655
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	15.742	15.329
Masa recipiente + suelo seco (g)	13.756	13.113
Contenido de humedad (%)	63	64

LP (%)	64

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	68

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Procedencia:	Calle 134A # 50 - 34
Fecha de exploración:	Enero 14 de 2020

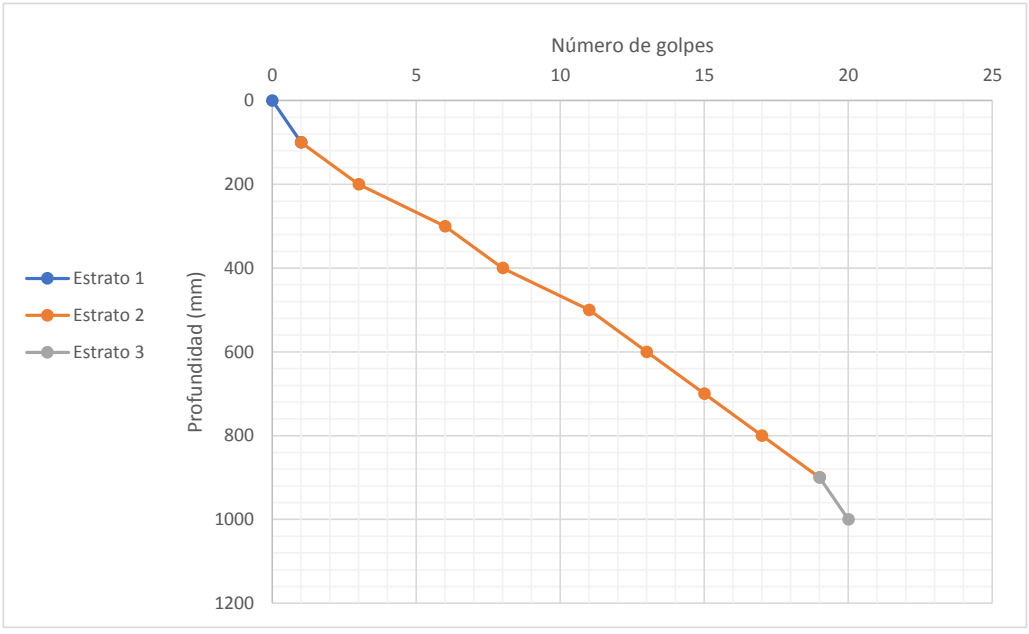
Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
2	200	100	50	1	50
3	300	100	33	1	33
2	400	100	50	1	50
3	500	100	33	1	33
2	600	100	50	1	50
2	700	100	50	1	50
2	800	100	50	1	50
2	900	100	50	1	50
1	1000	100	100	1	100

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	100	100
2	44	800
3	100	100

55



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**44**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

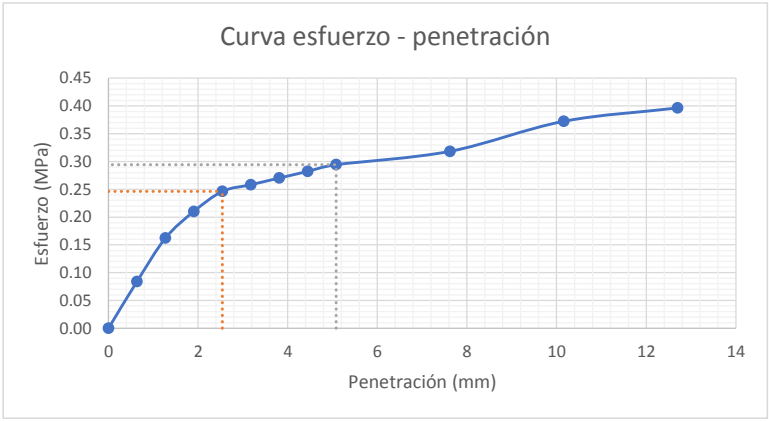
Humedad natural	
# recipiente	12
Masa recipiente (g)	101.07
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	301.11
Masa recipiente + muestra seca (g)	200.8
Contenido de humedad (%)	100.6

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	16.59	0.08
0.050	1.270	31.99	0.16
0.075	1.905	41.47	0.21
0.100	2.540	48.58	0.25
0.125	3.175	50.95	0.26
0.150	3.810	53.32	0.27
0.175	4.445	55.69	0.28
0.200	5.080	58.06	0.29
0.300	7.620	62.80	0.32
0.400	10.160	73.46	0.37
0.500	12.700	78.20	0.40

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.25
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.29
$CBR_{2,54}$ (%)	3.57
$CBR_{5,08}$ (%)	2.85
CBR sin imersión (%)	**3.6**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

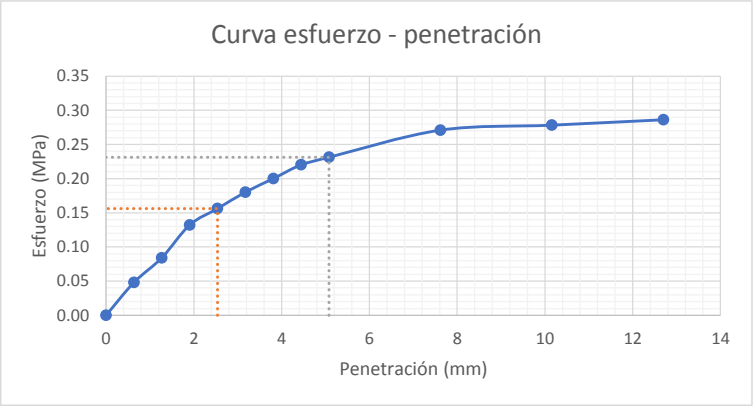
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	12
Masa recipiente (g)	101.07
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	301.11
Masa recipiente + muestra seca (g)	200.8
Contenido de humedad (%)	100.6

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**	
0.000	0.000	0.00	0.00	
0.025	0.635	9.48	0.05	18.96
0.050	1.270	16.59	0.08	33.18
0.075	1.905	26.07	0.13	52.13
0.100	2.540	30.80	0.16	61.61
0.125	3.175	35.54	0.18	71.09
0.150	3.810	39.45	0.20	78.90
0.175	4.445	43.45	0.22	86.90
0.200	5.080	45.62	0.23	91.24
0.300	7.620	53.45	0.27	106.90
0.400	10.160	54.89	0.28	109.78
0.500	12.700	56.45	0.29	112.90



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.16
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.23
$CBR_{2,54}$ (%)	2.27
$CBR_{5,08}$ (%)	2.24
CBR con inmersión (%)	**2.3**

Humedad final	
# recipiente	4
Masa recipiente (g)	108.43
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	248.28
Masa recipiente + muestra seca (g)	175.74
Contenido de humedad (%)	**107.8**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	132.23	131.23	130.72	130.14	131.08
Diámetro (mm)	62.17	61.06	62.15	61.85	61.81

Área (mm^2)	3000.35
Volumen (cm^3)	393.29
Masa húmeda muestra (g)	550.96
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.40

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	90	83	7	30.00	27.66	2.33	0.102	0.102	0.102	0.00078	35.6
1	41.4	12.4	41	38	3	13.67	12.67	1.00	0.041	0.041	0.041	0.00031	40.5
2	41.4	24.8	80	73	7	26.66	24.33	2.33	0.088	0.088	0.088	0.00067	36.2
3	41.4	37.3	119	109	10	39.66	36.33	3.33	0.135	0.135	0.135	0.00103	35.3
4	41.4	49.7	149	135	14	49.66	44.99	4.67	0.169	0.169	0.169	0.00129	34.9
5	41.4	62	196	177	19	65.33	58.99	6.33	0.242	0.242	0.242	0.00185	32.0
6	27.6	12.4	42	39	3	14.00	13.00	1.00	0.049	0.049	0.049	0.00037	34.8
7	27.6	24.8	71	65	6	23.66	21.66	2.00	0.084	0.084	0.084	0.00064	33.8
8	27.6	37.3	133	122	11	44.33	40.66	3.67	0.161	0.161	0.161	0.00123	33.1
9	27.6	49.7	148	132	16	49.33	43.99	5.33	0.184	0.184	0.184	0.00140	31.3
10	27.6	62	199	181	18	66.33	60.33	6.00	0.253	0.253	0.253	0.00193	31.3
11	13.8	12.4	28	26	2	9.33	8.67	0.67	0.029	0.029	0.029	0.00022	39.2
12	13.8	24.8	77	70	7	25.66	23.33	2.33	0.087	0.087	0.087	0.00066	35.2
13	13.8	37.3	110	100	10	36.66	33.33	3.33	0.127	0.127	0.127	0.00097	34.4
14	13.8	49.7	145	130	15	48.33	43.33	5.00	0.191	0.191	0.191	0.00146	29.7
15	13.8	62	175	163	12	58.33	54.33	4.00	0.274	0.274	0.274	0.00209	26.0

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	100
Masa recipiente (g)	122.42
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	673.38
Masa recipiente + muestra seca (g)	387.94
Masa del agua (g)	285.44
Masa material seco (g)	265.52
Masa material húmedo (g)	550.96
Humedad (%)	107.50

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	100
Masa recipiente (g)	122.42
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	672.26
Masa recipiente + muestra seca (g)	387.94
Masa del agua (g)	284.32
Masa material seco (g)	265.52
Masa material húmedo (g)	549.84
Humedad (%)	107.08

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

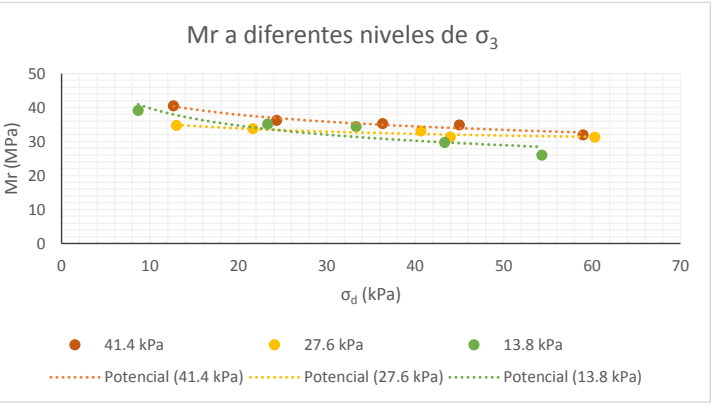
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

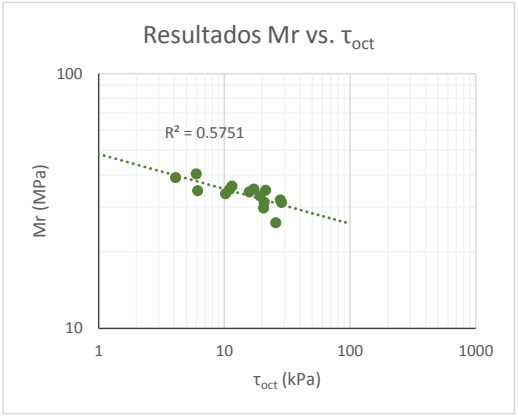
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

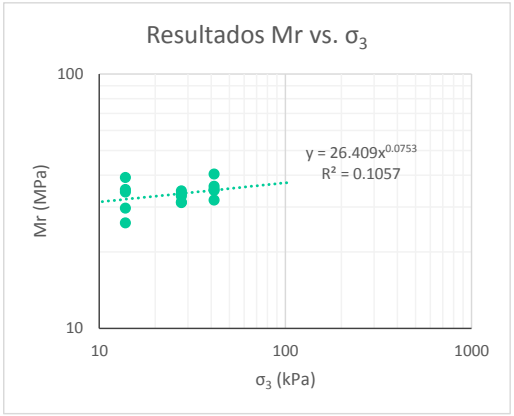
Ecuaciones

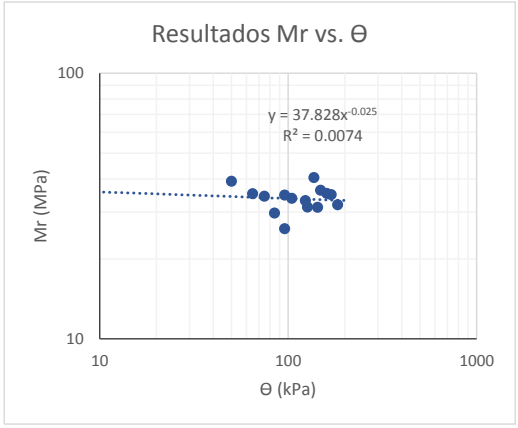
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

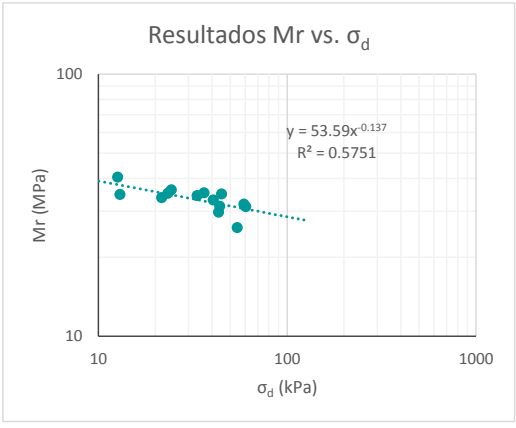
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	12.67	41.40	5.9704	136.865	40.5
2	24.33	41.40	11.4695	148.530	36.2
3	36.33	41.40	17.1257	160.529	35.3
4	44.99	41.40	21.2107	169.195	34.9
5	58.99	41.40	27.8096	183.193	32.0
6	13.00	27.60	6.1275	95.798	34.8
7	21.66	27.60	10.2126	104.464	33.8
8	40.66	27.60	19.1682	123.462	33.1
9	43.99	27.60	20.7394	126.795	31.3
10	60.33	27.60	28.4381	143.126	31.3
11	8.67	13.80	4.0850	50.066	39.2
12	23.33	13.80	10.9981	64.731	35.2
13	33.33	13.80	15.7116	74.729	34.4
14	43.33	13.80	20.4251	84.728	29.7
15	54.33	13.80	25.6100	95.727	26.0











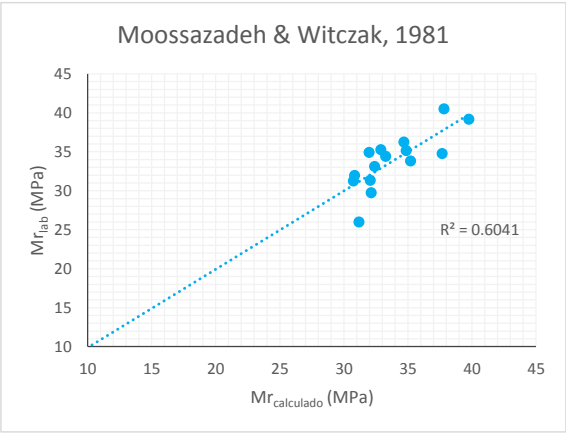
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

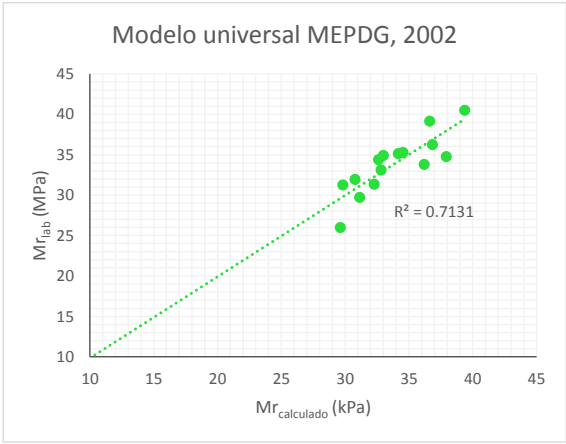
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	28.695			**k_1**	0.408	
		k_2	-0.132			**k_2**	0.098	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.493	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	40.5	37.814	2.7	7.2	40.5	39.361	1.1	1.3
2	36.2	34.686	1.6	2.4	36.2	36.842	-0.6	0.4
3	35.3	32.894	2.4	5.7	35.3	34.523	0.8	0.6
4	34.9	31.976	2.9	8.5	34.9	32.998	1.9	3.6
5	32.0	30.851	1.1	1.2	32.0	30.764	1.2	1.4
6	34.8	37.685	-2.9	8.5	34.8	37.925	-3.2	9.9
7	33.8	35.222	-1.4	2.0	33.8	36.189	-2.4	5.7
8	33.1	32.407	0.7	0.5	33.1	32.802	0.3	0.1
9	31.3	32.072	-0.7	0.5	31.3	32.261	-0.9	0.8
10	31.3	30.760	0.5	0.2	31.3	29.813	1.4	2.1
11	39.2	39.761	-0.6	0.4	39.2	36.614	2.6	6.5
12	35.2	34.879	0.3	0.1	35.2	34.171	1.0	1.0
13	34.4	33.271	1.1	1.3	34.4	32.605	1.8	3.2
14	29.7	32.136	-2.4	5.8	29.7	31.130	-1.4	1.9
15	26.0	31.189	-5.2	27.0	26.0	29.613	-3.6	13.1
			Σ	71.3			**Σ**	51.6





ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

Prueba rápida de corte

Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.131
Máximo esfuerzo (kPa)	0.00
Máxima deformación (mm)	#N/A
Máxima deformación (%)	#N/A

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

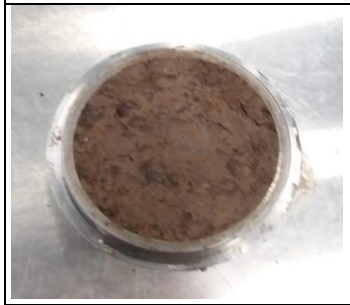
Humedad natural	
# recipiente	123
Masa recipiente (g)	115.42
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	244.37
Masa recipiente + muestra seca (g)	177.24
Contenido de humedad (%)	**108.59**

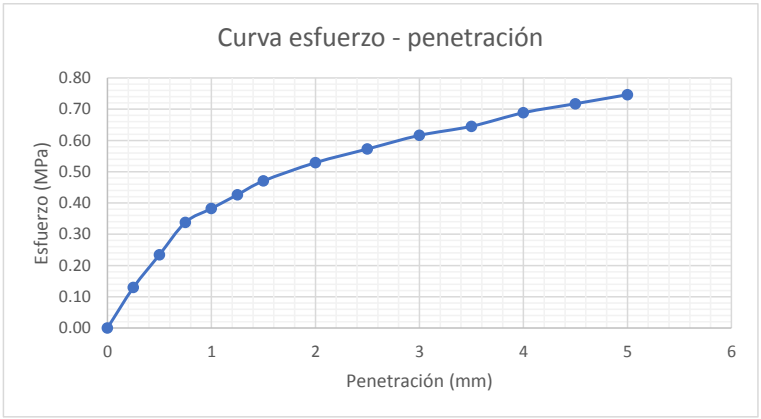
Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	2.66	0.13
0.020	0.500	4.80	0.23
0.030	0.750	6.93	0.34
0.039	1.000	7.83	0.38
0.049	1.250	8.74	0.43
0.059	1.500	9.64	0.47
0.079	2.000	10.84	0.53
0.098	2.500	11.74	0.57
0.118	3.000	12.63	0.62
0.138	3.500	13.22	0.65
0.157	4.000	14.11	0.69
0.177	4.500	14.71	0.72
0.197	5.000	15.30	0.75

Registro fotográfico





ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Enero 24 a 30 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

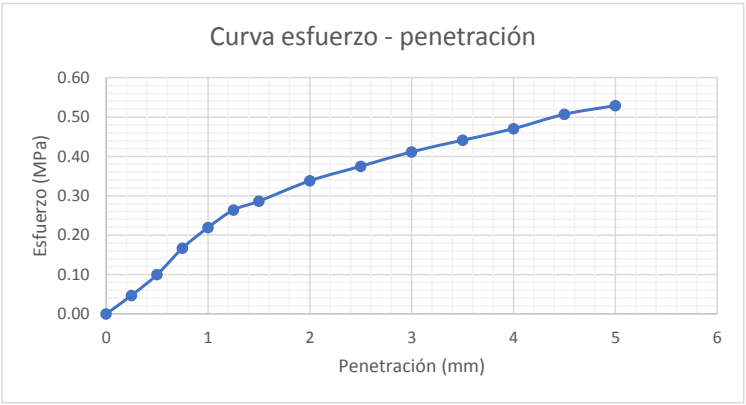
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	123
Masa recipiente (g)	115.42
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	244.37
Masa recipiente + muestra seca (g)	177.24
Contenido de humedad (%)	108.59

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	0.97	0.05
0.020	0.500	2.04	0.10
0.030	0.750	3.42	0.17
0.039	1.000	4.49	0.22
0.049	1.250	5.41	0.26
0.059	1.500	5.86	0.29
0.079	2.000	6.93	0.34
0.098	2.500	7.68	0.37
0.118	3.000	8.44	0.41
0.138	3.500	9.04	0.44
0.157	4.000	9.64	0.47
0.177	4.500	10.39	0.51
0.197	5.000	10.84	0.53



Humedad final	
# recipiente	110
Masa recipiente (g)	117.22
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	236.97
Masa recipiente + muestra seca (g)	173.64
Contenido de humedad (%)	**112.25**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	17.63
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	33.3
Masa recipiente + suelo seco (g)	25.06
Contenido de humedad (%)	**110.9**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	128.7
Masa de la muestra parafinada (g)	137.1
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	34.1
Temperatura del agua (º)	16.6
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99885
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**94.09**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	128.7
Volumen de la muestra (cm^3)	94.09
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.37
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**13.42**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

4. Calibración del picnómetro

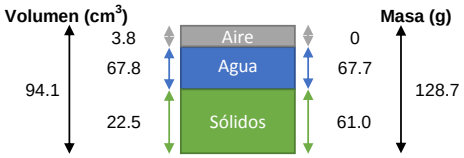
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.29
Temperatura de ensayo (ºC)	19.2
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99837
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	641.99
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	673.1
Gravedad específica sin corregir	2.71
Factor de corrección	1.00016
Gravedad específica corregida	**2.71**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**3.18**
η (%)	**76.06**
S (%)	**94.69**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA)
INV - E - 123

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

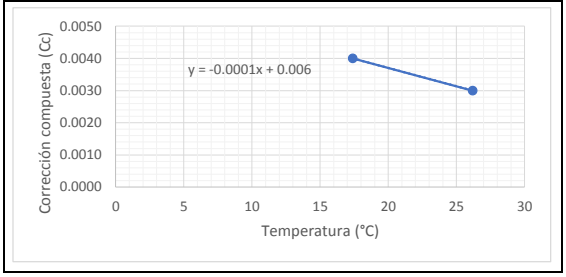
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	7.03
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	19.25
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	19.25
Masa del agua (g)	0
Masa material seco (g)	12.22
Humedad higroscópica (%)	0.0
Factor corrección Ch	**1.0000**

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H

Rango de temperaturas (ºC)	17.4	26.2
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0040	1.0030
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0030



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.2
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	50.2
Gravedad específica del suelo - Gs	2.71
Gravedad específica del agua - G_1	1.000
$Constante\ A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_S}{G_S - g_1}\right]$	
A	3157

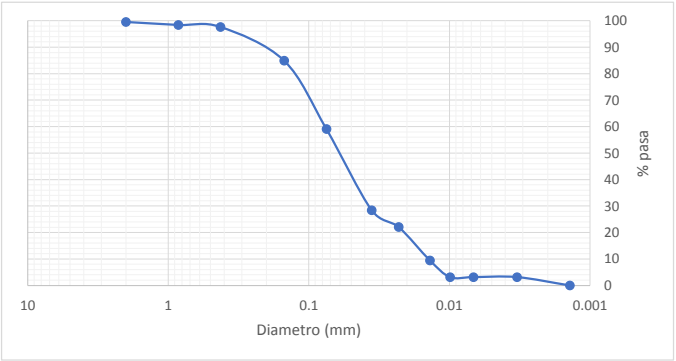
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	08:04

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (ºC)	Cc	$R_{CORREGIDO}$	% suelo suspensión	K	L (cm)	ϕ partículas (mm)
08:06	2	1.013	19.1	0.0038	1.009	28.41	0.01355	13.9	0.0357
08:09	5	1.011	19.1	0.0038	1.007	22.10	0.01355	14.4	0.0230
08:19	15	1.007	19.4	0.0038	1.003	9.47	0.01355	15.5	0.0138
08:34	30	1.005	19.8	0.0037	1.001	3.16	0.01355	16.0	0.0099
09:04	60	1.004	22.2	0.0035	1.001	3.16	0.01307	16.0	0.0067
12:21	250	1.004	22.2	0.0035	1.001	3.16	0.01307	16.0	0.0033
08:04	1440	1.003	22.2	0.0035	1.000	0.00	0.01307	16.3	0.0014

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	50.2
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	20.5
% Retenido en tamiz No 200	40.8
% Pasa el tamiz No 200	59.2

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	$W_{RETENIDO}$ (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.00	100.0	0.0
2.000	No 10	0.24	0.48	99.5	0.5
0.850	No 20	0.56	1.12	98.4	1.6
0.425	No 40	0.39	0.78	97.6	2.4
0.150	No 100	6.38	12.71	84.9	15.1
0.075	No 200	12.97	25.84	59.1	40.9



Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	2
Fina	0.425 - 0.075	39
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	59

Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas	4.75 - 0.075	41
Finos	< 0.075	59

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

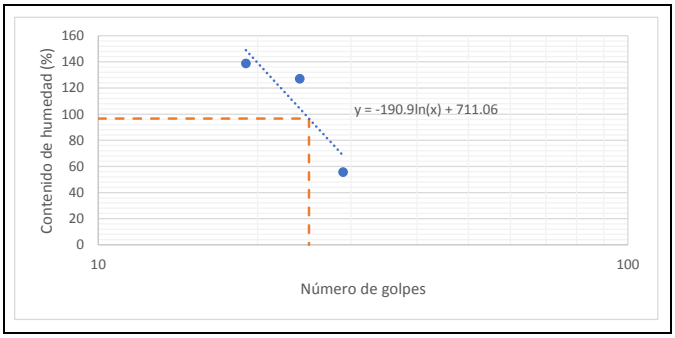
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	10	12	A1
Masa del recipiente (g)	9.663	9.56	10.597
No. Golpes	24	19	29
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	16.378	18.71	16.188
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.619	13.391	14.187
Contenido de humedad (%)	127	139	56



LL (%)	**97**

2. Determinación límite plástico

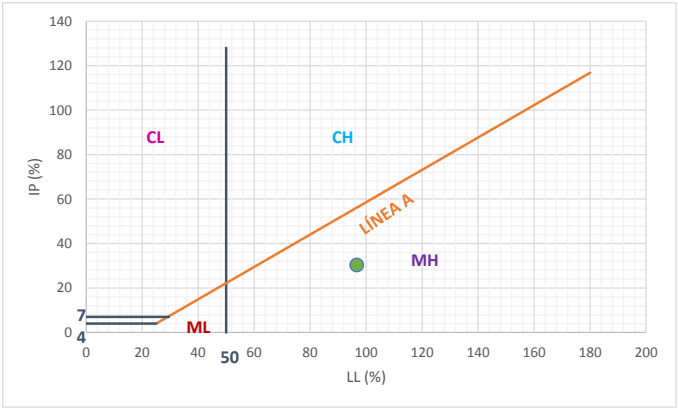
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	57	70
Masa del recipiente (g)	25.131	11.242
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	31.156	17.459
Masa recipiente + suelo seco (g)	28.744	14.993
Contenido de humedad (%)	67	66

LP (%)	**66**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**30**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**MH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Procedencia:	Calle 134A # 50 - 34
Fecha de exploración:	Enero 14 de 2020

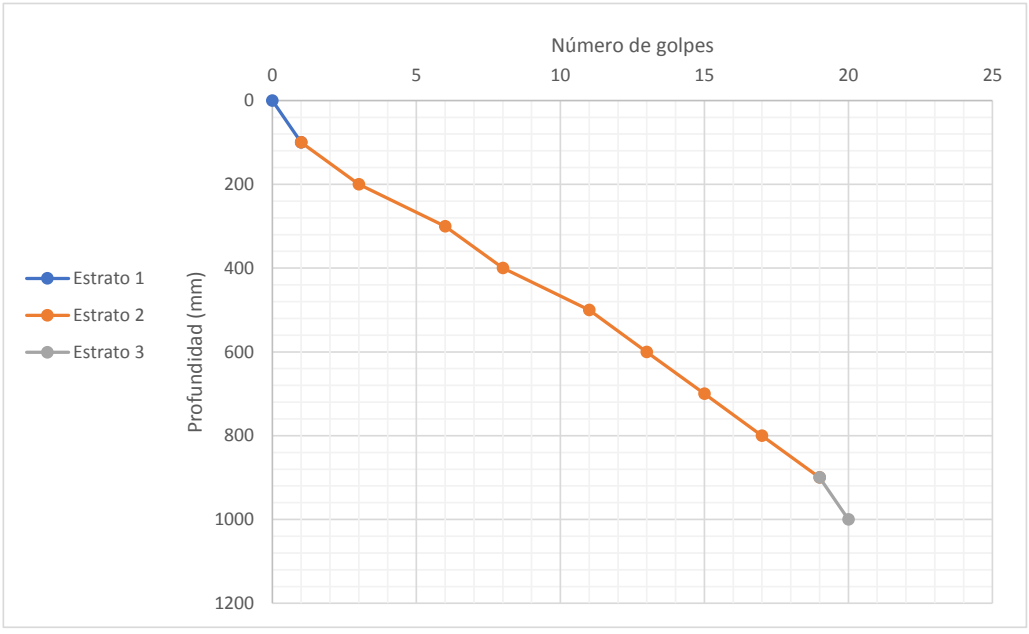
Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
2	200	100	50	1	50
3	300	100	33	1	33
2	400	100	50	1	50
3	500	100	33	1	33
2	600	100	50	1	50
2	700	100	50	1	50
2	800	100	50	1	50
2	900	100	50	1	50
1	1000	100	100	1	100

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	100	100
2	44	800
3	100	100

55



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**44**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

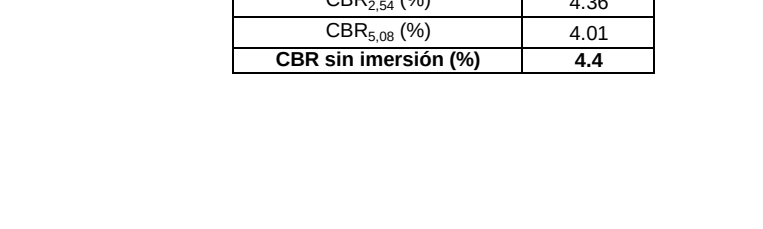
Humedad natural	
# recipiente	16
Masa recipiente (g)	109.5
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	228.23
Masa recipiente + muestra seca (g)	168.87
Contenido de humedad (%)	100.0

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	24.88	0.13
0.050	1.270	40.28	0.20
0.075	1.905	52.13	0.26
0.100	2.540	59.24	0.30
0.125	3.175	67.53	0.34
0.150	3.810	72.27	0.37
0.175	4.445	77.01	0.39
0.200	5.080	81.75	0.41
0.300	7.620	99.52	0.50
0.400	10.160	111.37	0.56
0.500	12.700	123.22	0.62

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.30
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.41
$CBR_{2,54}$ (%)	4.36
$CBR_{5,08}$ (%)	4.01
CBR sin imersión (%)	**4.4**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

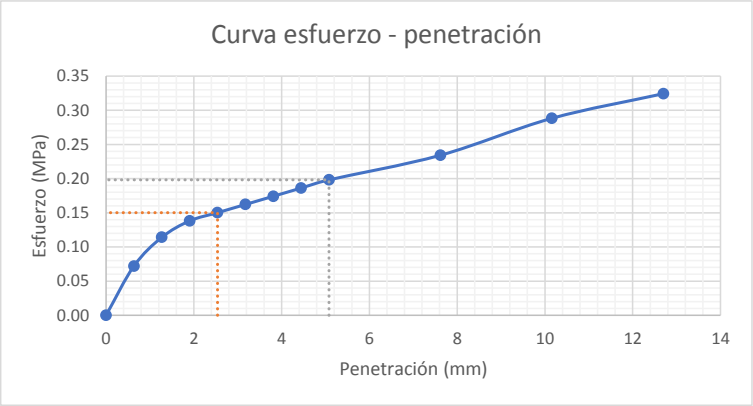
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	16
Masa recipiente (g)	109.5
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	228.23
Masa recipiente + muestra seca (g)	168.87
Contenido de humedad (%)	100.0

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	14.22	0.07
0.050	1.270	22.51	0.11
0.075	1.905	27.25	0.14
0.100	2.540	29.62	0.15
0.125	3.175	31.99	0.16
0.150	3.810	34.36	0.17
0.175	4.445	36.73	0.19
0.200	5.080	39.10	0.20
0.300	7.620	46.21	0.23
0.400	10.160	56.87	0.29
0.500	12.700	63.98	0.32



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.15
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.20
$CBR_{2,54}$ (%)	2.18
$CBR_{5,08}$ (%)	1.92
CBR con inmersión (%)	**2.2**

Humedad final	
# recipiente	4
Masa recipiente (g)	108.43
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	248.28
Masa recipiente + muestra seca (g)	175.74
Contenido de humedad (%)	**107.8**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	128.41	128.7	128.67	127.57	128.34
Diámetro (mm)	62.65	62.87	62.82	62.02	62.59

Área (mm^2)	3076.80
Volumen (cm^3)	394.87
Masa húmeda muestra (g)	504.98
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.28

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	74	67	7	24.05	21.78	2.28	0.094	0.094	0.094	0.00073	29.7
1	41.4	12.4	34	31	3	11.05	10.08	0.98	0.034	0.034	0.034	0.00026	38.0
2	41.4	24.8	82	75	7	26.65	24.38	2.28	0.103	0.103	0.103	0.00080	30.4
3	41.4	37.3	117	106	11	38.03	34.45	3.58	0.156	0.156	0.156	0.00122	28.3
4	41.4	49.7	155	142	13	50.38	46.15	4.23	0.218	0.218	0.218	0.00170	27.2
5	41.4	62	188	169	19	61.10	54.93	6.18	0.264	0.264	0.264	0.00206	26.7
6	27.6	12.4	51	49	2	16.58	15.93	0.65	0.065	0.065	0.065	0.00051	31.4
7	27.6	24.8	77	70	7	25.03	22.75	2.28	0.102	0.102	0.102	0.00079	28.6
8	27.6	37.3	116	106	10	37.70	34.45	3.25	0.155	0.155	0.155	0.00121	28.5
9	27.6	49.7	158	143	15	51.35	46.48	4.88	0.215	0.215	0.215	0.00168	27.7
10	27.6	62	217	198	19	70.53	64.35	6.18	0.300	0.300	0.300	0.00234	27.5
11	13.8	12.4	29	28	1	9.43	9.10	0.33	0.030	0.030	0.030	0.00023	38.9
12	13.8	24.8	89	79	10	28.93	25.68	3.25	0.128	0.128	0.128	0.00100	25.7
13	13.8	37.3	110	100	10	35.75	32.50	3.25	0.165	0.165	0.165	0.00129	25.3
14	13.8	49.7	144	129	15	46.80	41.93	4.88	0.225	0.225	0.225	0.00175	23.9
15	13.8	62	177	157	20	57.53	51.03	6.50	0.279	0.279	0.279	0.00217	23.5

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	14
Masa recipiente (g)	107.07
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	612.05
Masa recipiente + muestra seca (g)	346.91
Masa del agua (g)	265.14
Masa material seco (g)	239.84
Masa material húmedo (g)	504.98
Humedad (%)	110.55

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	14
Masa recipiente (g)	107.07
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	610.36
Masa recipiente + muestra seca (g)	346.91
Masa del agua (g)	263.45
Masa material seco (g)	239.84
Masa material húmedo (g)	503.29
Humedad (%)	109.84

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

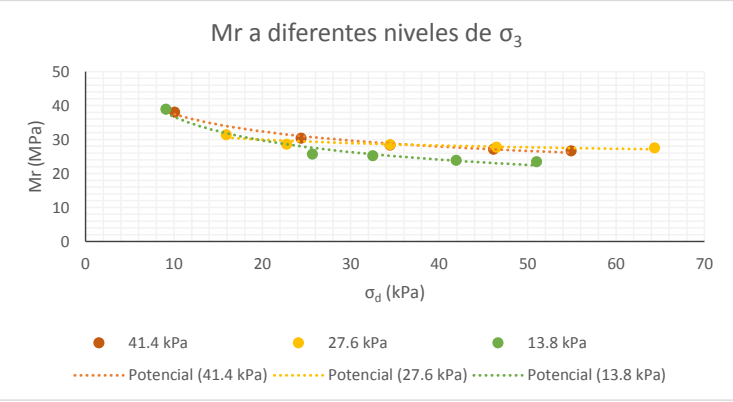
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

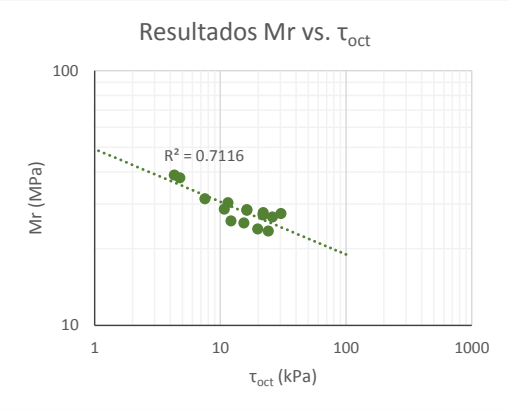
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

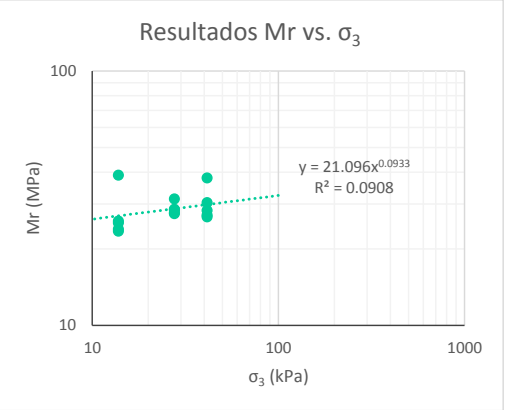
Ecuaciones

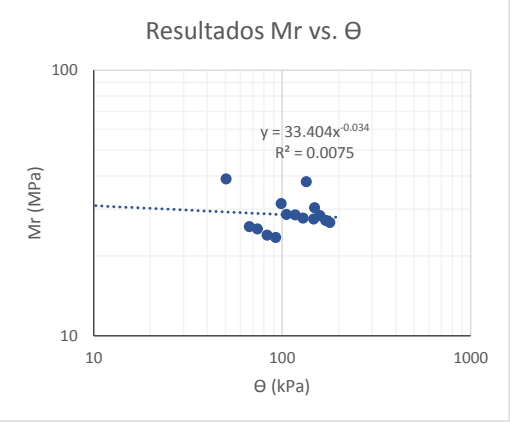
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

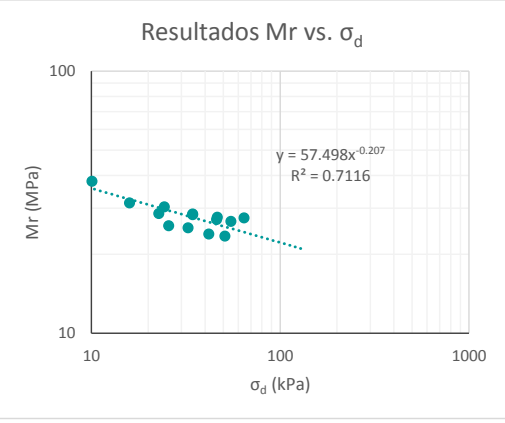
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	10.08	41.40	4.7496	134.275	38.0
2	24.38	41.40	11.4909	148.576	30.4
3	34.45	41.40	16.2405	158.651	28.3
4	46.15	41.40	21.7562	170.352	27.2
5	54.93	41.40	25.8929	179.127	26.7
6	15.93	27.60	7.5074	98.726	31.4
7	22.75	27.60	10.7249	105.551	28.6
8	34.45	27.60	16.2405	117.251	28.5
9	46.48	27.60	21.9094	129.277	27.7
10	64.35	27.60	30.3361	147.152	27.5
11	9.10	13.80	4.2899	50.500	38.9
12	25.68	13.80	12.1038	67.076	25.7
13	32.50	13.80	15.3212	73.901	25.3
14	41.93	13.80	19.7644	83.327	23.9
15	51.03	13.80	24.0543	92.427	23.5











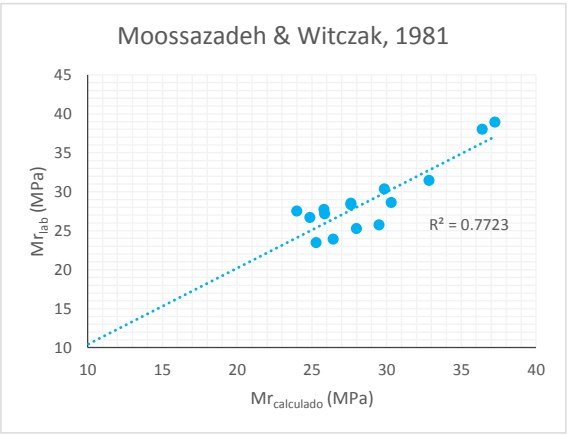
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

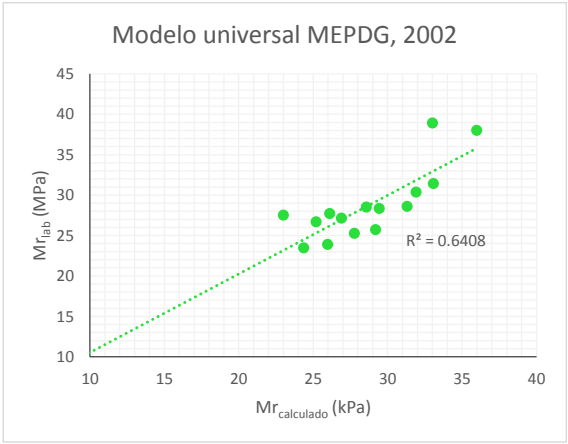
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	21.642			**k_1**	0.378	
		k_2	-0.225			**k_2**	0.098	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-2.128	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	38.0	36.404	1.6	2.6	38.0	35.979	2.1	4.2
2	30.4	29.851	0.5	0.3	30.4	31.897	-1.5	2.3
3	28.3	27.618	0.7	0.5	28.3	29.420	-1.1	1.2
4	27.2	25.863	1.3	1.7	27.2	26.886	0.3	0.1
5	26.7	24.871	1.8	3.4	26.7	25.193	1.5	2.3
6	31.4	32.846	-1.4	2.0	31.4	33.070	-1.6	2.6
7	28.6	30.317	-1.7	2.9	28.6	31.297	-2.7	7.1
8	28.5	27.618	0.9	0.8	28.5	28.564	0.0	0.0
9	27.7	25.822	1.9	3.7	27.7	26.103	1.6	2.7
10	27.5	24.001	3.5	12.4	27.5	22.982	4.5	20.7
11	38.9	37.247	1.7	2.8	38.9	33.003	5.9	35.1
12	25.7	29.504	-3.8	14.1	25.7	29.177	-3.4	11.8
13	25.3	27.982	-2.7	7.3	25.3	27.762	-2.5	6.2
14	23.9	26.426	-2.5	6.3	23.9	25.954	-2.0	4.2
15	23.5	25.286	-1.8	3.3	23.5	24.356	-0.9	0.8
			Σ	64.2			**Σ**	101.2





ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

Prueba rápida de corte

Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.128
Máximo esfuerzo (kPa)	0.00
Máxima deformación (mm)	#N/A
Máxima deformación (%)	#N/A

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

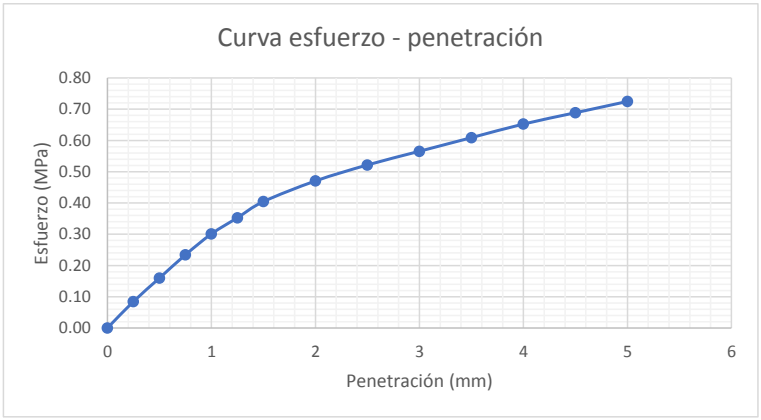
Humedad natural	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	116.78
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	243.18
Masa recipiente + muestra seca (g)	181.3
Contenido de humedad (%)	**95.91**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.74	0.08
0.020	0.500	3.27	0.16
0.030	0.750	4.80	0.23
0.039	1.000	6.17	0.30
0.049	1.250	7.23	0.35
0.059	1.500	8.29	0.40
0.079	2.000	9.64	0.47
0.098	2.500	10.69	0.52
0.118	3.000	11.59	0.57
0.138	3.500	12.48	0.61
0.157	4.000	13.37	0.65
0.177	4.500	14.11	0.69
0.197	5.000	14.85	0.72

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 03 a 08 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.70

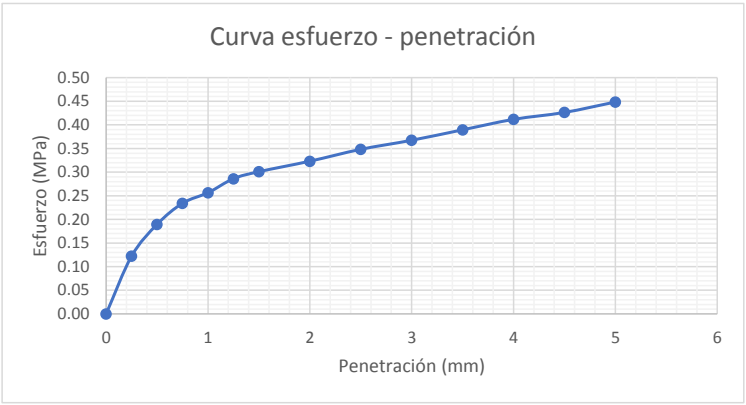
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	116.78
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	243.18
Masa recipiente + muestra seca (g)	181.3
Contenido de humedad (%)	95.91

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	2.50	0.12
0.020	0.500	3.88	0.19
0.030	0.750	4.80	0.23
0.039	1.000	5.26	0.26
0.049	1.250	5.86	0.29
0.059	1.500	6.17	0.30
0.079	2.000	6.62	0.32
0.098	2.500	7.14	0.35
0.118	3.000	7.53	0.37
0.138	3.500	7.98	0.39
0.157	4.000	8.44	0.41
0.177	4.500	8.74	0.43
0.197	5.000	9.19	0.45



Humedad final	
# recipiente	15
Masa recipiente (g)	109.46
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	236.3
Masa recipiente + muestra seca (g)	168.5
Contenido de humedad (%)	**114.84**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	16.75
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	40.19
Masa recipiente + suelo seco (g)	29.44
Contenido de humedad (%)	**84.7**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	225.1
Masa de la muestra parafinada (g)	234
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	72.8
Temperatura del agua (º)	16.6
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99885
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**151.82**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	225.1
Volumen de la muestra (cm^3)	151.82
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.48
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**14.55**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

4. Calibración del picnómetro

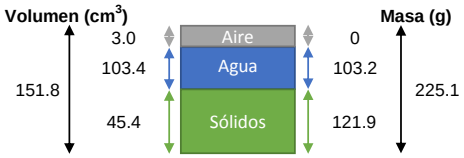
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.2
Temperatura de ensayo (ºC)	18.4
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99852
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	642.06
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	672.94
Gravedad específica sin corregir	2.69
Factor de corrección	1.00032
Gravedad específica corregida	**2.69**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**2.34**
η (%)	**70.08**
S (%)	**97.15**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA)
INV - E - 123

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

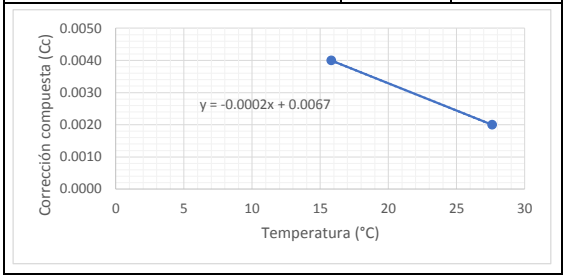
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	7.03
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	19.25
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	19.25
Masa del agua (g)	0
Masa material seco (g)	12.22
Humedad higroscópica (%)	0.0
Factor corrección Ch	**1.0000**

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H

Rango de temperaturas (ºC)	15.8	27.6
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0040	1.0020
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0020



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.2
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	50.2
Gravedad específica del suelo - Gs	2.69
Gravedad específica del agua - G_1	1.000
$Constante\ A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_S}{G_S - g_1}\right]$	
A	3171

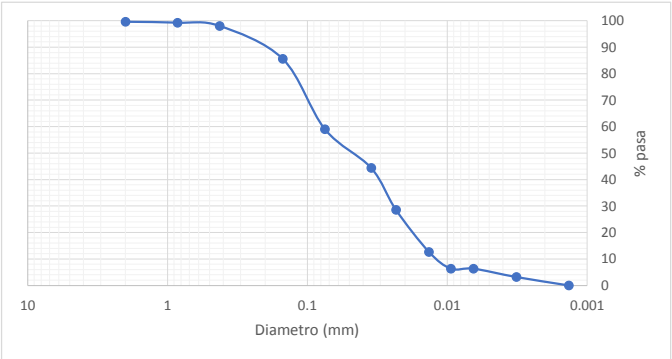
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	08:04

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (ºC)	Cc	$R_{CORREGIDO}$	% suelo suspensión	K	L (cm)	ϕ partículas (mm)
08:06	2	1.018	17.3	0.0037	1.014	44.39	0.01395	12.6	0.0350
08:09	5	1.013	17.3	0.0037	1.009	28.54	0.01395	13.9	0.0233
08:19	15	1.007	20.4	0.0032	1.004	12.68	0.01343	15.2	0.0135
08:34	30	1.005	23.4	0.0027	1.002	6.34	0.01296	15.8	0.0094
09:04	60	1.004	25.2	0.0024	1.002	6.34	0.01267	15.8	0.0065
12:21	250	1.003	25.6	0.0023	1.001	3.17	0.01267	16.0	0.0032
08:04	1440	1.003	25.0	0.0024	1.000	0.00	0.01271	16.3	0.0014

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	50.2
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	20.6
% Retenido en tamiz No 200	41.0
% Pasa el tamiz No 200	59.0

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	$W_{RETENIDO}$ (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.00	100.0	0.0
2.000	No 10	0.20	0.40	99.6	0.4
0.850	No 20	0.17	0.34	99.3	0.7
0.425	No 40	0.61	1.22	98.0	2.0
0.150	No 100	6.26	12.47	85.6	14.4
0.075	No 200	13.33	26.55	59.0	41.0



Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	2
Fina	0.425 - 0.075	39
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	59

Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas	4.75 - 0.075	41
Finos	< 0.075	59

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

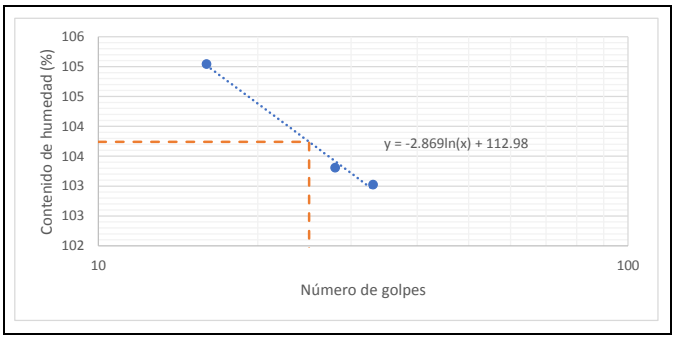
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	17	4	47
Masa del recipiente (g)	6.995	7.449	7.251
No. Golpes	16	28	33
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	22.48	20.408	22.62
Masa recipiente + suelo seco (g)	14.547	13.823	14.821
Contenido de humedad (%)	105	103	103



LL (%)	**104**

2. Determinación límite plástico

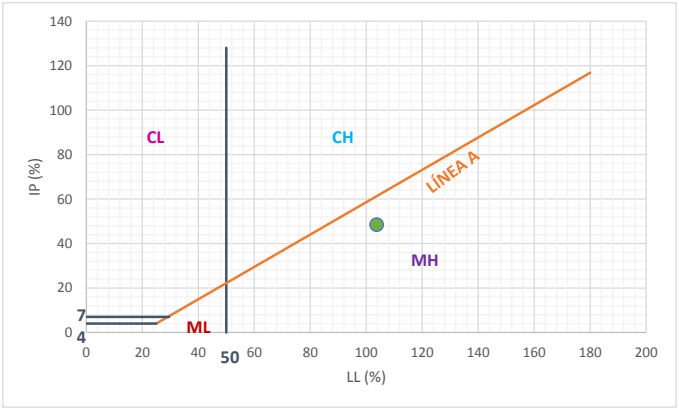
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	13	75
Masa del recipiente (g)	7.172	10.704
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	14.717	17.202
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.034	14.886
Contenido de humedad (%)	55	55

LP (%)	**55**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**48**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**MH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Procedencia:	Calle 125 con Autopista Norte
Fecha de exploración:	Febrero 13 de 2020

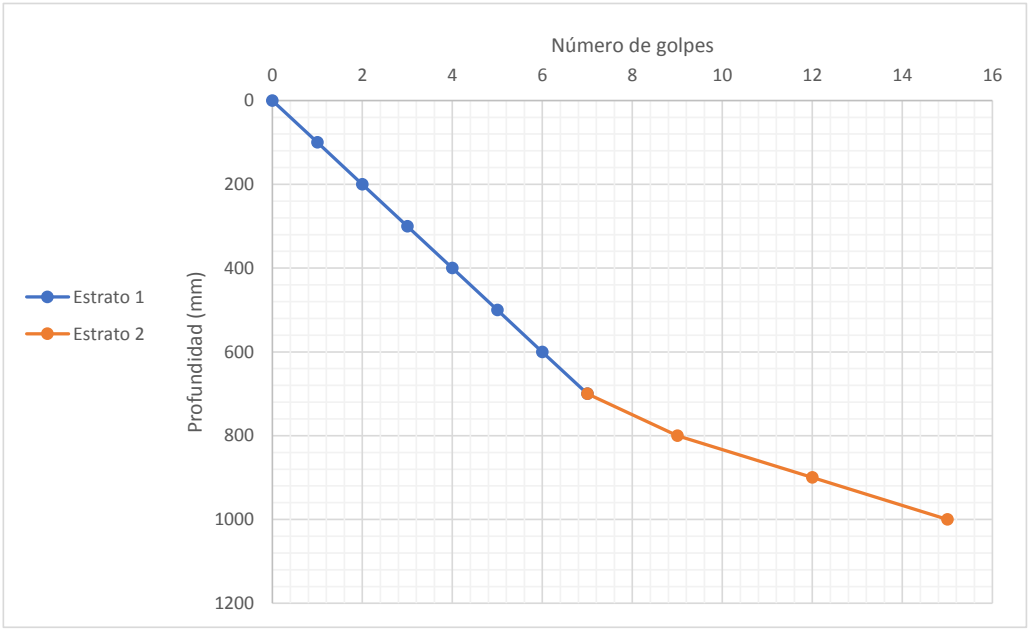
Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
1	200	100	100	1	100
1	300	100	100	1	100
1	400	100	100	1	100
1	500	100	100	1	100
1	600	100	100	1	100
1	700	100	100	1	100
2	800	100	50	1	50
3	900	100	33	1	33
3	1000	100	33	1	33

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	100	700
2	72	300

91711
92



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**100**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

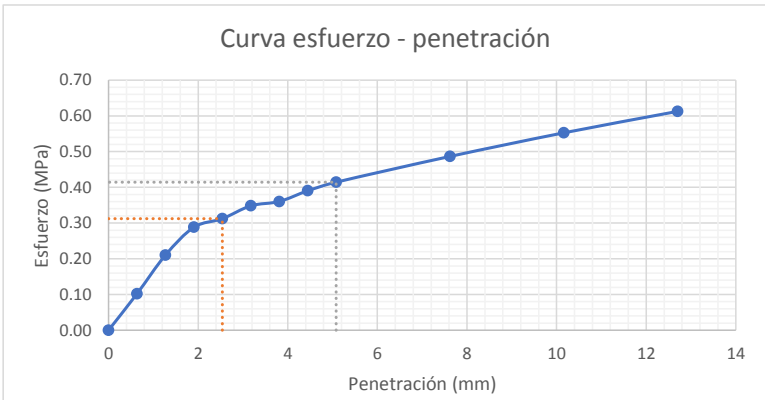
Humedad natural	
# recipiente	2
Masa recipiente (g)	114.58
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	215.49
Masa recipiente + muestra seca (g)	170.27
Contenido de humedad (%)	81.2

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	20.14	0.10
0.050	1.270	41.47	0.21
0.075	1.905	56.87	0.29
0.100	2.540	61.61	0.31
0.125	3.175	68.72	0.35
0.150	3.810	71.09	0.36
0.175	4.445	77.01	0.39
0.200	5.080	81.75	0.41
0.300	7.620	95.97	0.49
0.400	10.160	109.00	0.55
0.500	12.700	120.85	0.61

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.31
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.41
$CBR_{2,54}$ (%)	4.53
$CBR_{5,08}$ (%)	4.01
CBR sin imersión (%)	**4.5**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

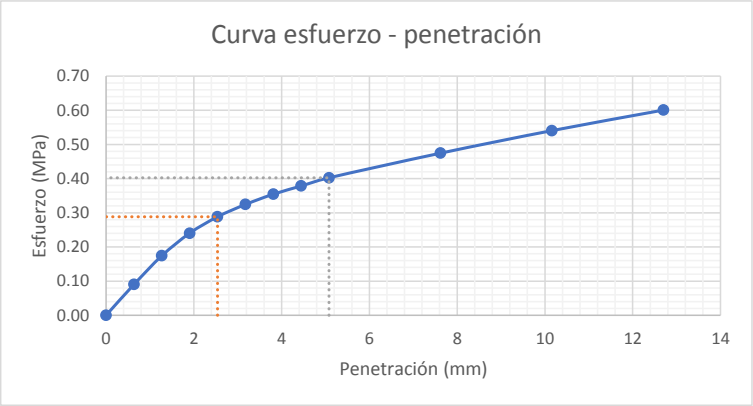
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	2
Masa recipiente (g)	114.58
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	215.49
Masa recipiente + muestra seca (g)	170.27
Contenido de humedad (%)	81.2

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	17.77	0.09
0.050	1.270	34.36	0.17
0.075	1.905	47.39	0.24
0.100	2.540	56.87	0.29
0.125	3.175	63.98	0.32
0.150	3.810	69.90	0.35
0.175	4.445	74.64	0.38
0.200	5.080	79.38	0.40
0.300	7.620	93.60	0.47
0.400	10.160	106.63	0.54
0.500	12.700	118.48	0.60



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.29
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.40
$CBR_{2,54}$ (%)	4.18
$CBR_{5,08}$ (%)	3.89
CBR con inmersión (%)	**4.2**

Humedad final	
# recipiente	100
Masa recipiente (g)	116.23
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	267.61
Masa recipiente + muestra seca (g)	190.49
Contenido de humedad (%)	**103.9**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	138.45	138.47	137.71	137.41	138.01
Diámetro (mm)	62.76	62.4	62.6	62.19	62.49

Área (mm^2)	3066.73
Volumen (cm^3)	423.24
Masa húmeda muestra (g)	585.97
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.38

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	78	71	7	25.43	23.15	2.28	0.129	0.128	0.129	0.00093	24.9
1	41.4	12.4	35	33	2	11.41	10.76	0.65	0.036	0.036	0.036	0.00026	41.3
2	41.4	24.8	98	91	7	31.96	29.67	2.28	0.130	0.130	0.130	0.00094	31.5
3	41.4	37.3	112	102	10	36.52	33.26	3.26	0.149	0.149	0.149	0.00108	30.8
4	41.4	49.7	111	96	15	36.19	31.30	4.89	0.156	0.156	0.156	0.00113	27.7
5	41.4	62	201	182	19	65.54	59.35	6.20	0.316	0.316	0.316	0.00229	25.9
6	27.6	12.4	35	33	2	11.41	10.76	0.65	0.037	0.037	0.037	0.00027	40.1
7	27.6	24.8	83	78	5	27.06	25.43	1.63	0.119	0.119	0.119	0.00086	29.5
8	27.6	37.3	103	92	11	33.59	30.00	3.59	0.147	0.147	0.147	0.00107	28.2
9	27.6	49.7	140	125	15	45.65	40.76	4.89	0.221	0.221	0.221	0.00160	25.5
10	27.6	62	176	157	19	57.39	51.19	6.20	0.264	0.264	0.264	0.00191	26.8
11	13.8	12.4	57	57	0	18.59	18.59	0.00	0.080	0.080	0.080	0.00058	32.1
12	13.8	24.8	55	49	6	17.93	15.98	1.96	0.069	0.069	0.069	0.00050	32.0
13	13.8	37.3	113	102	11	36.85	33.26	3.59	0.150	0.150	0.150	0.00109	30.6
14	13.8	49.7	151	135	16	49.24	44.02	5.22	0.214	0.214	0.214	0.00155	28.4
15	13.8	62	181	162	19	59.02	52.82	6.20	0.282	0.282	0.282	0.00204	25.9

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	126.23
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	712.2
Masa recipiente + muestra seca (g)	440
Masa del agua (g)	272.2
Masa material seco (g)	313.77
Masa material húmedo (g)	585.97
Humedad (%)	86.75

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	126.23
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	711.31
Masa recipiente + muestra seca (g)	440
Masa del agua (g)	271.31
Masa material seco (g)	313.77
Masa material húmedo (g)	585.08
Humedad (%)	86.47

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

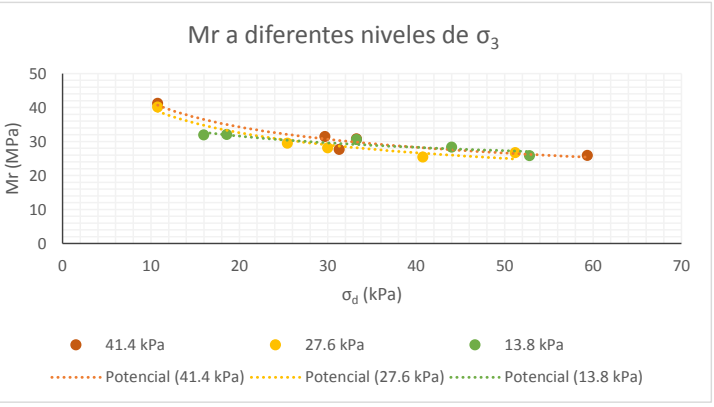
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

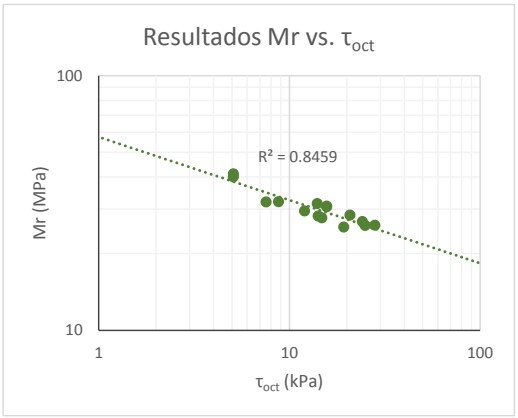
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

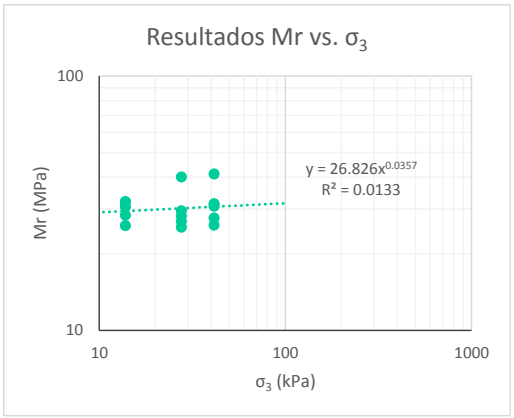
Ecuaciones

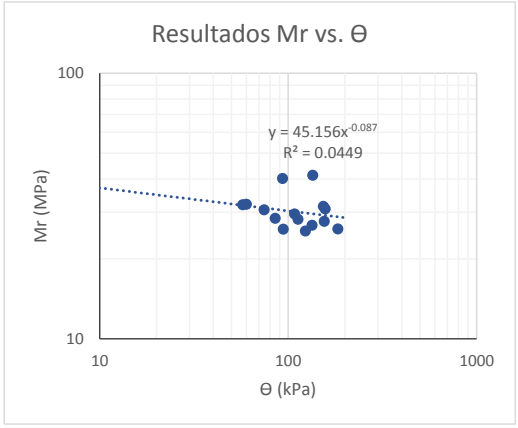
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

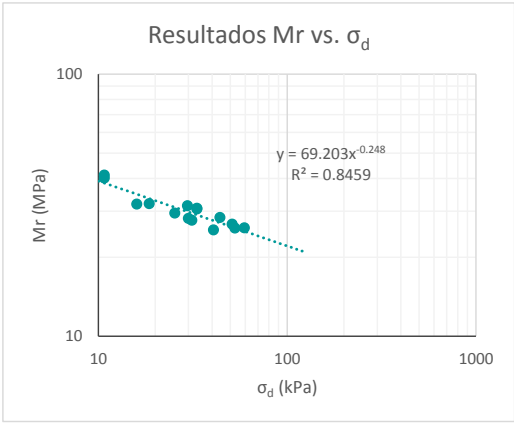
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	10.76	41.40	5.0726	134.961	41.3
2	29.67	41.40	13.9881	153.873	31.5
3	33.26	41.40	15.6790	157.460	30.8
4	31.30	41.40	14.7567	155.504	27.7
5	59.35	41.40	27.9762	183.547	25.9
6	10.76	27.60	5.0726	93.561	40.1
7	25.43	27.60	11.9898	108.234	29.5
8	30.00	27.60	14.1418	112.799	28.2
9	40.76	27.60	19.2144	123.560	25.5
10	51.19	27.60	24.1333	133.995	26.8
11	18.59	13.80	8.7618	59.987	32.1
12	15.98	13.80	7.5321	57.378	32.0
13	33.26	13.80	15.6790	74.660	30.6
14	44.02	13.80	20.7516	85.421	28.4
15	52.82	13.80	24.9019	94.225	25.9











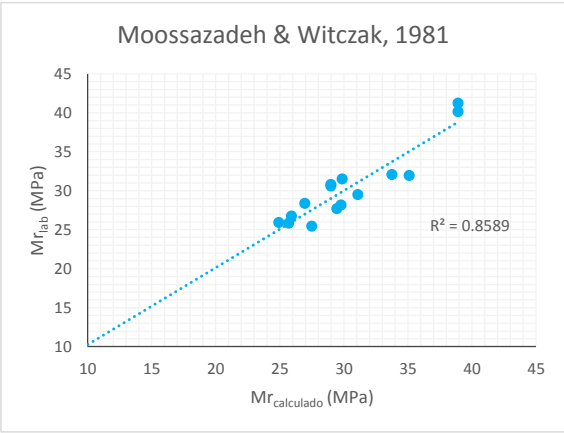
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

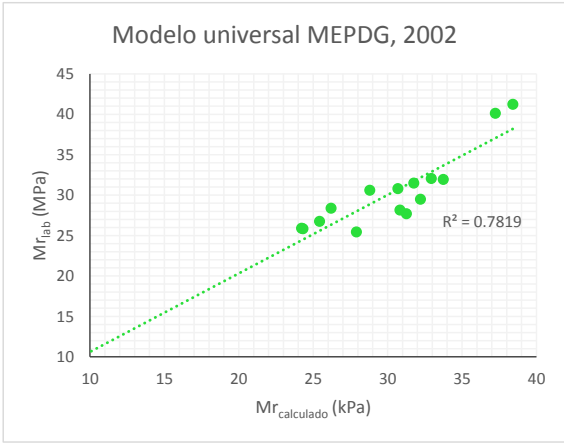
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	21.647			**k_1**	0.415	
		k_2	-0.261			**k_2**	0.085	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-2.514	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	41.3	38.927	2.3	5.4	41.3	38.398	2.9	8.1
2	31.5	29.875	1.6	2.6	31.5	31.753	-0.3	0.1
3	30.8	28.999	1.8	3.3	30.8	30.678	0.1	0.0
4	27.7	29.461	-1.8	3.1	27.7	31.258	-3.6	12.7
5	25.9	24.932	1.0	1.0	25.9	24.207	1.7	2.9
6	40.1	38.927	1.2	1.5	40.1	37.224	2.9	8.5
7	29.5	31.101	-1.6	2.6	29.5	32.198	-2.7	7.3
8	28.2	29.790	-1.6	2.6	28.2	30.826	-2.7	7.1
9	25.5	27.500	-2.0	4.2	25.5	27.899	-2.4	6.0
10	26.8	25.912	0.9	0.7	26.8	25.418	1.3	1.8
11	32.1	33.753	-1.7	2.9	32.1	32.922	-0.9	0.7
12	32.0	35.112	-3.2	9.9	32.0	33.732	-1.8	3.1
13	30.6	28.999	1.6	2.6	30.6	28.800	1.8	3.2
14	28.4	26.953	1.4	2.1	28.4	26.197	2.2	4.8
15	25.9	25.701	0.2	0.0	25.9	24.297	1.6	2.4
			Σ	44.5			**Σ**	68.9





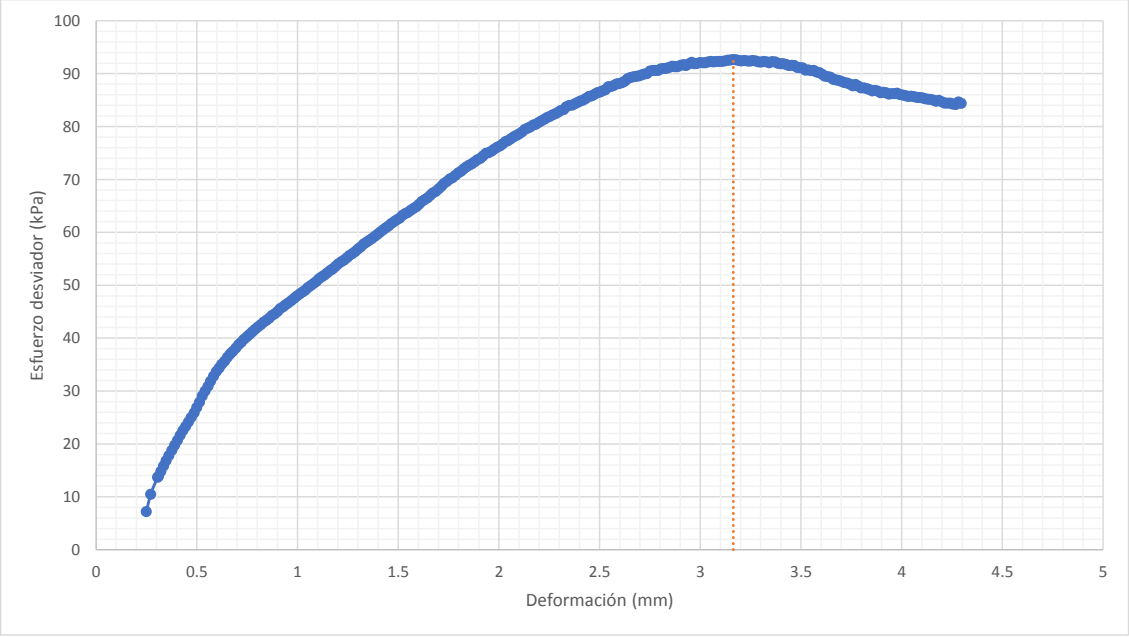
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.138
Máximo esfuerzo (kPa)	92.66
Máxima deformación (mm)	3.164
Máxima deformación (%)	2.292

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

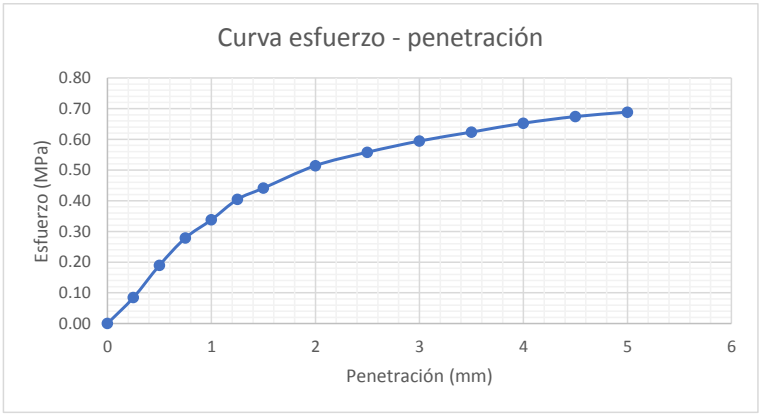
Humedad natural	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	114.39
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	247.7
Masa recipiente + muestra seca (g)	186.32
Contenido de humedad (%)	**85.33**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.74	0.08
0.020	0.500	3.88	0.19
0.030	0.750	5.71	0.28
0.039	1.000	6.93	0.34
0.049	1.250	8.29	0.40
0.059	1.500	9.04	0.44
0.079	2.000	10.54	0.51
0.098	2.500	11.44	0.56
0.118	3.000	12.18	0.59
0.138	3.500	12.78	0.62
0.157	4.000	13.37	0.65
0.177	4.500	13.82	0.67
0.197	5.000	14.11	0.69

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

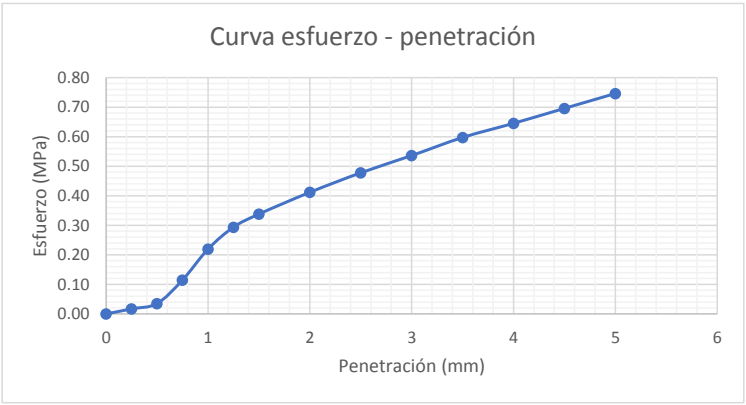
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 14 a 21 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	114.39
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	247.7
Masa recipiente + muestra seca (g)	186.32
Contenido de humedad (%)	85.33

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	0.35	0.02
0.020	0.500	0.72	0.04
0.030	0.750	2.35	0.11
0.039	1.000	4.49	0.22
0.049	1.250	6.02	0.29
0.059	1.500	6.93	0.34
0.079	2.000	8.44	0.41
0.098	2.500	9.79	0.48
0.118	3.000	10.99	0.54
0.138	3.500	12.24	0.60
0.157	4.000	13.22	0.65
0.177	4.500	14.26	0.70
0.197	5.000	15.30	0.75



Humedad final	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	112.82
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	248.27
Masa recipiente + muestra seca (g)	176.32
Contenido de humedad (%)	**113.31**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	112.77
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	174.73
Masa recipiente + suelo seco (g)	145.20
Contenido de humedad (%)	**91.1**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	187.3
Masa de la muestra parafinada (g)	193
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	57.4
Temperatura del agua (º)	16.8
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99881
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**129.63**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	187.3
Volumen de la muestra (cm^3)	129.63
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.44
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**14.17**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

4. Calibración del picnómetro

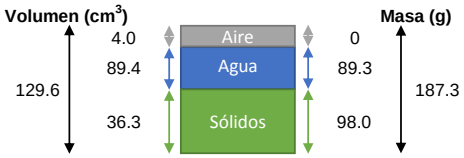
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.4
Temperatura de ensayo (ºC)	21.4
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99791
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	641.76
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	672.9
Gravedad específica sin corregir	2.71
Factor de corrección	0.99970
Gravedad específica corregida	**2.70**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**2.57**
η (%)	**72.01**
S (%)	**95.75**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA)
INV - E - 123

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

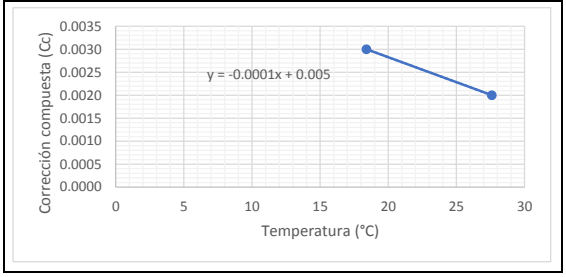
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	7.02
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	18.04
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	17.76
Masa del agua (g)	0.28
Masa material seco (g)	10.74
Humedad higroscópica (%)	2.6
Factor corrección Ch	**0.9746**

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H

Rango de temperaturas (ºC)	18.4	27.6
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0030	1.0020
Corrección compuesta (Cc)	0.0030	0.0020



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	51.13
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	49.8
Gravedad específica del suelo - Gs	2.70
Gravedad específica del agua - G_1	1.000
$Constante\ A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_S}{G_S - g_1}\right]$	
A	3187

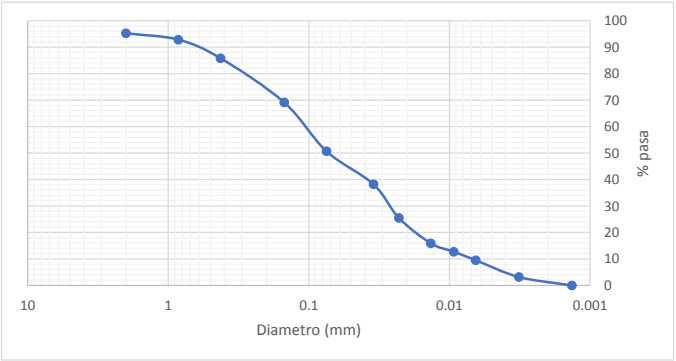
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	11:33

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (ºC)	Cc	$R_{CORREGIDO}$	% suelo suspensión	K	L (cm)	ϕ partículas (mm)
11:35	2	1.015	19.2	0.0029	1.012	38.25	0.01358	13.1	0.0347
11:38	5	1.011	19.2	0.0029	1.008	25.50	0.01358	14.2	0.0229
11:48	15	1.008	19.4	0.0029	1.005	15.94	0.01358	15.0	0.0136
12:03	30	1.007	22.2	0.0026	1.004	12.75	0.01309	15.2	0.0093
12:33	60	1.005	24.0	0.0024	1.003	9.56	0.01282	15.5	0.0065
15:50	250	1.004	25.0	0.0023	1.001	3.19	0.01267	16.0	0.0032
11:33	1440	1.002	25.0	0.0023	1.000	0.00	0.01267	16.3	0.0013

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	49.8
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	24.6
% Retenido en tamiz No 200	49.3
% Pasa el tamiz No 200	50.7

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	$W_{RETENIDO}$ (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.00	100.0	0.0
2.000	No 10	2.36	4.74	95.3	4.7
0.850	No 20	1.20	2.41	92.9	7.1
0.425	No 40	3.50	7.02	85.8	14.2
0.150	No 100	8.30	16.66	69.2	30.8
0.075	No 200	9.20	18.46	50.7	49.3



Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	5
Media	2 - 0.425	9
Fina	0.425 - 0.075	35
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	51

Pocentaje partículas		
Partículas	**Rango tamaños (mm)**	**%**
Arenas	4.75 - 0.075	49
Finos	< 0.075	51

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

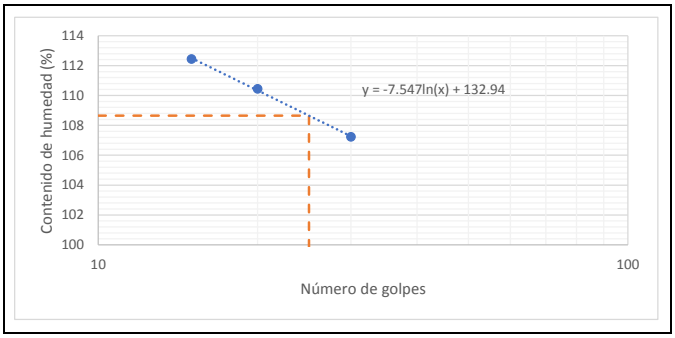
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	47	17	12-ene
Masa del recipiente (g)	7.263	7.008	7.133
No. Golpes	30	20	15
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	19.62	19.517	18.66
Masa recipiente + suelo seco (g)	13.226	12.952	12.559
Contenido de humedad (%)	107	110	112



LL (%)	109

2. Determinación límite plástico

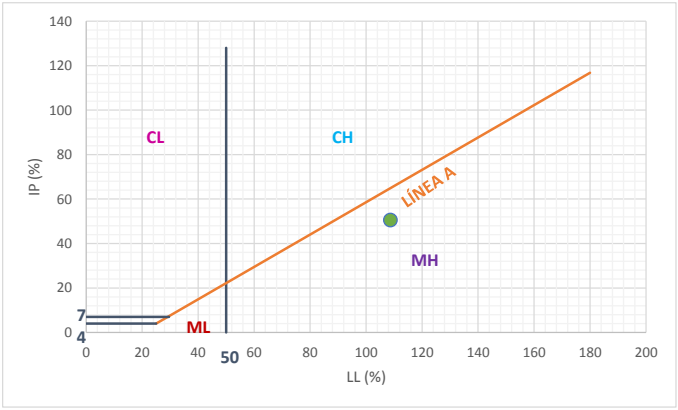
Ensayo	1	2
Número recipiente	3	4
Masa del recipiente (g)	7.256	7.428
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	15.086	15.623
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.19	12.629
Contenido de humedad (%)	59	58

LP (%)	58

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	51

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

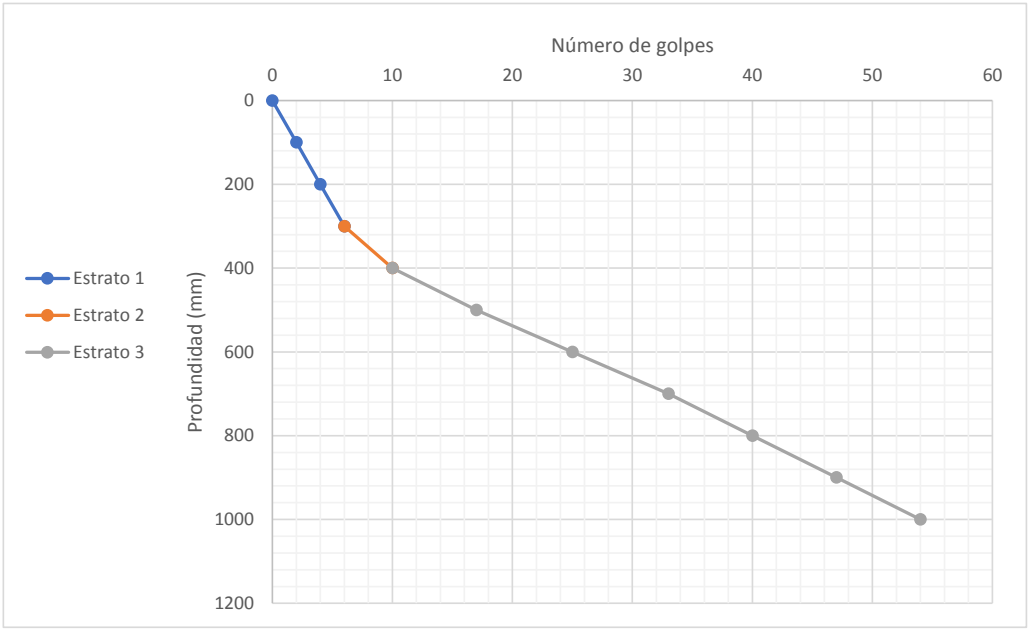
Procedencia:	Calle 125 con Autopista Norte
Fecha de exploración:	Febrero 13 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
2	100	100	50	1	50
2	200	100	50	1	50
2	300	100	50	1	50
4	400	100	25	1	25
7	500	100	14	1	14
8	600	100	13	1	13
8	700	100	13	1	13
7	800	100	14	1	14
7	900	100	14	1	14
7	1000	100	14	1	14

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	50	200
2	25	200
3	14	300



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**50**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

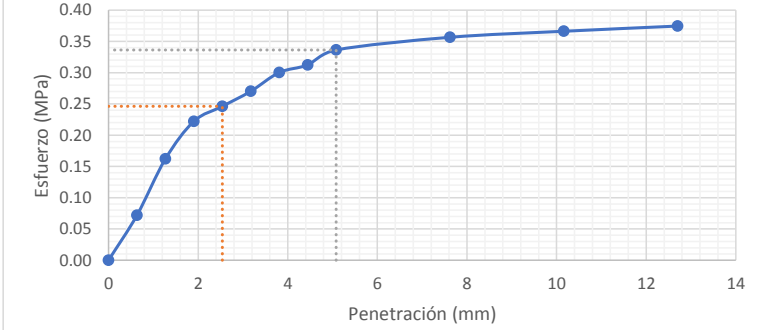
Humedad natural	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	111.82
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	177.18
Masa recipiente + muestra seca (g)	146.5
Contenido de humedad (%)	88.5

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	14.22	0.07
0.050	1.270	31.99	0.16
0.075	1.905	43.84	0.22
0.100	2.540	48.58	0.25
0.125	3.175	53.32	0.27
0.150	3.810	59.24	0.30
0.175	4.445	61.61	0.31
0.200	5.080	66.35	0.34
0.300	7.620	70.35	0.36
0.400	10.160	72.25	0.37
0.500	12.700	73.89	0.37

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.25
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.34
$CBR_{2,54}$ (%)	3.57
$CBR_{5,08}$ (%)	3.25
CBR sin imersión (%)	**3.6**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

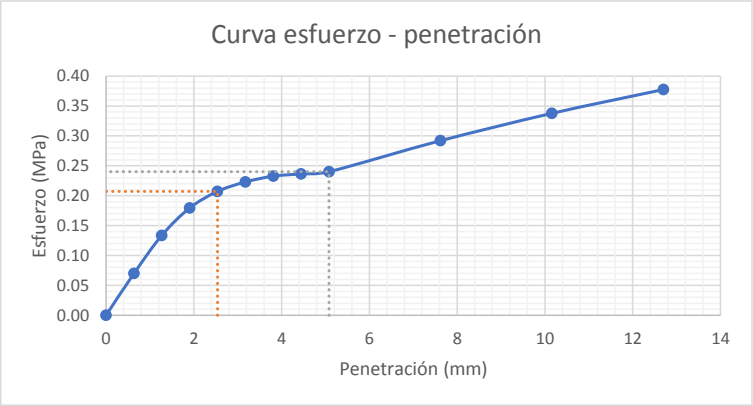
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	111.82
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	177.18
Masa recipiente + muestra seca (g)	146.5
Contenido de humedad (%)	88.5

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	13.77	0.07
0.050	1.270	26.36	0.13
0.075	1.905	35.39	0.18
0.100	2.540	40.87	0.21
0.125	3.175	43.98	0.22
0.150	3.810	45.90	0.23
0.175	4.445	46.64	0.24
0.200	5.080	47.38	0.24
0.300	7.620	57.60	0.29
0.400	10.160	66.63	0.34
0.500	12.700	74.48	0.38



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.21
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.24
$CBR_{2,54}$ (%)	3.01
$CBR_{5,08}$ (%)	2.32
CBR con inmersión (%)	**3.0**

Humedad final	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	115.17
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	232.21
Masa recipiente + muestra seca (g)	174.1
Contenido de humedad (%)	**98.6**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	138.25	137.59	138.27	138.92	138.26
Diámetro (mm)	61.58	61.27	61.74	61.6	61.55

Área (mm^2)	2975.16
Volumen (cm^3)	411.34
Masa húmeda muestra (g)	546.52
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.33

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	76	70	6	25.54	23.53	2.02	0.127	0.128	0.128	0.00092	25.5
1	41.4	12.4	37	34	3	12.44	11.43	1.01	0.036	0.036	0.036	0.00026	43.9
2	41.4	24.8	97	90	7	32.60	30.25	2.35	0.132	0.130	0.131	0.00095	31.9
3	41.4	37.3	112	103	9	37.65	34.62	3.03	0.149	0.149	0.149	0.00108	32.1
4	41.4	49.7	111	95	16	37.31	31.93	5.38	0.153	0.156	0.155	0.00112	28.6
5	41.4	62	202	183	19	67.90	61.51	6.39	0.316	0.316	0.316	0.00229	26.9
6	27.6	12.4	35	32	3	11.76	10.76	1.01	0.041	0.037	0.039	0.00028	38.1
7	27.6	24.8	83	79	4	27.90	26.55	1.34	0.118	0.119	0.119	0.00086	31.0
8	27.6	37.3	102	91	11	34.28	30.59	3.70	0.147	0.147	0.147	0.00106	28.8
9	27.6	49.7	142	126	16	47.73	42.35	5.38	0.223	0.221	0.222	0.00161	26.4
10	27.6	62	174	156	18	58.48	52.43	6.05	0.262	0.264	0.263	0.00190	27.6
11	13.8	12.4	58	58	0	19.49	19.49	0.00	0.081	0.080	0.081	0.00058	33.5
12	13.8	24.8	57	50	7	19.16	16.81	2.35	0.071	0.069	0.070	0.00051	33.2
13	13.8	37.3	111	101	10	37.31	33.95	3.36	0.150	0.150	0.150	0.00108	31.3
14	13.8	49.7	153	136	17	51.43	45.71	5.71	0.215	0.214	0.215	0.00155	29.5
15	13.8	62	179	161	18	60.16	54.11	6.05	0.282	0.282	0.282	0.00204	26.5

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	114.4
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	660.92
Masa recipiente + muestra seca (g)	403.5
Masa del agua (g)	257.42
Masa material seco (g)	289.1
Masa material húmedo (g)	546.52
Humedad (%)	89.04

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	114.48
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	659.99
Masa recipiente + muestra seca (g)	403.5
Masa del agua (g)	256.49
Masa material seco (g)	289.02
Masa material húmedo (g)	545.51
Humedad (%)	88.74

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

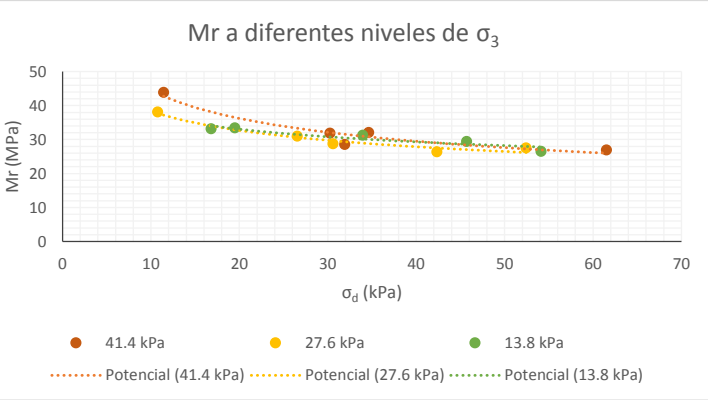
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

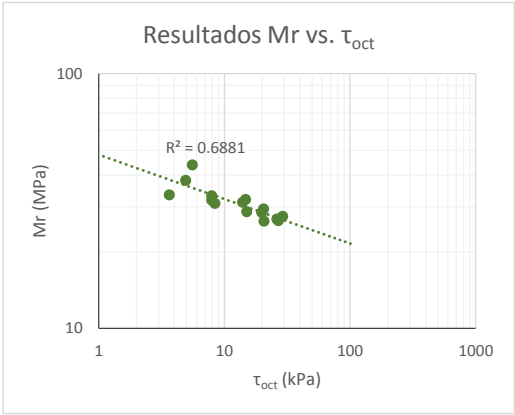
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

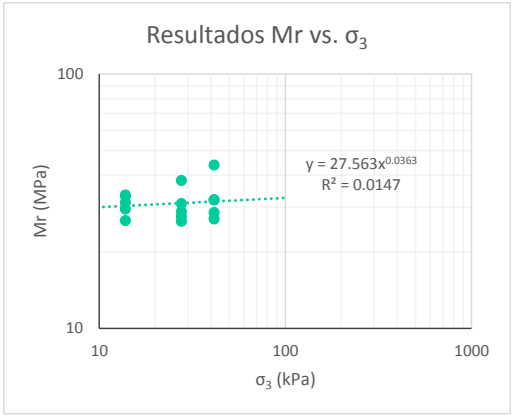
Ecuaciones

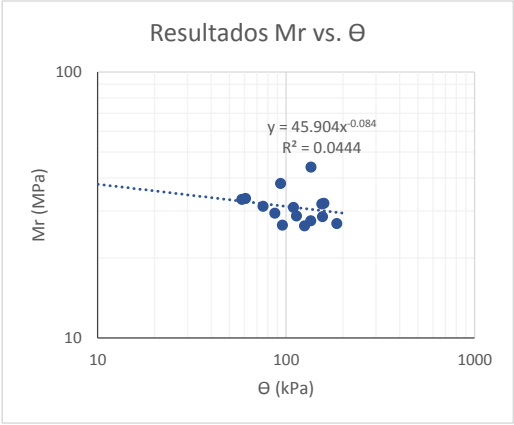
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

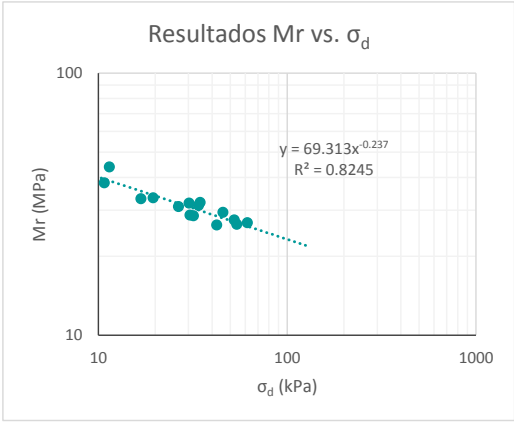
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.43	41.40	5.5456	135.628	43.9
2	30.25	41.40	7.9223	154.450	31.9
3	34.62	41.40	14.7355	158.820	32.1
4	31.93	41.40	19.8058	156.131	28.6
5	61.51	41.40	26.1437	185.709	26.9
6	10.76	27.60	4.9118	93.556	38.1
7	26.55	27.60	8.3977	109.353	31.0
8	30.59	27.60	15.0524	113.387	28.8
9	42.35	27.60	20.5981	125.151	26.4
10	52.43	27.60	28.9957	135.234	27.6
11	19.49	13.80	3.6443	60.895	33.5
12	16.81	13.80	7.9223	58.206	33.2
13	33.95	13.80	13.9433	75.348	31.3
14	45.71	13.80	20.4396	87.112	29.5
15	54.11	13.80	26.7775	95.515	26.5











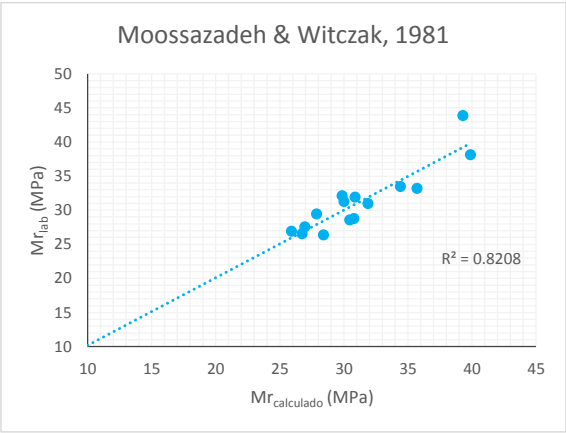
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

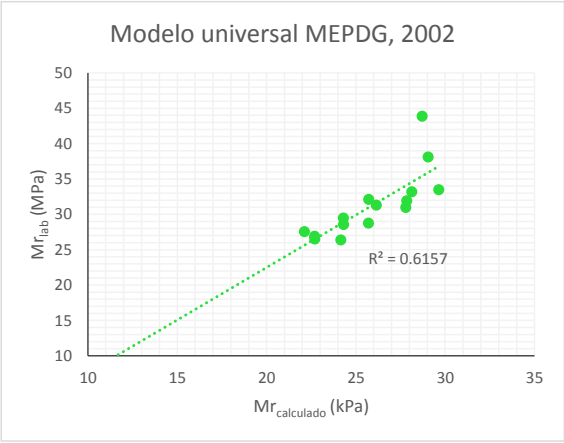
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	22.861			**k_1**	0.303	
		k_2	-0.247			**k_2**	-0.010	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.323	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	43.9	39.289	4.6	21.2	43.9	28.700	15.2	230.7
2	31.9	30.881	1.0	1.1	31.9	27.844	4.1	16.7
3	32.1	29.867	2.3	5.1	32.1	25.707	6.4	41.2
4	28.6	30.470	-1.9	3.6	28.6	24.305	4.3	18.2
5	26.9	25.908	1.0	1.0	26.9	22.686	4.2	17.9
6	38.1	39.883	-1.8	3.1	38.1	29.038	9.1	82.7
7	31.0	31.893	-0.9	0.8	31.0	27.786	3.2	10.2
8	28.8	30.796	-2.0	4.1	28.8	25.705	3.1	9.4
9	26.4	28.414	-2.0	4.2	26.4	24.153	2.2	4.9
10	27.6	26.952	0.6	0.4	27.6	22.108	5.5	29.8
11	33.5	34.426	-0.9	0.9	33.5	29.633	3.8	14.8
12	33.2	35.714	-2.5	6.4	33.2	28.130	5.1	25.6
13	31.3	30.012	1.3	1.6	31.3	26.143	5.1	26.5
14	29.5	27.882	1.6	2.5	29.5	24.287	5.2	26.8
15	26.5	26.742	-0.2	0.0	26.5	22.696	3.8	14.7
			Σ	55.9			**Σ**	570.0





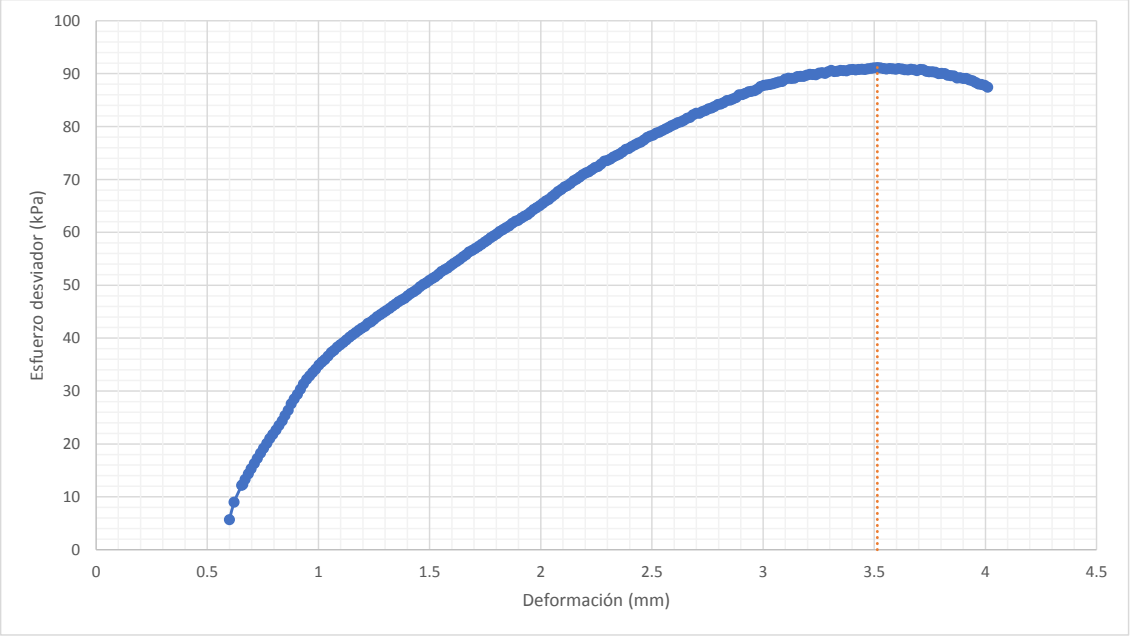
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.138
Máximo esfuerzo (kPa)	91.16
Máxima deformación (mm)	3.514
Máxima deformación (%)	2.342

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

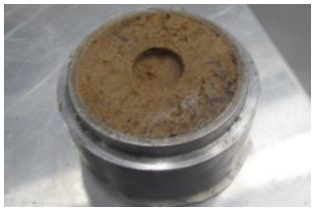
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	126.16
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	257.55
Masa recipiente + muestra seca (g)	196.08
Contenido de humedad (%)	**87.9**

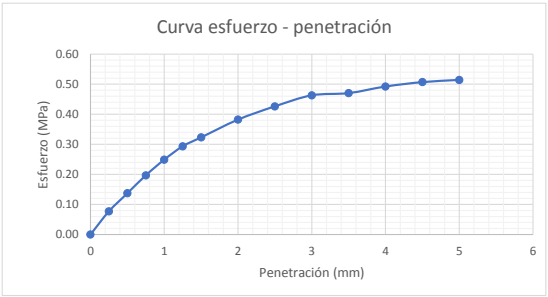
Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.58	0.08
0.020	0.500	2.81	0.14
0.030	0.750	4.04	0.20
0.039	1.000	5.10	0.25
0.049	1.250	6.02	0.29
0.059	1.500	6.62	0.32
0.079	2.000	7.83	0.38
0.098	2.500	8.74	0.43
0.118	3.000	9.49	0.46
0.138	3.500	9.64	0.47
0.157	4.000	10.09	0.49
0.177	4.500	10.39	0.51
0.197	5.000	10.54	0.51

Registro fotográfico





ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	**Fecha ensayos:**	Febrero 21 a 28 de 2020	**Profundidad (m):**	0.40 - 0.70

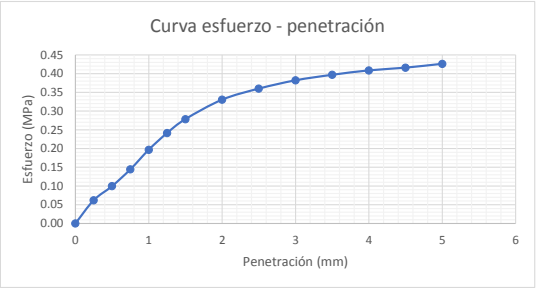
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	126.16
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	257.55
Masa recipiente + muestra seca (g)	196.08
Contenido de humedad (%)	87.91

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.27	0.06
0.020	0.500	2.04	0.10
0.030	0.750	2.96	0.14
0.039	1.000	4.04	0.20
0.049	1.250	4.95	0.24
0.059	1.500	5.71	0.28
0.079	2.000	6.77	0.33
0.098	2.500	7.38	0.36
0.118	3.000	7.83	0.38
0.138	3.500	8.14	0.40
0.157	4.000	8.38	0.41
0.177	4.500	8.53	0.42
0.197	5.000	8.74	0.43



Humedad final	
# recipiente	243
Masa recipiente (g)	113.82
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	252.42
Masa recipiente + muestra seca (g)	183.21
Contenido de humedad (%)	**99.74**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	16.42
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	49.89
Masa recipiente + suelo seco (g)	37.13
Contenido de humedad (%)	**61.6**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	76.2
Masa de la muestra parafinada (g)	79.1
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	26.3
Temperatura del agua (º)	18.5
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99850
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**49.76**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	76.2
Volumen de la muestra (cm^3)	49.76
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.53
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**15.02**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

4. Calibración del picnómetro

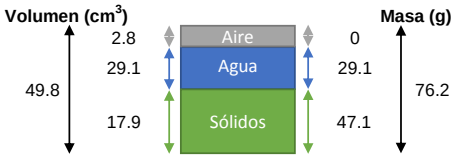
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.6
Temperatura de ensayo (ºC)	22
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99777
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	641.69
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	672.5
Gravedad específica sin corregir	2.64
Factor de corrección	0.99957
Gravedad específica corregida	**2.64**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.78**
η (%)	**64.04**
S (%)	**91.30**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

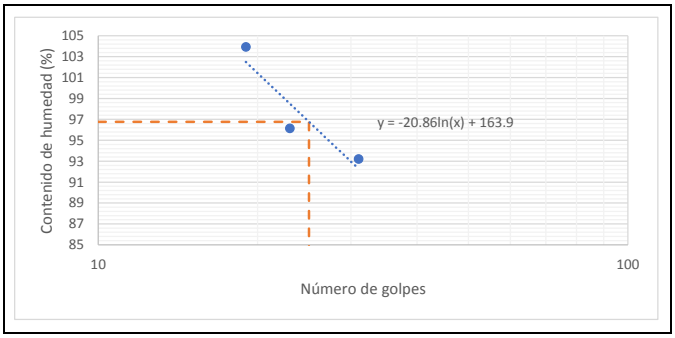
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	71	21	12 1
Masa del recipiente (g)	11.481	7.194	7.158
No. Golpes	31	23	19
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	27.563	15.946	19.045
Masa recipiente + suelo seco (g)	19.805	11.656	12.987
Contenido de humedad (%)	93	96	104



LL (%)	**97**

2. Determinación límite plástico

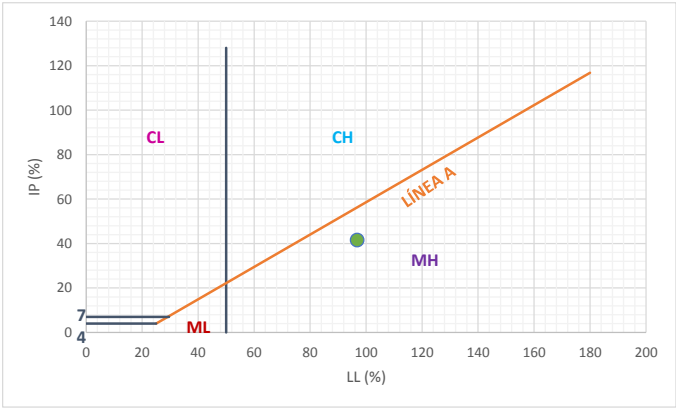
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	21	4
Masa del recipiente (g)	7.347	7.36
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	17.777	17.225
Masa recipiente + suelo seco (g)	14.025	13.756
Contenido de humedad (%)	56	54

LP (%)	**55**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**42**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**MH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Procedencia:	Calle 88 No. 30-50
Fecha de exploración:	Febrero 28 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
1	200	100	100	1	100
1	300	100	100	1	100
1	400	100	100	1	100
1	500	100	100	1	100
1	600	100	100	1	100
1	700	100	100	1	100
2	800	100	50	1	50
2	900	100	50	1	50
2	1000	100	50	1	50

***El ensayo se realizó a nivel de la superficie**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	100	700
2	50	300

DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**100**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

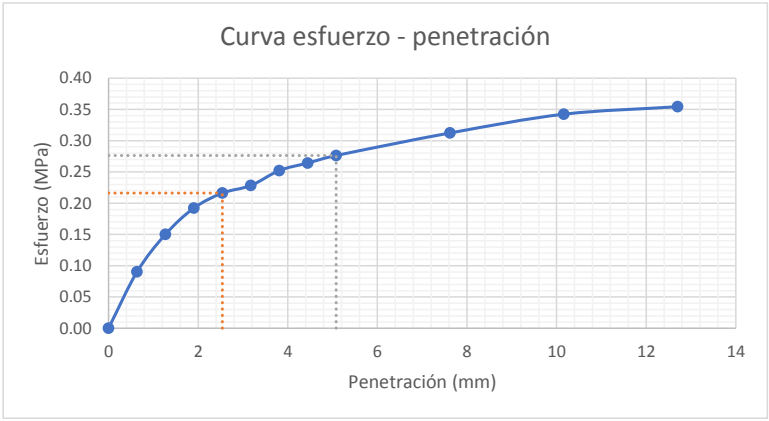
Humedad natural	
# recipiente	
Masa recipiente (g)	11.37
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	65.7
Masa recipiente + muestra seca (g)	45.21
Contenido de humedad (%)	60.5

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	17.77	0.09
0.050	1.270	29.62	0.15
0.075	1.905	37.92	0.19
0.100	2.540	42.65	0.22
0.125	3.175	45.02	0.23
0.150	3.810	49.76	0.25
0.175	4.445	52.13	0.26
0.200	5.080	54.50	0.28
0.300	7.620	61.61	0.31
0.400	10.160	67.53	0.34
0.500	12.700	69.90	0.35

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.22
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.28
$CBR_{2,54}$ (%)	3.14
$CBR_{5,08}$ (%)	2.67
CBR sin imersión (%)	**3.1**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

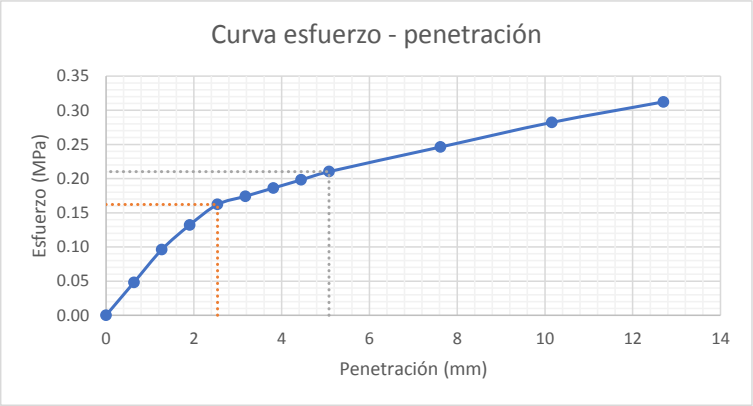
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	0
Masa recipiente (g)	11.37
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	65.7
Masa recipiente + muestra seca (g)	45.21
Contenido de humedad (%)	60.5

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	9.48	0.05
0.050	1.270	18.96	0.10
0.075	1.905	26.06	0.13
0.100	2.540	31.99	0.16
0.125	3.175	34.36	0.17
0.150	3.810	36.73	0.19
0.175	4.445	39.09	0.20
0.200	5.080	41.47	0.21
0.300	7.620	48.58	0.25
0.400	10.160	55.69	0.28
0.500	12.700	61.61	0.31



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.16
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.21
$CBR_{2,54}$ (%)	2.35
$CBR_{5,08}$ (%)	2.03
CBR con inmersión (%)	**2.4**

Humedad final	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	15.23
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	50.89
Masa recipiente + muestra seca (g)	37.21
Contenido de humedad (%)	**62.2**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	130.17	130.3	129.58	130.26	130.08
Diámetro (mm)	62.13	62.4	62.76	62.8	62.52

Área (mm^2)	3070.17
Volumen (cm^3)	399.36
Masa húmeda muestra (g)	616.37
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.54

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	74	67	7	24.10	21.82	2.28	0.085	0.086	0.086	0.00066	33.2
1	41.4	12.4	37	34	3	12.05	11.07	0.98	0.053	0.053	0.053	0.00041	27.2
2	41.4	24.8	57	50	7	18.57	16.29	2.28	0.081	0.080	0.081	0.00062	26.3
3	41.4	37.3	104	94	10	33.87	30.62	3.26	0.154	0.154	0.154	0.00118	25.9
4	41.4	49.7	140	126	14	45.60	41.04	4.56	0.243	0.243	0.243	0.00187	22.0
5	41.4	62	183	165	18	59.61	53.74	5.86	0.331	0.332	0.332	0.00255	21.1
6	27.6	12.4	30	30	0	9.77	9.77	0.00	0.048	0.048	0.048	0.00037	26.5
7	27.6	24.8	58	52	6	18.89	16.94	1.95	0.086	0.085	0.086	0.00066	25.8
8	27.6	37.3	106	96	10	34.53	31.27	3.26	0.157	0.157	0.157	0.00121	25.9
9	27.6	49.7	146	131	15	47.55	42.67	4.89	0.217	0.218	0.218	0.00167	25.5
10	27.6	62	202	183	19	65.79	59.61	6.19	0.362	0.362	0.362	0.00278	21.4
11	13.8	12.4	23	22	1	7.49	7.17	0.33	0.035	0.035	0.035	0.00027	26.6
12	13.8	24.8	58	51	7	18.89	16.61	2.28	0.078	0.078	0.078	0.00060	27.7
13	13.8	37.3	98	88	10	31.92	28.66	3.26	0.142	0.142	0.142	0.00109	26.3
14	13.8	49.7	144	130	14	46.90	42.34	4.56	0.229	0.229	0.229	0.00176	24.1
15	13.8	62	166	148	18	54.07	48.21	5.86	0.249	0.249	0.249	0.00191	25.2

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	118.51
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	734.88
Masa recipiente + muestra seca (g)	501.23
Masa del agua (g)	233.65
Masa material seco (g)	382.72
Masa material húmedo (g)	616.37
Humedad (%)	61.05

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	116.58
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	732.95
Masa recipiente + muestra seca (g)	501.23
Masa del agua (g)	231.72
Masa material seco (g)	384.65
Masa material húmedo (g)	616.37
Humedad (%)	60.24

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

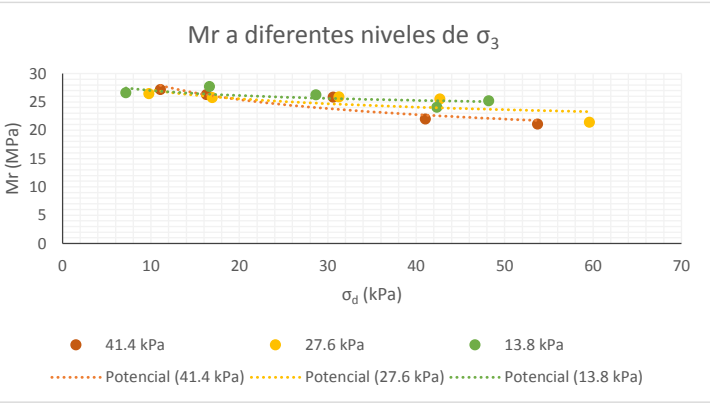
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

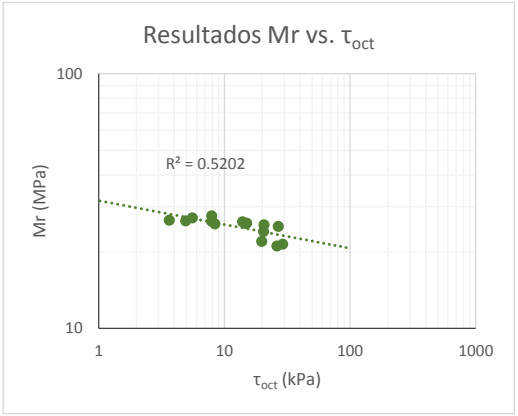
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

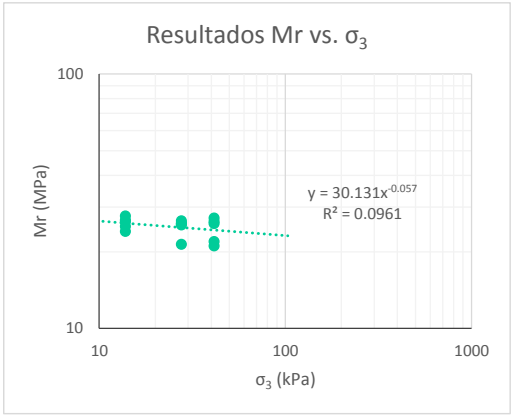
Ecuaciones

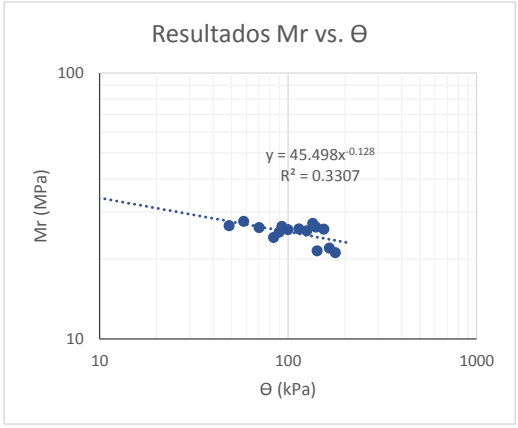
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

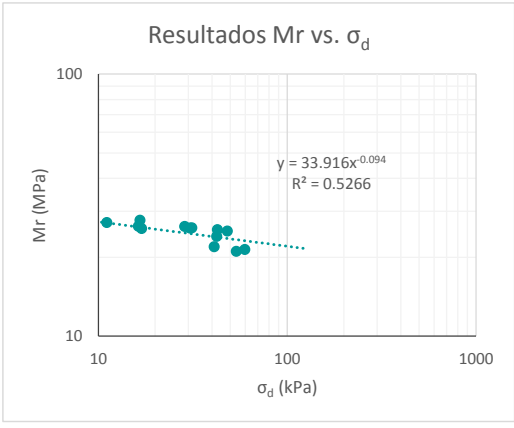
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.07	41.40	5.5456	135.274	27.2
2	16.29	41.40	7.9223	140.486	26.3
3	30.62	41.40	14.7355	154.817	25.9
4	41.04	41.40	19.8058	165.240	22.0
5	53.74	41.40	26.1437	177.943	21.1
6	9.77	27.60	4.9118	92.571	26.5
7	16.94	27.60	8.3977	99.737	25.8
8	31.27	27.60	15.0524	114.069	25.9
9	42.67	27.60	20.5981	125.469	25.5
10	59.61	27.60	28.9957	142.406	21.4
11	7.17	13.80	3.6443	48.566	26.6
12	16.61	13.80	7.9223	58.011	27.7
13	28.66	13.80	13.9433	70.063	26.3
14	42.34	13.80	20.4396	83.743	24.1
15	48.21	13.80	26.7775	89.606	25.2











ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

Moossazadeh & Witczak, 1981

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$$

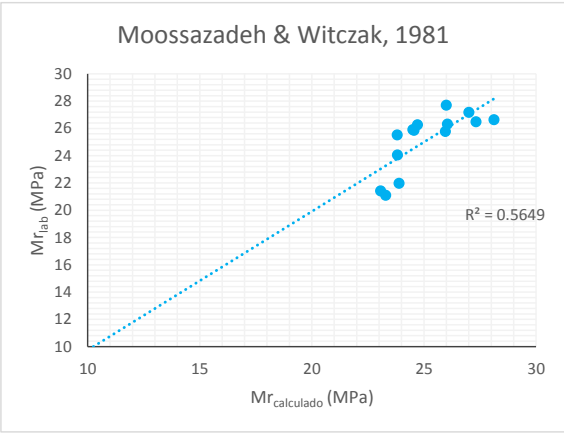
k_1	21.946
k_2	-0.093
P_a (kPa)	102

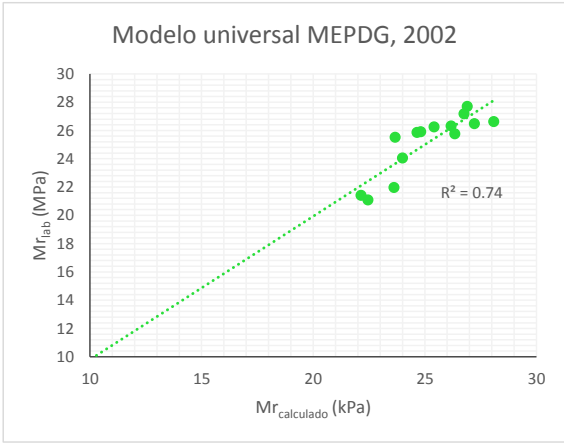
Modelo universal MEPDG, 2002

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$$

k_1	0.278
k_2	-0.031
k_3	-0.952
P_a (kPa)	102

Ciclo	Mr_{lab} (MPa)	Mr_{cal} (MPa)	Difer (MPa)	$Difer^2$ (Mpa)	Mr_{lab} (MPa)	Mr_{cal} (MPa)	Difer (MPa)	$Difer^2$ (MPa)
1	27.2	27.009	0.2	0.0	27.2	26.751	0.4	0.2
2	26.3	26.052	0.3	0.1	26.3	26.169	0.1	0.0
3	25.9	24.559	1.3	1.7	25.9	24.639	1.2	1.5
4	22.0	23.896	-1.9	3.7	22.0	23.614	-1.6	2.7
5	21.1	23.301	-2.2	4.9	21.1	22.449	-1.4	1.9
6	26.5	27.327	-0.8	0.7	26.5	27.218	-0.7	0.5
7	25.8	25.957	-0.2	0.0	25.8	26.338	-0.6	0.3
8	25.9	24.511	1.4	1.9	25.9	24.808	1.1	1.2
9	25.5	23.809	1.7	2.9	25.5	23.668	1.9	3.4
10	21.4	23.076	-1.7	2.7	21.4	22.135	-0.7	0.5
11	26.6	28.130	-1.5	2.2	26.6	28.081	-1.5	2.1
12	27.7	26.004	1.7	2.9	27.7	26.892	0.8	0.7
13	26.3	24.711	1.5	2.4	26.3	25.412	0.8	0.7
14	24.1	23.826	0.2	0.1	24.1	23.994	0.1	0.0
15	25.2	23.539	1.6	2.7	25.2	22.821	2.4	5.6
			Σ	26.3			**Σ**	15.7





ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

Prueba rápida de corte

Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.130
Máximo esfuerzo (kPa)	0.00
Máxima deformación (mm)	#N/A
Máxima deformación (%)	#N/A

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

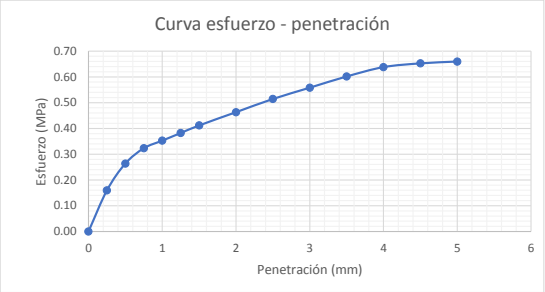
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.67
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	162.25
Masa recipiente + muestra seca (g)	145.35
Contenido de humedad (%)	**56.9**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	3.27	0.16
0.020	0.500	5.41	0.26
0.030	0.750	6.62	0.32
0.039	1.000	7.23	0.35
0.049	1.250	7.83	0.38
0.059	1.500	8.44	0.41
0.079	2.000	9.49	0.46
0.098	2.500	10.54	0.51
0.118	3.000	11.44	0.56
0.138	3.500	12.33	0.60
0.157	4.000	13.08	0.64
0.177	4.500	13.37	0.65
0.197	5.000	13.52	0.66

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 88 No. 30-50				
Fecha exploración:	Febrero 28 de 2020	**Fecha ensayos:**	Marzo 2 a 6 de 2020	**Profundidad (m):**	0.3 - 0.5

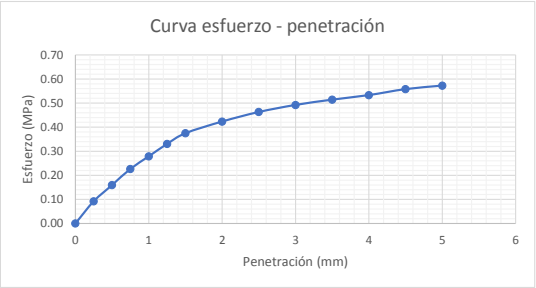
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.67
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	162.25
Masa recipiente + muestra seca (g)	145.35
Contenido de humedad (%)	56.94

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.89	0.09
0.020	0.500	3.27	0.16
0.030	0.750	4.65	0.23
0.039	1.000	5.71	0.28
0.049	1.250	6.77	0.33
0.059	1.500	7.68	0.37
0.079	2.000	8.68	0.42
0.098	2.500	9.49	0.46
0.118	3.000	10.09	0.49
0.138	3.500	10.54	0.51
0.157	4.000	10.93	0.53
0.177	4.500	11.44	0.56
0.197	5.000	11.74	0.57



Humedad final	
# recipiente	7
Masa recipiente (g)	113.27
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	250.24
Masa recipiente + muestra seca (g)	197.68
Contenido de humedad (%)	**62.27**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	115.06
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	187.33
Masa recipiente + suelo seco (g)	164.85
Contenido de humedad (%)	**45.1**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	111.8
Masa de la muestra parafinada (g)	118.6
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	47.9
Temperatura del agua (º)	16
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99895
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**63.46**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muesra (g)	111.8
Volumen de la muestra (cm^3)	63.46
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.76
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**17.28**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

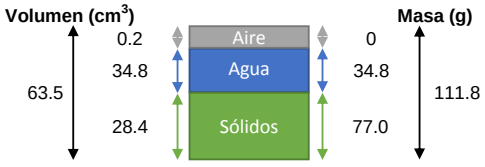
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	50.66
Temperatura de ensayo (ºC)	21
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99799
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	641.80
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	673.8
Gravedad específica sin corregir	2.72
Factor de corrección	0.99979
Gravedad específica corregida	**2.71**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.23**
η (%)	**55.24**
S (%)	**99.30**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

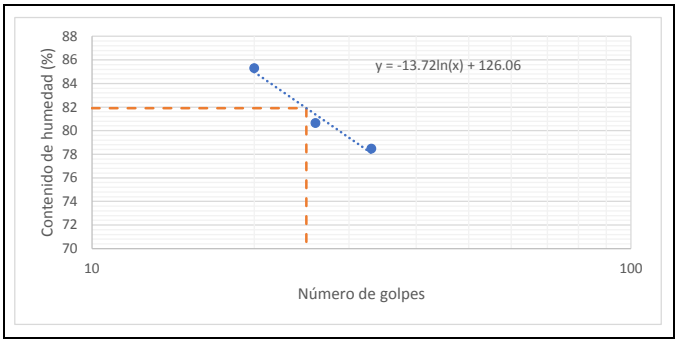
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	73	64	75
Masa del recipiente (g)	10.803	10.968	10.708
No. Golpes	20	26	33
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	21.186	21.827	20.037
Masa recipiente + suelo seco (g)	16.406	16.979	15.935
Contenido de humedad (%)	85	81	78



LL (%)	82

2. Determinación límite plástico

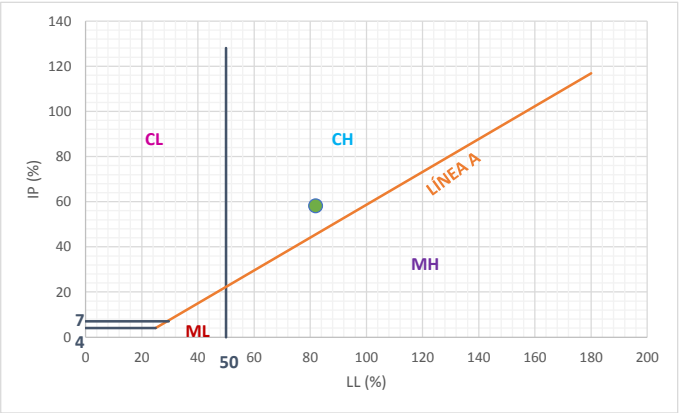
Ensayo	1	2
Número recipiente	C5	55
Masa del recipiente (g)	6.802	12.035
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	13.4	19.47
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.138	18.04
Contenido de humedad (%)	24	24

LP (%)	24

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	58

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	CH

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

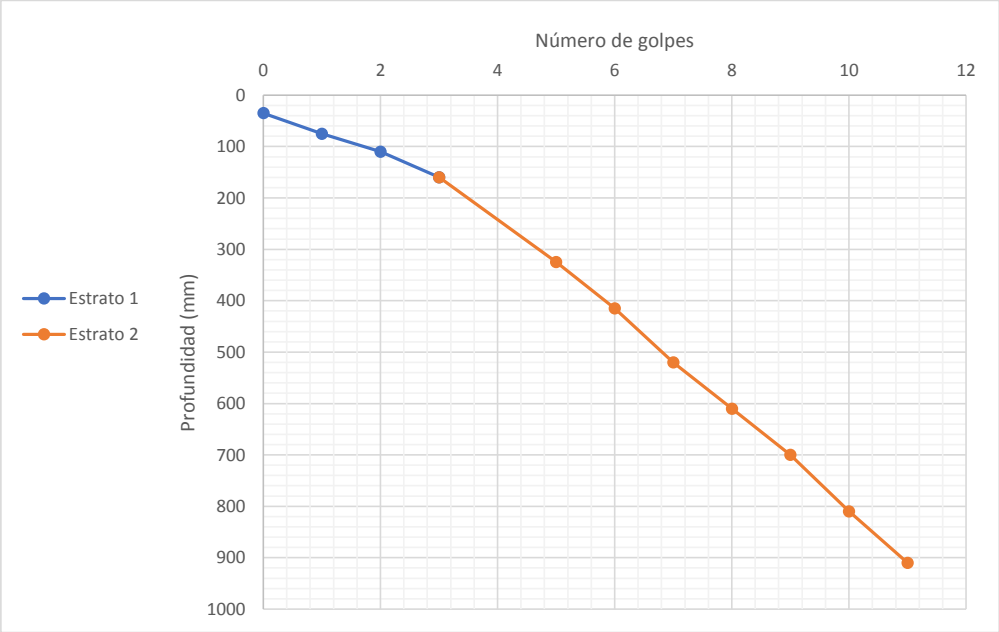
Procedencia:	Escuela Colombiana de Ingeniería
Fecha de exploración:	Julio 09 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	35	-	-	-	-
1	75	40	40	1	40
1	110	35	35	1	35
1	160	50	50	1	50
2	325	165	83	1	83
1	415	90	90	1	90
1	520	105	105	1	105
1	610	90	90	1	90
1	700	90	90	1	90
1	810	110	110	1	110
1	910	100	100	1	100

***El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestra**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	41	160
2	94	750



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe) **94**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

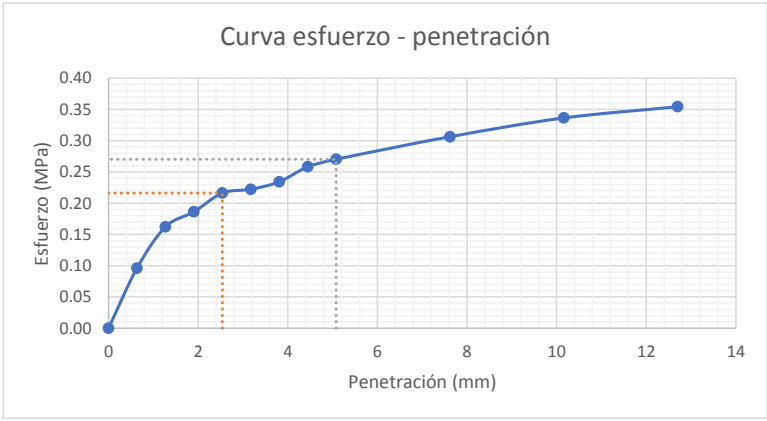
Humedad natural	
# recipiente	3M
Masa recipiente (g)	16.59
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	35.88
Masa recipiente + muestra seca (g)	29.94
Contenido de humedad (%)	44.5

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	18.96	0.10
0.050	1.270	31.99	0.16
0.075	1.905	36.73	0.19
0.100	2.540	42.65	0.22
0.125	3.175	43.84	0.22
0.150	3.810	46.21	0.23
0.175	4.445	50.95	0.26
0.200	5.080	53.32	0.27
0.300	7.620	60.42	0.31
0.400	10.160	66.35	0.34
0.500	12.700	69.90	0.35

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.22
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.27
$CBR_{2,54}$ (%)	3.14
$CBR_{5,08}$ (%)	2.61
CBR sin imersión (%)	**3.14**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

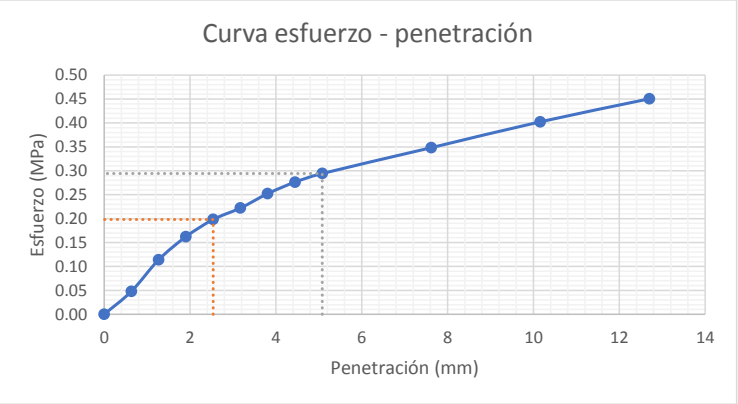
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	3M
Masa recipiente (g)	16.59
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	35.88
Masa recipiente + muestra seca (g)	29.94
Contenido de humedad (%)	44.5

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		4.54	
Diámetro del pistón (mm)		49.64	
Área del pistón (mm^2)		1935.32	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	9.480	0.05
0.050	1.270	22.500	0.11
0.075	1.905	31.990	0.16
0.100	2.540	39.100	0.20
0.125	3.175	43.840	0.22
0.150	3.810	49.760	0.25
0.175	4.445	54.500	0.28
0.200	5.080	58.060	0.29
0.300	7.620	68.720	0.35
0.400	10.160	79.380	0.40
0.500	12.700	88.860	0.45



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.20
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.29
$CBR_{2,54}$ (%)	2.88
$CBR_{5,08}$ (%)	2.85
CBR con inmersión (%)	**2.88**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	7.41
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	27.31
Masa recipiente + muestra seca (g)	20.89
Contenido de humedad (%)	47.6

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	146.41	145.95	145.97	145.49	145.96
Diámetro (mm)	71.61	71.78	71.08	71.38	71.46

Área (mm^2)	4010.94
Volumen (cm^3)	585.42
Masa húmeda muestra (g)	1015.47
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.73

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	105	96	9	26.18	23.93	2.24	0.069	0.068	0.069	0.00047	51.00
1	41.4	12.4	58	55	3	14.46	13.71	0.75	0.035	0.036	0.036	0.00024	56.38
2	41.4	24.8	113	103	10	28.17	25.68	2.49	0.080	0.078	0.079	0.00054	47.44
3	41.4	37.3	166	151	15	41.39	37.65	3.74	0.103	0.101	0.102	0.00070	53.87
4	41.4	49.7	221	201	20	55.10	50.11	4.99	0.156	0.154	0.155	0.00106	47.19
5	41.4	62	267	242	25	66.57	60.33	6.23	0.220	0.218	0.219	0.00150	40.21
6	27.6	12.4	57	53	4	14.21	13.21	1.00	0.035	0.034	0.035	0.00024	55.90
7	27.6	24.8	111	101	10	27.67	25.18	2.49	0.079	0.078	0.079	0.00054	46.82
8	27.6	37.3	172	158	14	42.88	39.39	3.49	0.122	0.121	0.122	0.00083	47.32
9	27.6	49.7	216	195	21	53.85	48.62	5.24	0.164	0.163	0.164	0.00112	43.40
10	27.6	62	272	245	27	67.81	61.08	6.73	0.221	0.219	0.220	0.00151	40.52
11	13.8	12.4	40	36	4	9.97	8.98	1.00	0.017	0.016	0.017	0.00011	79.39
12	13.8	24.8	107	97	10	26.68	24.18	2.49	0.075	0.074	0.075	0.00051	47.38
13	13.8	37.3	170	156	14	42.38	38.89	3.49	0.115	0.114	0.115	0.00078	49.58
14	13.8	49.7	218	198	20	54.35	49.36	4.99	0.169	0.167	0.168	0.00115	42.89
15	13.8	62	258	232	26	64.32	57.84	6.48	0.229	0.228	0.229	0.00157	36.95

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	11
Masa recipiente (g)	105.97
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1121.44
Masa recipiente + muestra seca (g)	813.04
Masa del agua (g)	308.4
Masa material seco (g)	707.07
Masa material húmedo (g)	1015.47
Humedad (%)	43.62

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	11
Masa recipiente (g)	105.97
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1120.78
Masa recipiente + muestra seca (g)	813.04
Masa del agua (g)	307.74
Masa material seco (g)	707.07
Masa material húmedo (g)	1014.81
Humedad (%)	43.52

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

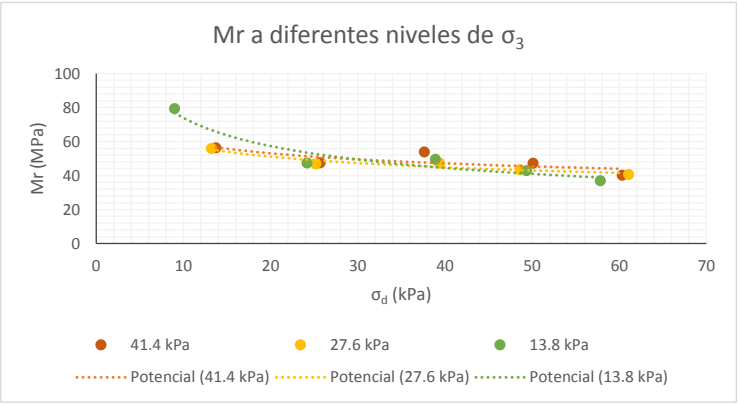
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

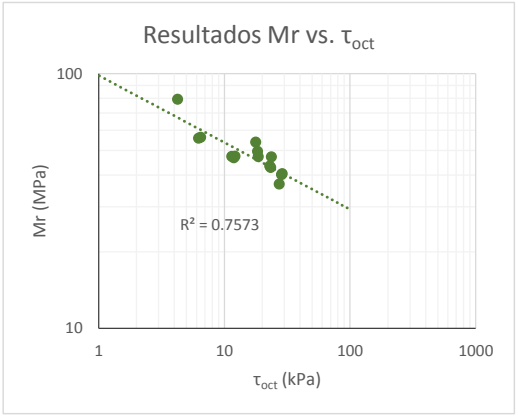
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

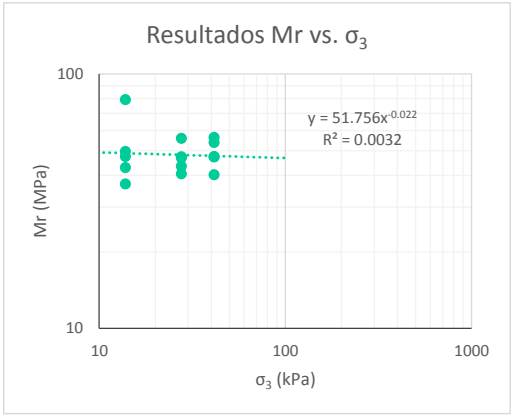
Ecuaciones

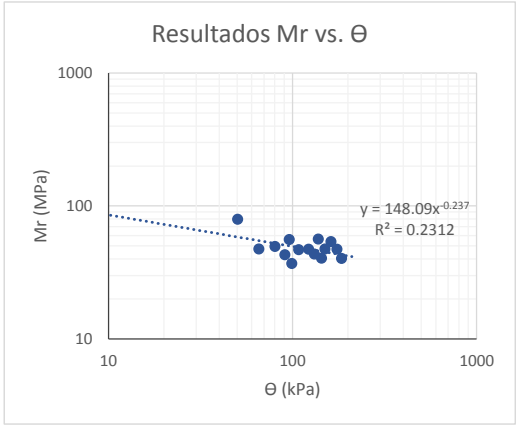
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

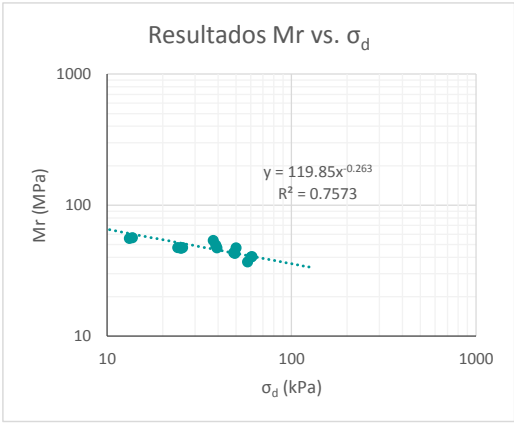
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	13.71	41.40	6.4641	137.912	56.4
2	25.68	41.40	12.1056	149.880	47.4
3	37.65	41.40	17.7470	161.847	53.9
4	50.11	41.40	23.6235	174.313	47.2
5	60.33	41.40	28.4422	184.535	40.2
6	13.21	27.60	6.2291	96.014	55.9
7	25.18	27.60	11.8705	107.981	46.8
8	39.39	27.60	18.5697	122.192	47.3
9	48.62	27.60	22.9183	131.417	43.4
10	61.08	27.60	28.7948	143.883	40.5
11	8.98	13.80	4.2311	50.375	79.4
12	24.18	13.80	11.4004	65.584	47.4
13	38.89	13.80	18.3346	80.294	49.6
14	49.36	13.80	23.2709	90.765	42.9
15	57.84	13.80	27.2669	99.242	36.9











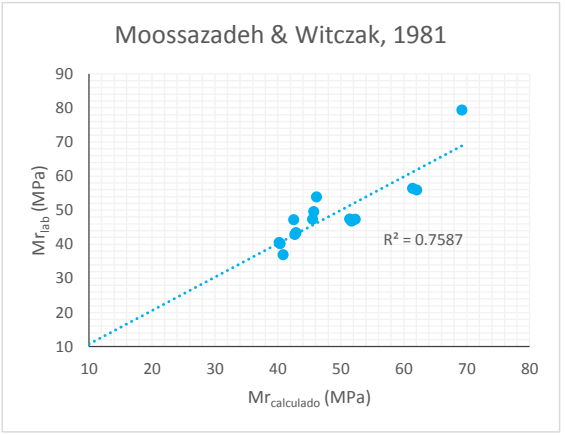
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

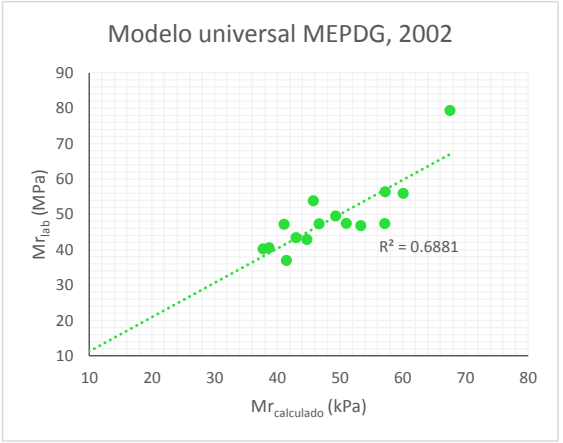
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	34.771			**k_1**	0.661	
		k_2	-0.283			**k_2**	-0.122	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-2.065	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	56.4	61.387	-5.0	25.1	56.4	57.215	-0.8	0.7
2	47.4	51.392	-3.9	15.6	47.4	51.007	-3.6	12.7
3	53.9	46.114	7.8	60.2	53.9	45.739	8.1	66.1
4	47.2	42.526	4.7	21.7	47.2	41.058	6.1	37.6
5	40.2	40.347	-0.1	0.0	40.2	37.725	2.5	6.2
6	55.9	62.035	-6.1	37.6	55.9	60.064	-4.2	17.3
7	46.8	51.678	-4.9	23.6	46.8	53.312	-6.5	42.2
8	47.3	45.526	1.8	3.2	47.3	46.668	0.7	0.4
9	43.4	42.892	0.5	0.3	43.4	42.992	0.4	0.2
10	40.5	40.207	0.3	0.1	40.5	38.670	1.9	3.4
11	79.4	69.217	10.2	103.6	79.4	67.522	11.9	141.0
12	47.4	52.273	-4.9	24.0	47.4	57.137	-9.8	95.2
13	49.6	45.691	3.9	15.1	49.6	49.315	0.3	0.1
14	42.9	42.707	0.2	0.0	42.9	44.714	-1.8	3.3
15	36.9	40.833	-3.9	15.1	36.9	41.453	-4.5	20.3
			Σ	345.2			**Σ**	446.7





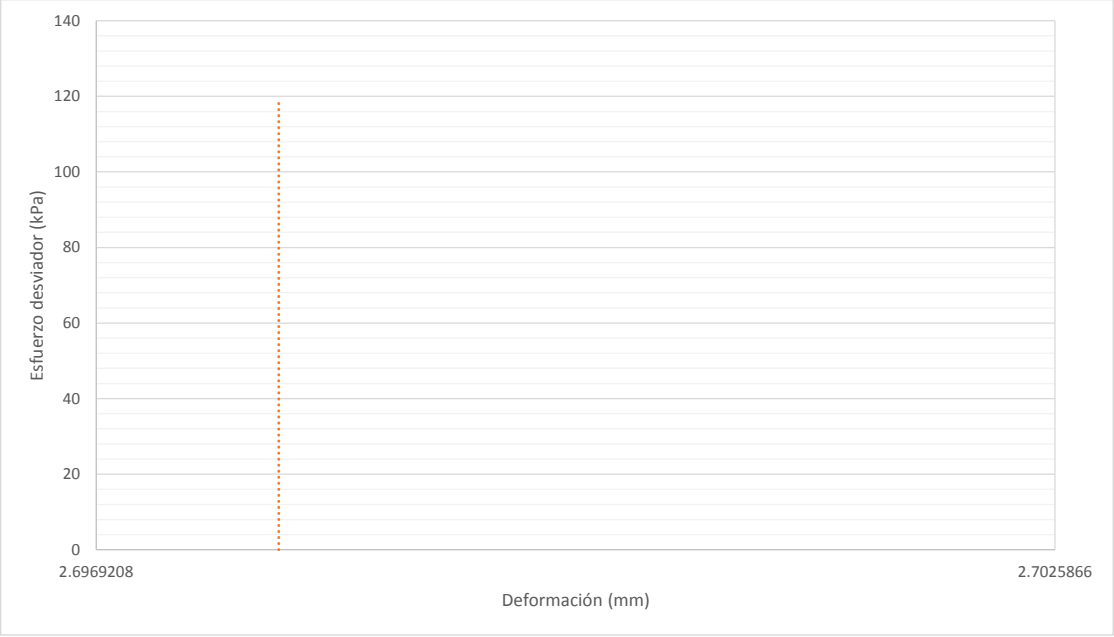
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.146
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

Humedad natural	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	108.78
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	277.98
Masa recipiente + muestra seca (g)	224.33
Contenido de humedad (%)	**46.4**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	2.96	0.14
0.020	0.500	4.19	0.20
0.030	0.750	4.80	0.23
0.039	1.000	5.26	0.26
0.049	1.250	5.56	0.27
0.059	1.500	5.71	0.28
0.079	2.000	6.02	0.29
0.098	2.500	6.32	0.31
0.118	3.000	6.47	0.32
0.138	3.500	6.77	0.33
0.157	4.000	6.93	0.34
0.177	4.500	7.08	0.35
0.197	5.000	7.23	0.35

Registro fotográfico

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

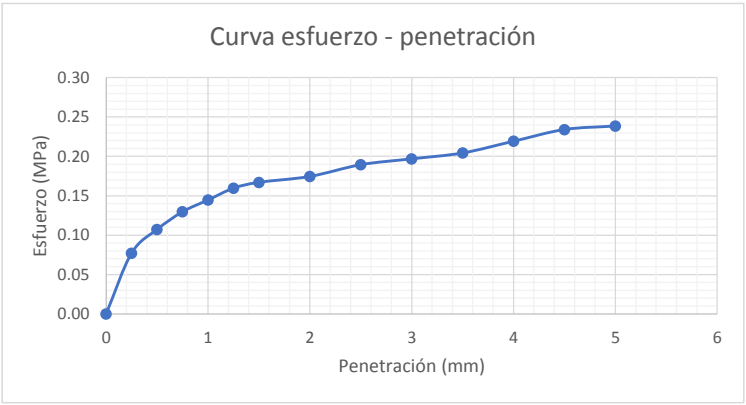
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	108.78
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	277.98
Masa recipiente + muestra seca (g)	224.33
Contenido de humedad (%)	46.43

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.58	0.08
0.020	0.500	2.20	0.11
0.030	0.750	2.66	0.13
0.039	1.000	2.96	0.14
0.049	1.250	3.27	0.16
0.059	1.500	3.42	0.17
0.079	2.000	3.58	0.17
0.098	2.500	3.88	0.19
0.118	3.000	4.04	0.20
0.138	3.500	4.19	0.20
0.157	4.000	4.49	0.22
0.177	4.500	4.80	0.23
0.197	5.000	4.89	0.24



Humedad final	
# recipiente	60
Masa recipiente (g)	123.17
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	295.97
Masa recipiente + muestra seca (g)	240.48
Contenido de humedad (%)	**47.30**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	123.2
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	167.34
Masa recipiente + suelo seco (g)	152.48
Contenido de humedad (%)	**50.8**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	171.7
Masa de la muestra parafinada (g)	176.3
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	75.7
Temperatura del agua (º)	16
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99895
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**95.76**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	171.7
Volumen de la muestra (cm^3)	95.76
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.79
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**17.59**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

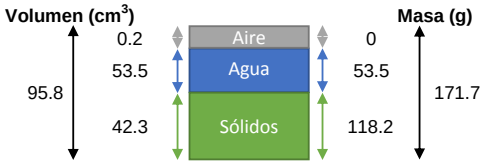
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.02
Temperatura de ensayo (ºC)	18
Densidad del agua (g/cm^3)	0.9986
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	642.10
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	673
Gravedad específica sin corregir	2.70
Factor de corrección	1.00039
Gravedad específica corregida	**2.71**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.27**
η (%)	**56.00**
S (%)	**99.60**

0.996275605

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

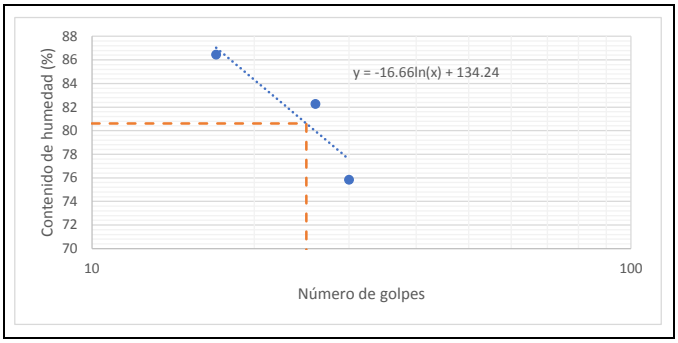
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	55	73	C5
Masa del recipiente (g)	12.042	10.825	6.791
No. Golpes	17	26	30
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	20.52	22.822	17.403
Masa recipiente + suelo seco (g)	16.589	17.407	12.826
Contenido de humedad (%)	86	82	76



LL (%)	**81**

2. Determinación límite plástico

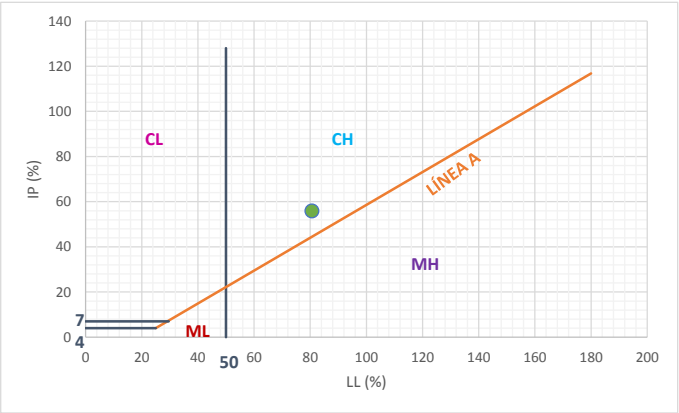
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	75	64
Masa del recipiente (g)	10.732	11.004
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	17.658	17.888
Masa recipiente + suelo seco (g)	16.294	16.519
Contenido de humedad (%)	25	25

LP (%)	**25**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**56**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**CH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

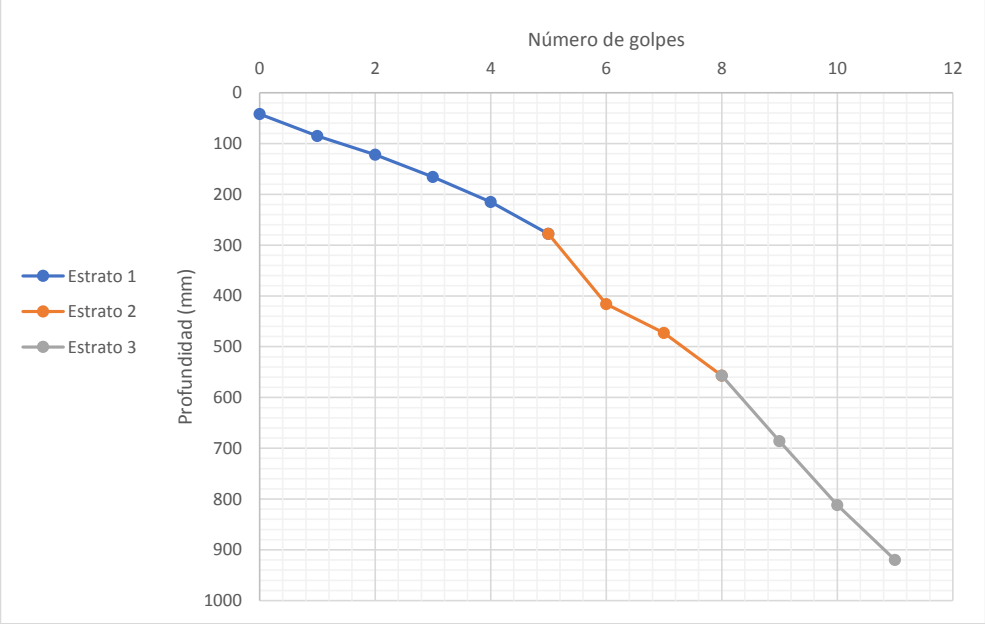
Procedencia:	Escuela Colombiana de Ingeniería
Fecha de exploración:	Julio 09 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	42	-	-	-	-
1	85	43	43	1	43
1	122	37	37	1	37
1	166	44	44	1	44
1	215	49	49	1	49
1	278	63	63	1	63
1	416	138	138	1	138
1	473	57	57	1	57
1	557	84	84	1	84
1	686	129	129	1	129
1	812	126	126	1	126
1	920	108	108	1	108

***El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestra**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	46	278
2	96	279
3	122	641



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe) **96**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

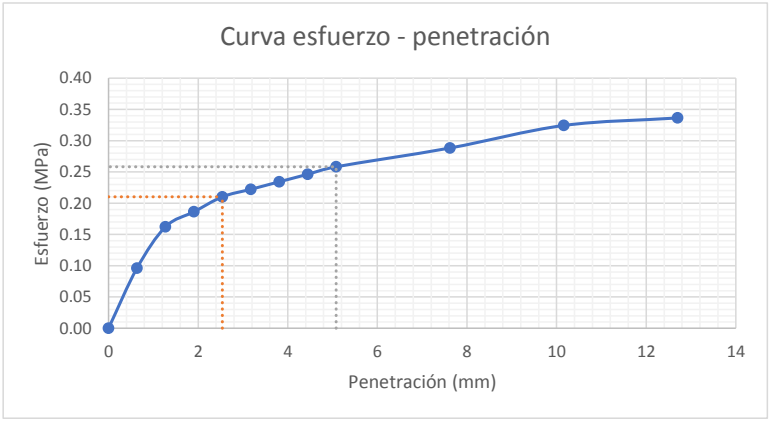
Humedad natural	
# recipiente	65 1
Masa recipiente (g)	17.59
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	37.97
Masa recipiente + muestra seca (g)	31.67
Contenido de humedad (%)	44.7

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	18.96	0.10
0.050	1.270	31.99	0.16
0.075	1.905	36.73	0.19
0.100	2.540	41.47	0.21
0.125	3.175	43.84	0.22
0.150	3.810	46.21	0.23
0.175	4.445	48.58	0.25
0.200	5.080	50.95	0.26
0.300	7.620	56.87	0.29
0.400	10.160	63.98	0.32
0.500	12.700	66.35	0.34

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.21
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.26
$CBR_{2,54}$ (%)	3.05
$CBR_{5,08}$ (%)	2.50
CBR sin imersión (%)	**3.05**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

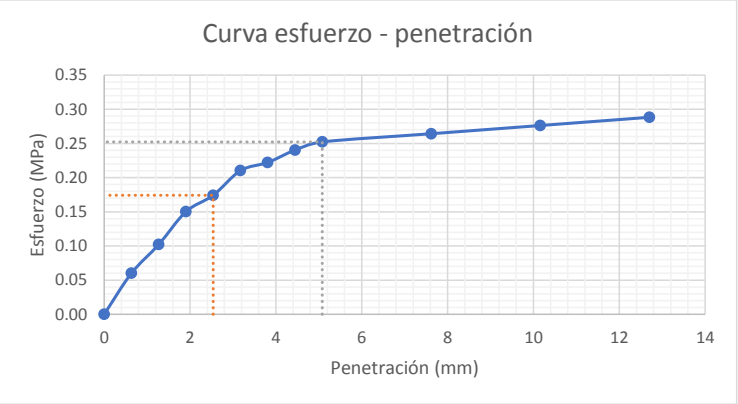
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	65 1
Masa recipiente (g)	17.59
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	37.97
Masa recipiente + muestra seca (g)	31.67
Contenido de humedad (%)	44.7

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		4.54	
Diámetro del pistón (mm)		49.64	
Área del pistón (mm^2)		1935.32	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	11.850	0.06
0.050	1.270	20.140	0.10
0.075	1.905	29.620	0.15
0.100	2.540	34.360	0.17
0.125	3.175	41.470	0.21
0.150	3.810	43.840	0.22
0.175	4.445	47.390	0.24
0.200	5.080	49.760	0.25
0.300	7.620	52.130	0.26
0.400	10.160	54.500	0.28
0.500	12.700	56.870	0.29



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.17
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.25
$CBR_{2,54}$ (%)	2.53
$CBR_{5,08}$ (%)	2.44
CBR con inmersión (%)	**2.53**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	11
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	40.59
Masa recipiente + muestra seca (g)	31.03
Contenido de humedad (%)	47.7

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	155.65	155.93	155.9	155.58	155.77
Diámetro (mm)	69.1	69.36	70.14	69.76	69.59

Área (mm^2)	3803.50
Volumen (cm^3)	592.45
Masa húmeda muestra (g)	1040.62
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.76

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	97	89	8	25.50	23.40	2.10	0.058	0.056	0.057	0.00037	63.94
1	41.4	12.4	41	38	3	10.78	9.99	0.79	0.029	0.027	0.028	0.00018	55.58
2	41.4	24.8	98	89	9	25.77	23.40	2.37	0.070	0.068	0.069	0.00044	52.82
3	41.4	37.3	152	139	13	39.96	36.55	3.42	0.116	0.113	0.115	0.00074	49.72
4	41.4	49.7	205	186	19	53.90	48.90	5.00	0.172	0.169	0.171	0.00109	44.68
5	41.4	62	241	216	25	63.36	56.79	6.57	0.214	0.210	0.212	0.00136	41.73
6	27.6	12.4	41	37	4	10.78	9.73	1.05	0.028	0.026	0.027	0.00017	56.12
7	27.6	24.8	110	101	9	28.92	26.55	2.37	0.093	0.090	0.092	0.00059	45.21
8	27.6	37.3	152	138	14	39.96	36.28	3.68	0.112	0.110	0.111	0.00071	50.91
9	27.6	49.7	205	186	19	53.90	48.90	5.00	0.171	0.168	0.170	0.00109	44.94
10	27.6	62	244	219	25	64.15	57.58	6.57	0.220	0.217	0.219	0.00140	41.05
11	13.8	12.4	44	42	2	11.57	11.04	0.53	0.027	0.026	0.027	0.00017	64.91
12	13.8	24.8	111	103	8	29.18	27.08	2.10	0.097	0.094	0.096	0.00061	44.17
13	13.8	37.3	177	163	14	46.54	42.86	3.68	0.178	0.175	0.177	0.00113	37.82
14	13.8	49.7	185	166	19	48.64	43.64	5.00	0.205	0.208	0.207	0.00133	32.92
15	13.8	62	265	241	24	69.67	63.36	6.31	0.266	0.264	0.265	0.00170	37.24

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	11
Masa recipiente (g)	106.02
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1146.64
Masa recipiente + muestra seca (g)	823.16
Masa del agua (g)	323.48
Masa material seco (g)	717.14
Masa material húmedo (g)	1040.62
Humedad (%)	45.11

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	11
Masa recipiente (g)	106.02
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1145.35
Masa recipiente + muestra seca (g)	823.16
Masa del agua (g)	322.19
Masa material seco (g)	717.14
Masa material húmedo (g)	1039.33
Humedad (%)	44.93

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

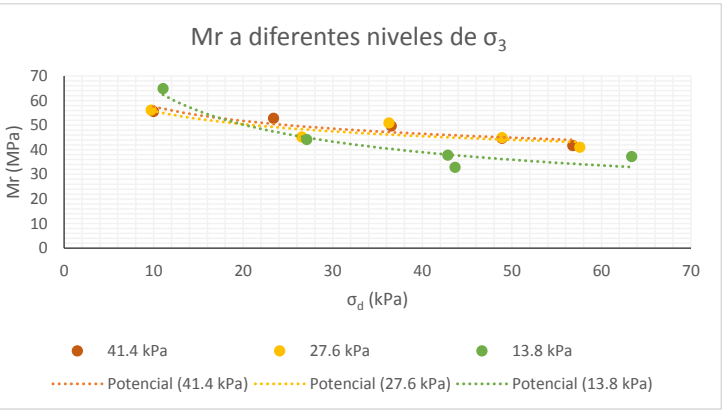
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

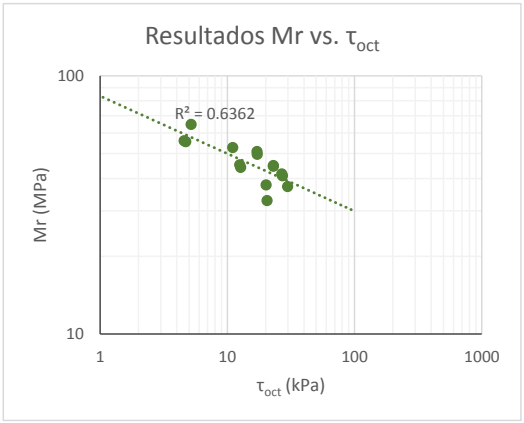
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

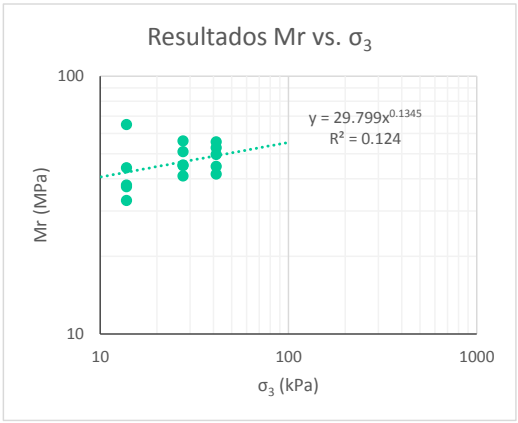
Ecuaciones

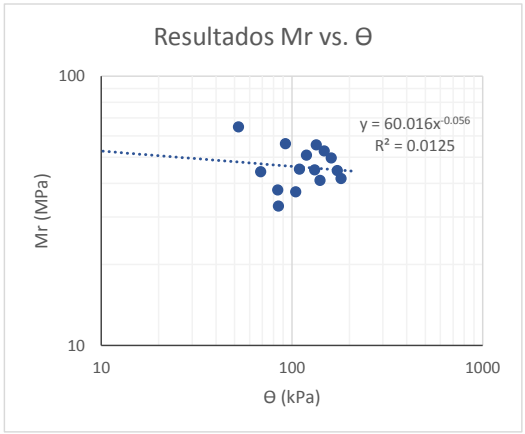
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

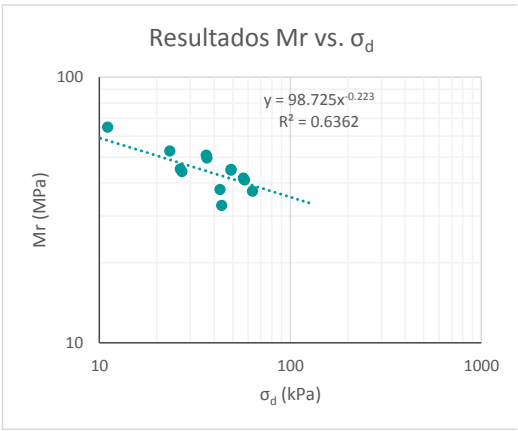
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	9.99	41.40	4.7097	134.191	55.6
2	23.40	41.40	11.0306	147.599	52.8
3	36.55	41.40	17.2276	160.745	49.7
4	48.90	41.40	23.0528	173.102	44.7
5	56.79	41.40	26.7710	180.990	41.7
6	9.73	27.60	4.5858	92.528	56.1
7	26.55	27.60	12.5179	109.354	45.2
8	36.28	27.60	17.1037	119.082	50.9
9	48.90	27.60	23.0528	131.702	44.9
10	57.58	27.60	27.1428	140.379	41.0
11	11.04	13.80	5.2055	52.442	64.9
12	27.08	13.80	12.7658	68.480	44.2
13	42.86	13.80	20.2022	84.255	37.8
14	43.64	13.80	20.5740	85.044	32.9
15	63.36	13.80	29.8695	104.763	37.2











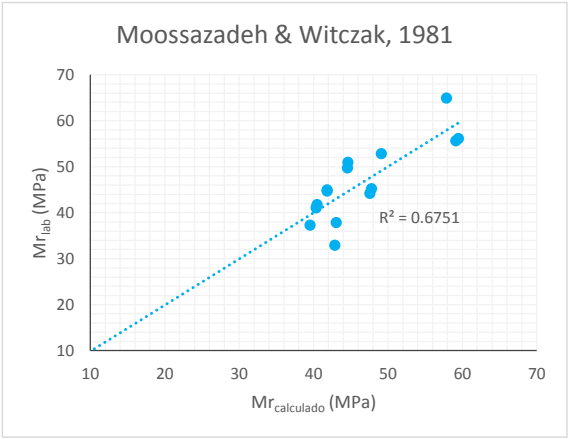
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

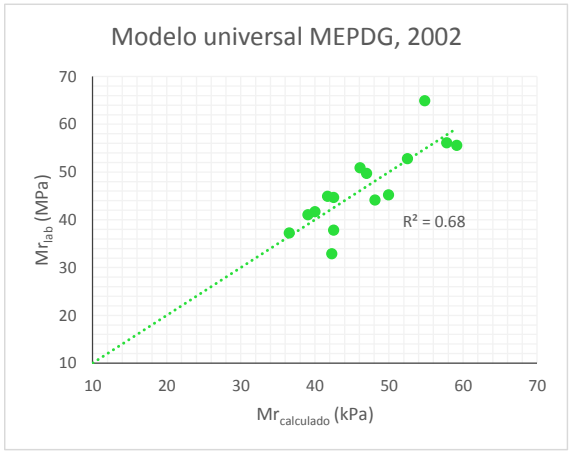
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	35.607			**k_1**	0.628	
		k_2	-0.218			**k_2**	0.070	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-2.195	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	55.6	59.130	-3.6	12.6	55.6	59.149	-3.6	12.7
2	52.8	49.104	3.7	13.8	52.8	52.482	0.3	0.1
3	49.7	44.550	5.2	26.7	49.7	46.961	2.8	7.6
4	44.7	41.805	2.9	8.2	44.7	42.514	2.2	4.7
5	41.7	40.463	1.3	1.6	41.7	39.992	1.7	3.0
6	56.1	59.475	-3.4	11.3	56.1	57.769	-1.6	2.7
7	45.2	47.767	-2.6	6.6	45.2	49.932	-4.7	22.3
8	50.9	44.620	6.3	39.6	50.9	46.085	4.8	23.3
9	44.9	41.805	3.1	9.8	44.9	41.704	3.2	10.5
10	41.0	40.341	0.7	0.5	41.0	39.035	2.0	4.0
11	64.9	57.852	7.1	49.8	64.9	54.804	10.1	102.1
12	44.2	47.563	-3.4	11.5	44.2	48.085	-3.9	15.3
13	37.8	43.027	-5.2	27.1	37.8	42.511	-4.7	22.0
14	32.9	42.856	-9.9	98.7	32.9	42.256	-9.3	87.1
15	37.2	39.507	-2.3	5.1	37.2	36.525	0.7	0.5
			Σ	322.9			**Σ**	318.1





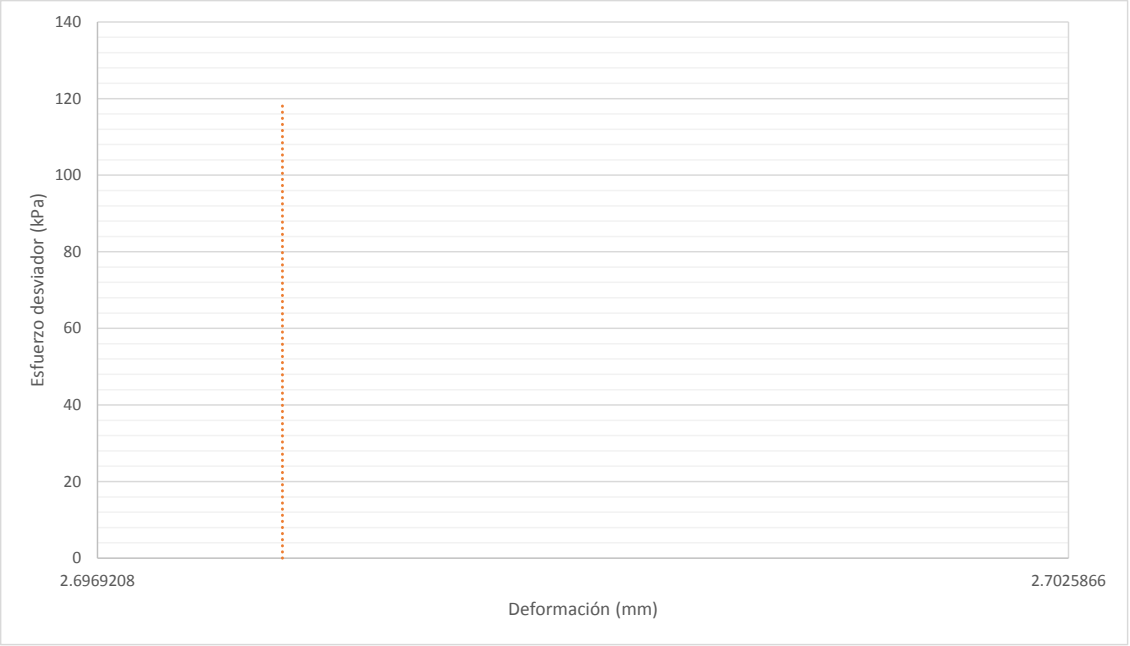
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.156
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

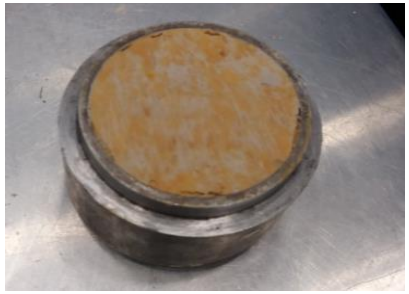
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	101.23
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	275.32
Masa recipiente + muestra seca (g)	223.62
Contenido de humedad (%)	**42.2**

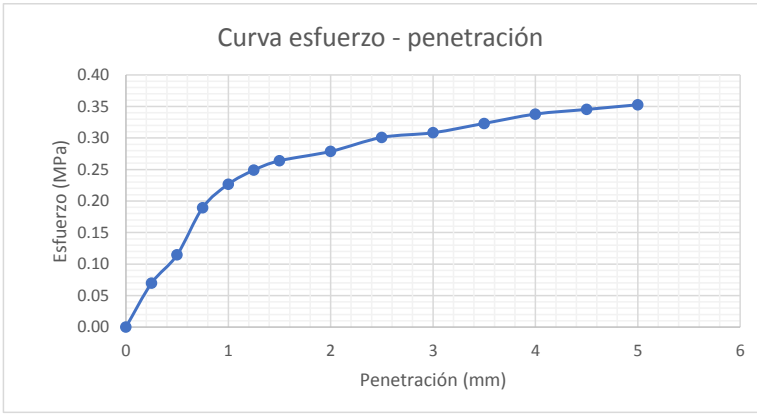
Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.43	0.07
0.020	0.500	2.35	0.11
0.030	0.750	3.88	0.19
0.039	1.000	4.65	0.23
0.049	1.250	5.10	0.25
0.059	1.500	5.41	0.26
0.079	2.000	5.71	0.28
0.098	2.500	6.17	0.30
0.118	3.000	6.32	0.31
0.138	3.500	6.62	0.32
0.157	4.000	6.93	0.34
0.177	4.500	7.08	0.35
0.197	5.000	7.23	0.35

Registro fotográfico





ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

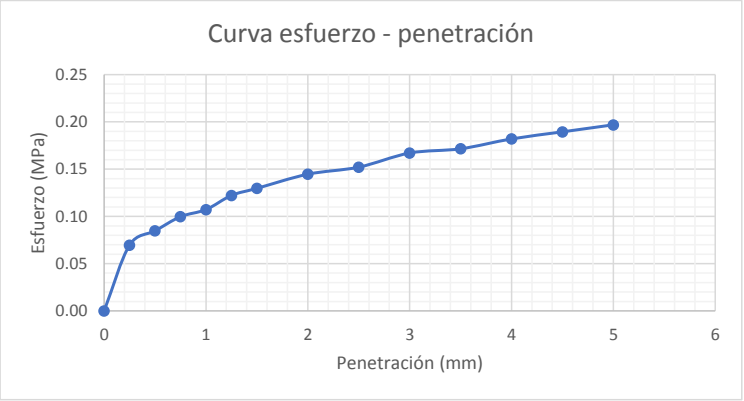
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 16 y 17 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	101.23
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	275.32
Masa recipiente + muestra seca (g)	223.62
Contenido de humedad (%)	42.24

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.43	0.07
0.020	0.500	1.74	0.08
0.030	0.750	2.04	0.10
0.039	1.000	2.20	0.11
0.049	1.250	2.50	0.12
0.059	1.500	2.66	0.13
0.079	2.000	2.96	0.14
0.098	2.500	3.12	0.15
0.118	3.000	3.42	0.17
0.138	3.500	3.52	0.17
0.157	4.000	3.73	0.18
0.177	4.500	3.88	0.19
0.197	5.000	4.04	0.20



Humedad final	
# recipiente	7
Masa recipiente (g)	113.27
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	289.76
Masa recipiente + muestra seca (g)	232.89
Contenido de humedad (%)	**47.54**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	113.36
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	204.05
Masa recipiente + suelo seco (g)	175.84
Contenido de humedad (%)	**45.2**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	139.3
Masa de la muestra parafinada (g)	152
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	58.2
Temperatura del agua (º)	15.4
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99904
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**80.23**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	139.3
Volumen de la muestra (cm^3)	80.23
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.74
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**17.03**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

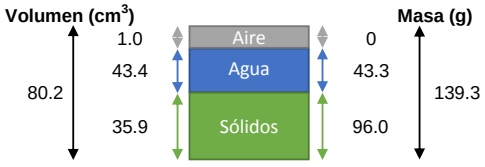
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	**143.24**	**641.99**			**499.56**
Desv.	**0.00**	**0.34**			**0.02**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.76
Temperatura de ensayo (ºC)	17.8
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99863
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	642.12
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	673.3
Gravedad específica sin corregir	2.68
Factor de corrección	1.00043
Gravedad específica corregida	**2.68**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.24**
η (%)	**55.32**
S (%)	**97.72**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

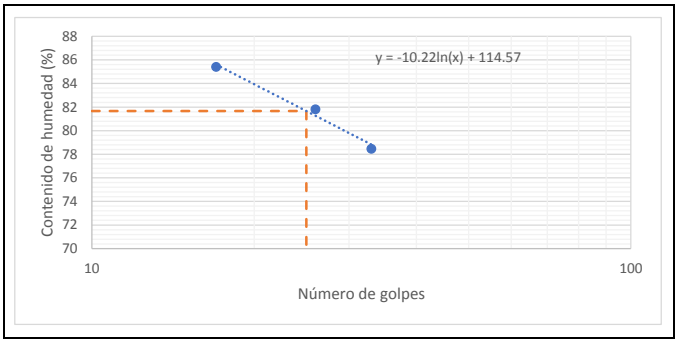
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	64	75	73
Masa del recipiente (g)	11.001	10.727	10.856
No. Golpes	17	26	33
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	18.701	18.047	19.644
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.154	14.753	15.78
Contenido de humedad (%)	85	82	78



LL (%)	**82**

2. Determinación límite plástico

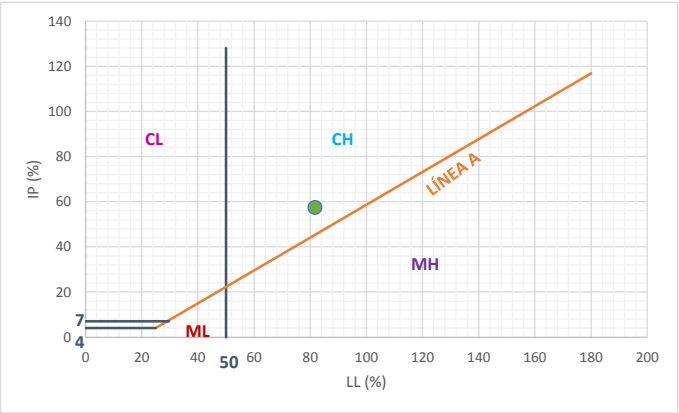
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	C5	55
Masa del recipiente (g)	6.821	12.07
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	13.399	19.3
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.117	17.89
Contenido de humedad (%)	24	24

LP (%)	**24**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**57**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**CH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

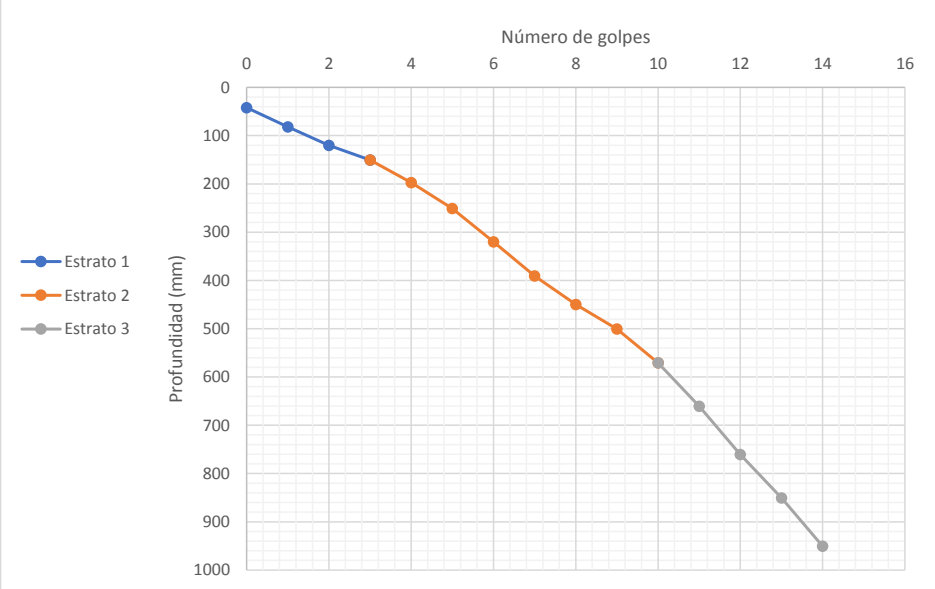
Procedencia:	Escuela Colombiana de Ingeniería
Fecha de exploración:	Julio 09 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	42	-	-	-	-
1	82	40	40	1	40
1	120	38	38	1	38
1	150.5	30.5	31	1	31
1	197	46.5	47	1	47
1	251	54	54	1	54
1	320	69	69	1	69
1	390.5	70.5	71	1	71
1	450	59.5	60	1	60
1	500.5	50.5	51	1	51
1	570.7	70.2	70	1	70
1	660.6	89.9	90	1	90
1	760.7	100.1	100	1	100
1	850.5	89.8	90	1	90
1	950.5	100	100	1	100

***El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestra**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	39	151
2	61	420
3	95	530



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe) **61**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

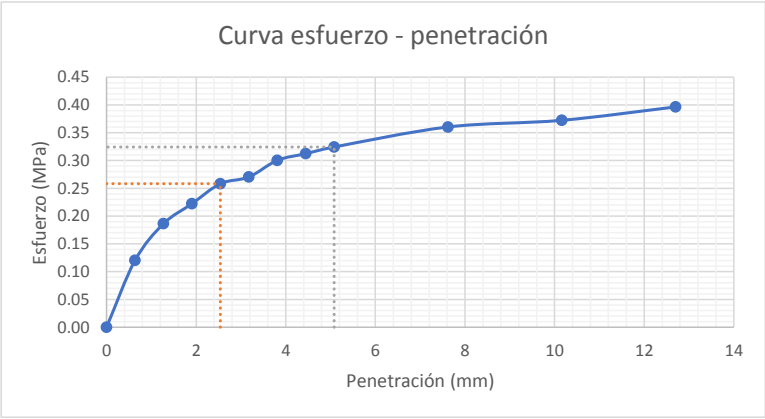
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	14.56
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	36.08
Masa recipiente + muestra seca (g)	29.52
Contenido de humedad (%)	43.9

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	23.70	0.12
0.050	1.270	36.73	0.19
0.075	1.905	43.84	0.22
0.100	2.540	50.95	0.26
0.125	3.175	53.32	0.27
0.150	3.810	59.24	0.30
0.175	4.445	61.61	0.31
0.200	5.080	63.98	0.32
0.300	7.620	71.09	0.36
0.400	10.160	73.46	0.37
0.500	12.700	78.20	0.40

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.26
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.32
$CBR_{2,54}$ (%)	3.75
$CBR_{5,08}$ (%)	3.14
CBR sin imersión (%)	**3.75**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

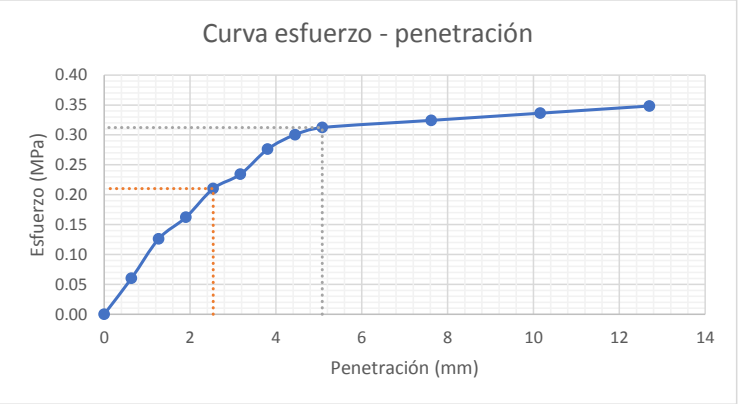
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	14.56
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	36.08
Masa recipiente + muestra seca (g)	29.52
Contenido de humedad (%)	43.9

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		4.54	
Diámetro del pistón (mm)		49.64	
Área del pistón (mm^2)		1935.32	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	11.850	0.06
0.050	1.270	24.880	0.13
0.075	1.905	31.990	0.16
0.100	2.540	41.470	0.21
0.125	3.175	46.210	0.23
0.150	3.810	54.500	0.28
0.175	4.445	59.240	0.30
0.200	5.080	61.610	0.31
0.300	7.620	63.980	0.32
0.400	10.160	66.350	0.34
0.500	12.700	68.720	0.35



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.21
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.31
$CBR_{2,54}$ (%)	3.05
$CBR_{5,08}$ (%)	3.02
CBR con inmersión (%)	**3.05**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	7.24
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	32.74
Masa recipiente + muestra seca (g)	24.75
Contenido de humedad (%)	45.6

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	159.12	159.09	159.63	159.94	159.45
Diámetro (mm)	69.91	70.41	71.65	70.84	70.70

Área (mm^2)	3926.08
Volumen (cm^3)	625.99
Masa húmeda muestra (g)	1079.97
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.73

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	111	101	10	28.27	25.73	2.55	0.095	0.095	0.095	0.00060	43.18
1	41.4	12.4	54	51	3	13.75	12.99	0.76	0.045	0.044	0.045	0.00028	46.54
2	41.4	24.8	104	94	10	26.49	23.94	2.55	0.089	0.088	0.089	0.00056	43.14
3	41.4	37.3	152	138	14	38.72	35.15	3.57	0.156	0.155	0.156	0.00098	36.04
4	41.4	49.7	248	228	20	63.17	58.07	5.09	0.206	0.207	0.207	0.00130	44.84
5	41.4	62	282	257	25	71.83	65.46	6.37	0.264	0.264	0.264	0.00166	39.53
6	27.6	12.4	53	50	3	13.50	12.74	0.76	0.038	0.038	0.038	0.00024	53.44
7	27.6	24.8	114	105	9	29.04	26.74	2.29	0.091	0.091	0.091	0.00057	46.86
8	27.6	37.3	140	125	15	35.66	31.84	3.82	0.143	0.142	0.143	0.00089	35.62
9	27.6	49.7	221	202	19	56.29	51.45	4.84	0.241	0.240	0.241	0.00151	34.11
10	27.6	62	263	238	25	66.99	60.62	6.37	0.250	0.251	0.251	0.00157	38.59
11	13.8	12.4	28	25	3	7.13	6.37	0.76	0.020	0.020	0.020	0.00013	50.76
12	13.8	24.8	112	102	10	28.53	25.98	2.55	0.083	0.083	0.083	0.00052	49.91
13	13.8	37.3	162	148	14	41.26	37.70	3.57	0.144	0.143	0.144	0.00090	41.89
14	13.8	49.7	195	175	20	49.67	44.57	5.09	0.207	0.209	0.208	0.00130	34.17
15	13.8	62	291	267	24	74.12	68.01	6.11	0.296	0.295	0.296	0.00185	36.69

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	112.72
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1192.69
Masa recipiente + muestra seca (g)	876.05
Masa del agua (g)	316.64
Masa material seco (g)	763.33
Masa material húmedo (g)	1079.97
Humedad (%)	41.48

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	112.72
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1191.84
Masa recipiente + muestra seca (g)	876.05
Masa del agua (g)	315.79
Masa material seco (g)	763.33
Masa material húmedo (g)	1079.12
Humedad (%)	41.37

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

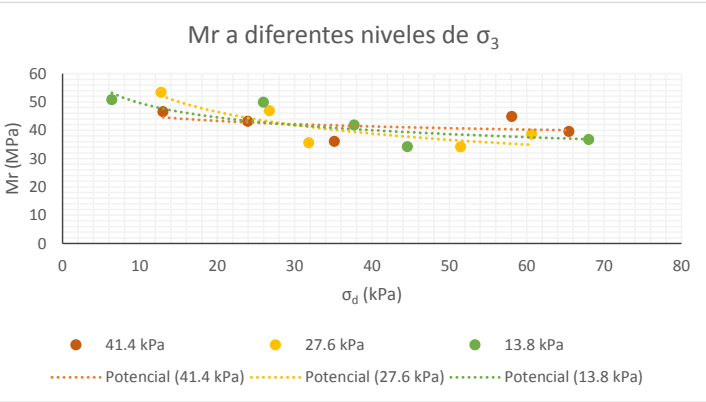
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

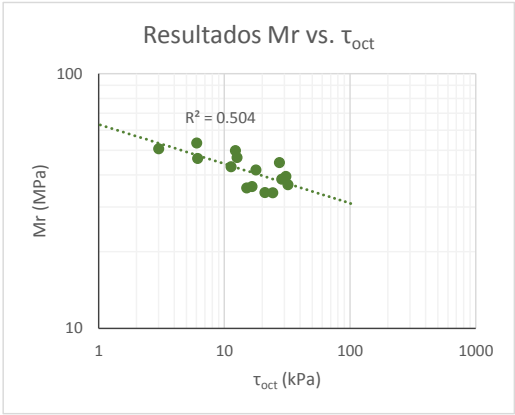
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

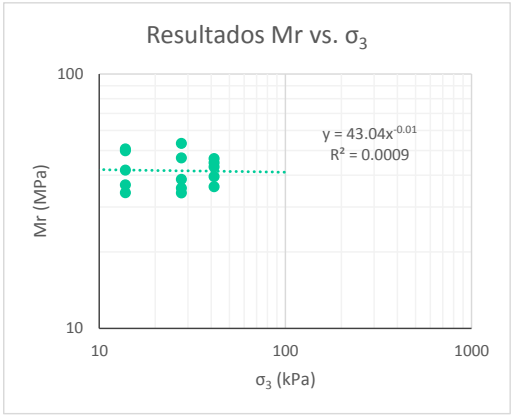
Ecuaciones

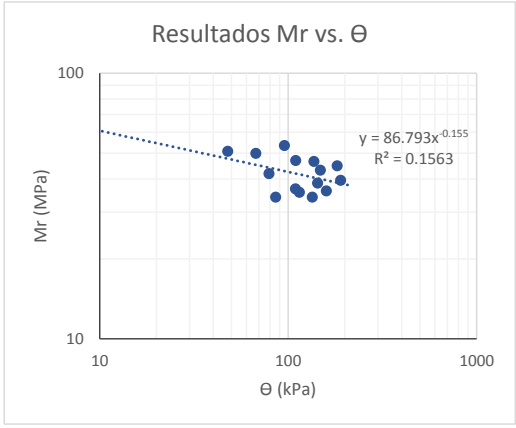
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

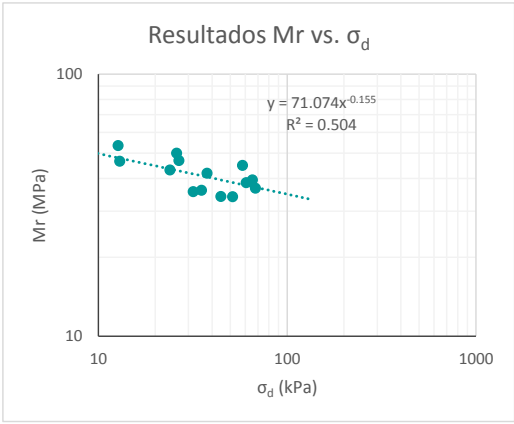
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	12.99	41.40	6.1236	137.190	46.5
2	23.94	41.40	11.2866	148.142	43.1
3	35.15	41.40	16.5697	159.350	36.0
4	58.07	41.40	27.3759	182.273	44.8
5	65.46	41.40	30.8580	189.660	39.5
6	12.74	27.60	6.0035	95.535	53.4
7	26.74	27.60	12.6073	109.544	46.9
8	31.84	27.60	15.0087	114.638	35.6
9	51.45	27.60	24.2541	134.251	34.1
10	60.62	27.60	28.5766	143.420	38.6
11	6.37	13.80	3.0017	47.768	50.8
12	25.98	13.80	12.2471	67.380	49.9
13	37.70	13.80	17.7704	79.097	41.9
14	44.57	13.80	21.0122	85.974	34.2
15	68.01	13.80	32.0587	109.407	36.7











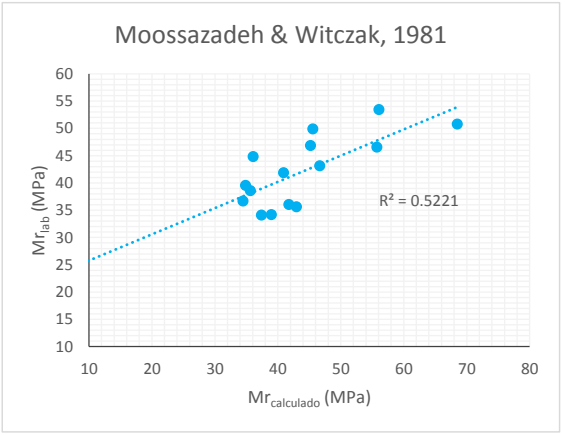
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

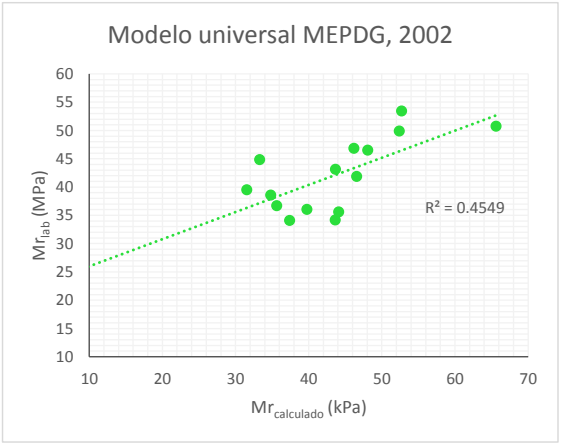
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	30.644			**k_1**	0.559	
		k_2	-0.290			**k_2**	-0.249	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.654	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	46.5	55.711	-9.2	84.0	46.5	48.058	-1.5	2.3
2	43.1	46.657	-3.5	12.4	43.1	43.647	-0.5	0.3
3	36.0	41.740	-5.7	32.5	36.0	39.749	-3.7	13.7
4	44.8	36.083	8.8	76.7	44.8	33.276	11.6	133.7
5	39.5	34.852	4.7	21.9	39.5	31.533	8.0	64.0
6	53.4	56.032	-2.6	6.7	53.4	52.687	0.7	0.6
7	46.9	45.183	1.7	2.8	46.9	46.160	0.7	0.5
8	35.6	42.955	-7.3	53.7	35.6	44.102	-8.5	71.9
9	34.1	37.373	-3.3	10.6	34.1	37.390	-3.3	10.8
10	38.6	35.637	2.9	8.7	38.6	34.788	3.8	14.4
11	50.8	68.509	-17.7	314.8	50.8	65.601	-14.8	220.1
12	49.9	45.565	4.3	18.9	49.9	52.371	-2.5	6.1
13	41.9	40.901	1.0	1.0	41.9	46.541	-4.7	21.7
14	34.2	38.961	-4.8	23.0	34.2	43.615	-9.4	89.2
15	36.7	34.468	2.2	5.0	36.7	35.628	1.1	1.1
			Σ	672.8			**Σ**	650.4





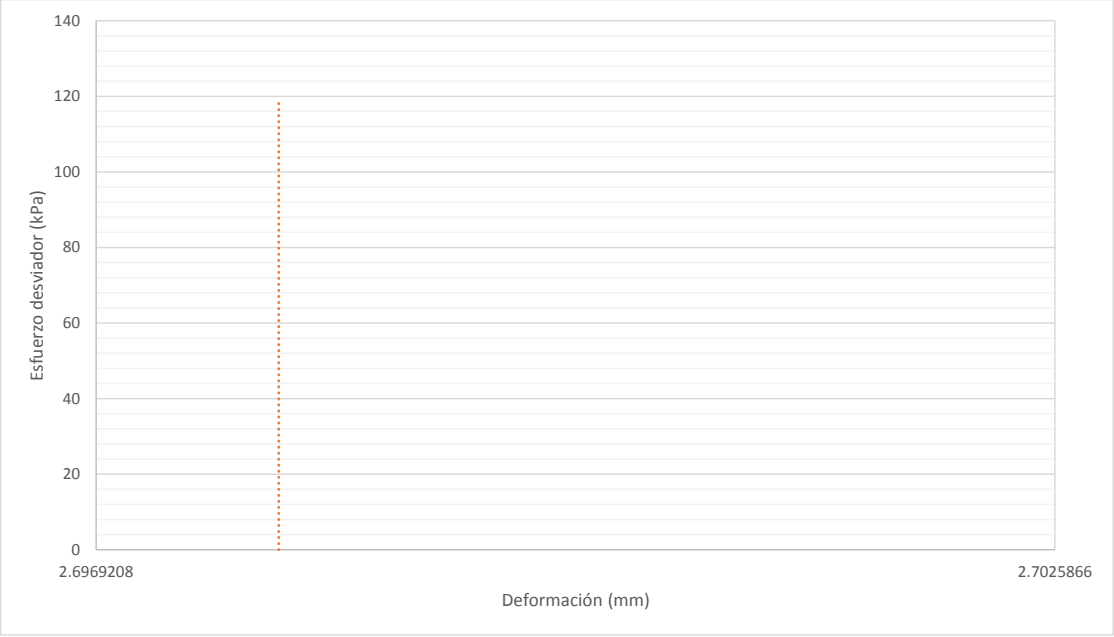
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.159
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

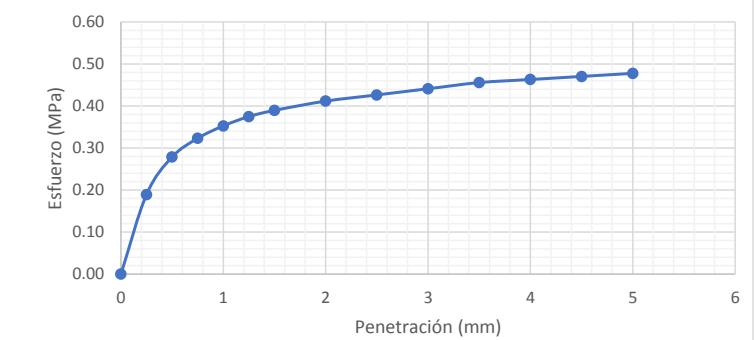
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.67
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	284.84
Masa recipiente + muestra seca (g)	232.58
Contenido de humedad (%)	**44.7**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	3.88	0.19
0.020	0.500	5.71	0.28
0.030	0.750	6.62	0.32
0.039	1.000	7.23	0.35
0.049	1.250	7.68	0.37
0.059	1.500	7.98	0.39
0.079	2.000	8.44	0.41
0.098	2.500	8.74	0.43
0.118	3.000	9.04	0.44
0.138	3.500	9.34	0.46
0.157	4.000	9.49	0.46
0.177	4.500	9.64	0.47
0.197	5.000	9.79	0.48

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

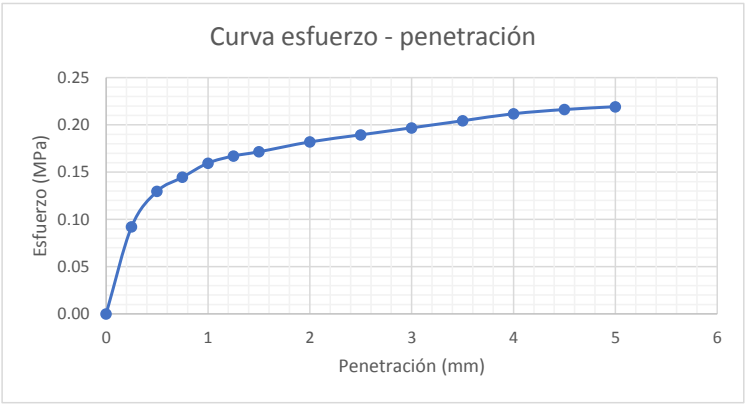
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.67
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	284.84
Masa recipiente + muestra seca (g)	232.58
Contenido de humedad (%)	44.70

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.89	0.09
0.020	0.500	2.66	0.13
0.030	0.750	2.96	0.14
0.039	1.000	3.27	0.16
0.049	1.250	3.42	0.17
0.059	1.500	3.52	0.17
0.079	2.000	3.73	0.18
0.098	2.500	3.88	0.19
0.118	3.000	4.04	0.20
0.138	3.500	4.19	0.20
0.157	4.000	4.34	0.21
0.177	4.500	4.43	0.22
0.197	5.000	4.49	0.22



Humedad final	
# recipiente	7
Masa recipiente (g)	113.27
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	289.76
Masa recipiente + muestra seca (g)	232.89
Contenido de humedad (%)	**47.54**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	123.25
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	272.4
Masa recipiente + suelo seco (g)	227.93
Contenido de humedad (%)	**42.5**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	244.5
Masa de la muestra parafinada (g)	260.4
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	104.6
Temperatura del agua (º)	15.6
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99901
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**138.86**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	244.5
Volumen de la muestra (cm^3)	138.86
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.76
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**17.27**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

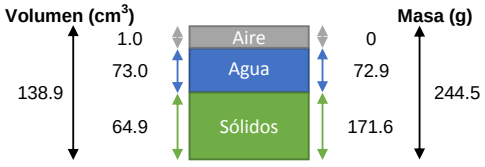
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	147.42	645.77	23.8	0.99735	499.67
2	147.41	646.47	16.5	0.99886	499.63
3	147.41	646.45	16.4	0.99888	499.60
4	147.41	646.49	16.4	0.99888	499.64
5	147.42	646.47	16.8	0.99881	499.64
Prom	**147.41**	**646.33**			**499.64**
Desv.	**0.01**	**0.31**			**0.03**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	51.61
Temperatura de ensayo (ºC)	17.5
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99869
Masa picnómetro vacío (g)	147.41
Volumen picnómetro (cm^3)	499.64
Masa picnómetro con agua (g)	646.40
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	678.5
Gravedad específica sin corregir	2.65
Factor de corrección	1.00048
Gravedad específica corregida	**2.65**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.14**
η (%)	**53.27**
S (%)	**98.66**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

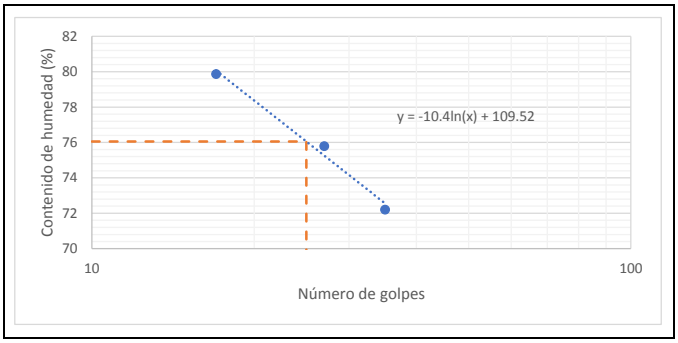
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	75	73	C5
Masa del recipiente (g)	10.756	10.872	6.815
No. Golpes	17	27	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	17.181	20.036	14.134
Masa recipiente + suelo seco (g)	14.328	16.085	11.065
Contenido de humedad (%)	80	76	72



LL (%)	**76**

2. Determinación límite plástico

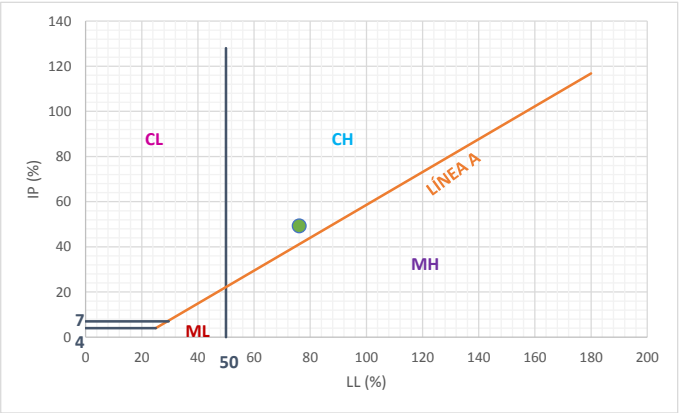
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	64	55
Masa del recipiente (g)	11.014	12.066
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	18.43	20.133
Masa recipiente + suelo seco (g)	16.864	18.428
Contenido de humedad (%)	27	27

LP (%)	**27**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**49**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**CH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

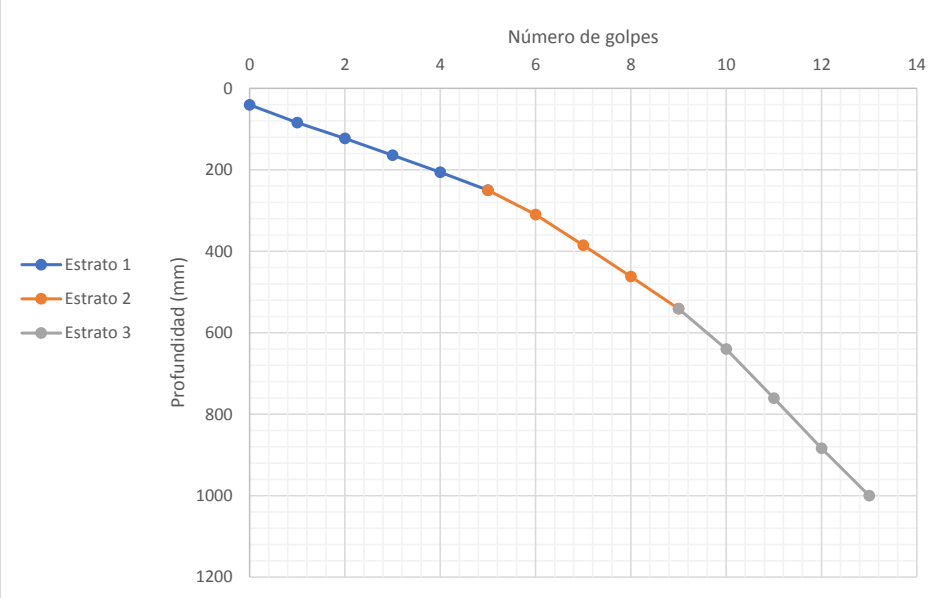
Procedencia:	Escuela Colombiana de Ingeniería
Fecha de exploración:	Julio 09 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	40.5	-	-	-	-
1	84	43.5	44	1	44
1	123	39	39	1	39
1	164	41	41	1	41
1	206	42	42	1	42
1	250	44	44	1	44
1	310	60	60	1	60
1	385	75	75	1	75
1	462	77	77	1	77
1	541	79	79	1	79
1	640	99	99	1	99
1	761	121	121	1	121
1	884	123	123	1	123
1	1000	116	116	1	116

***El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestra**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	41	250
2	73	291
3	120	709



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe) **73**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

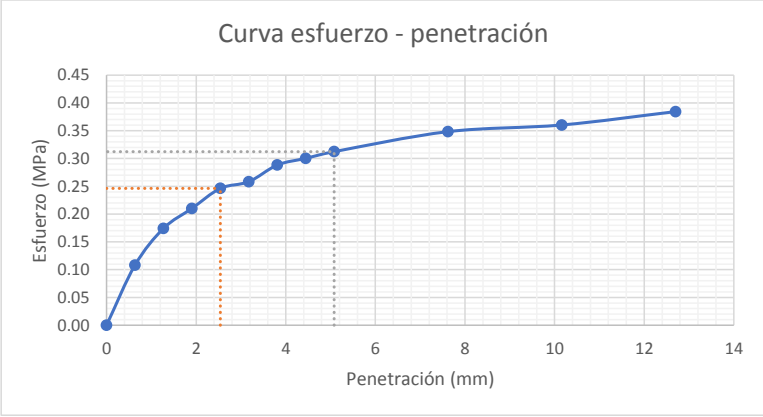
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	16.53
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	52.5
Masa recipiente + muestra seca (g)	41.42
Contenido de humedad (%)	44.5

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	21.33	0.11
0.050	1.270	34.36	0.17
0.075	1.905	41.47	0.21
0.100	2.540	48.58	0.25
0.125	3.175	50.95	0.26
0.150	3.810	56.87	0.29
0.175	4.445	59.24	0.30
0.200	5.080	61.61	0.31
0.300	7.620	68.72	0.35
0.400	10.160	71.09	0.36
0.500	12.700	75.83	0.38

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.25
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.31
$CBR_{2,54}$ (%)	3.57
$CBR_{5,08}$ (%)	3.02
CBR sin imersión (%)	**3.57**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

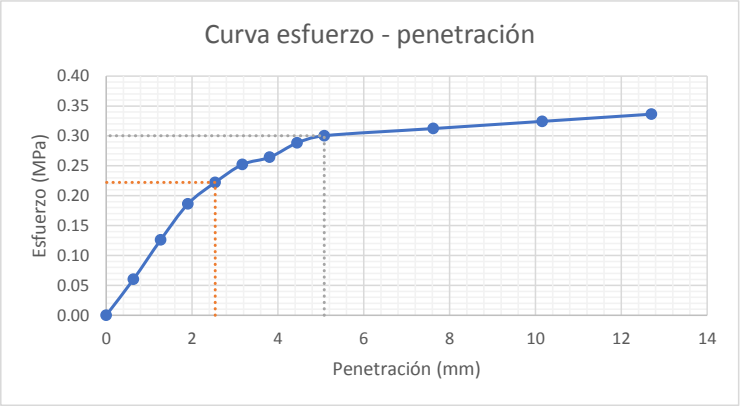
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	16.53
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	52.5
Masa recipiente + muestra seca (g)	41.42
Contenido de humedad (%)	44.5

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	11.850	0.06
0.050	1.270	24.880	0.13
0.075	1.905	36.730	0.19
0.100	2.540	43.840	0.22
0.125	3.175	49.766	0.25
0.150	3.810	52.130	0.26
0.175	4.445	56.870	0.29
0.200	5.080	59.240	0.30
0.300	7.620	61.610	0.31
0.400	10.160	63.980	0.32
0.500	12.700	66.350	0.34



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.22
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.30
$CBR_{2,54}$ (%)	3.23
$CBR_{5,08}$ (%)	2.90
CBR con inmersión (%)	**3.23**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	10.66
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	79
Masa recipiente + muestra seca (g)	57.45
Contenido de humedad (%)	46.1

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	152.78	152.03	152.08	152.41	152.33
Diámetro (mm)	70.72	70.48	69.83	69.49	70.13

Área (mm^2)	3862.76
Volumen (cm^3)	588.39
Masa húmeda muestra (g)	1026.47
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.74

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	116	107	9	30.03	27.70	2.33	0.093	0.095	0.094	0.00062	44.89
1	41.4	12.4	51	48	3	13.20	12.43	0.78	0.032	0.035	0.034	0.00022	56.50
2	41.4	24.8	104	96	8	26.92	24.85	2.07	0.091	0.078	0.081	0.00053	46.74
3	41.4	37.3	163	150	13	42.20	38.83	3.37	0.144	0.145	0.145	0.00095	40.94
4	41.4	49.7	184	165	19	47.63	42.72	4.92	0.175	0.177	0.176	0.00116	36.97
5	41.4	62	285	260	25	73.78	67.31	6.47	0.252	0.251	0.252	0.00165	40.77
6	27.6	12.4	51	47	4	13.20	12.17	1.04	0.041	0.043	0.042	0.00028	44.13
7	27.6	24.8	113	105	8	29.25	27.18	2.07	0.108	0.109	0.109	0.00071	38.16
8	27.6	37.3	165	151	14	42.72	39.09	3.62	0.138	0.140	0.139	0.00091	42.84
9	27.6	49.7	212	193	19	54.88	49.96	4.92	0.190	0.191	0.191	0.00125	39.95
10	27.6	62	248	223	25	64.20	57.73	6.47	0.219	0.220	0.220	0.00144	40.06
11	13.8	12.4	46	44	2	11.91	11.39	0.52	0.030	0.030	0.030	0.00020	57.84
12	13.8	24.8	95	85	10	24.59	22.00	2.59	0.070	0.070	0.070	0.00046	47.88
13	13.8	37.3	140	126	14	36.24	32.62	3.62	0.132	0.133	0.133	0.00087	37.50
14	13.8	49.7	205	185	20	53.07	47.89	5.18	0.201	0.201	0.201	0.00132	36.30
15	13.8	62	288	264	24	74.56	68.34	6.21	0.271	0.270	0.271	0.00178	38.49

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	1
Masa recipiente (g)	115.66
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1142.13
Masa recipiente + muestra seca (g)	820.98
Masa del agua (g)	321.15
Masa material seco (g)	705.32
Masa material húmedo (g)	1026.47
Humedad (%)	45.53

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	1
Masa recipiente (g)	115.66
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1139.86
Masa recipiente + muestra seca (g)	820.98
Masa del agua (g)	318.88
Masa material seco (g)	705.32
Masa material húmedo (g)	1024.2
Humedad (%)	45.21

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

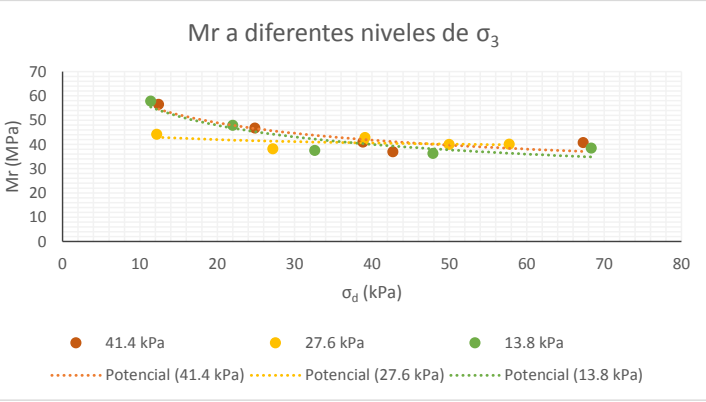
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

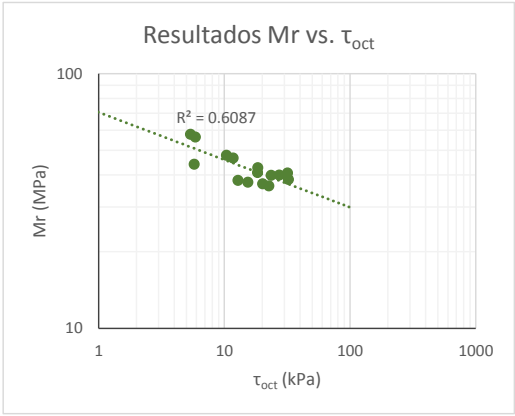
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

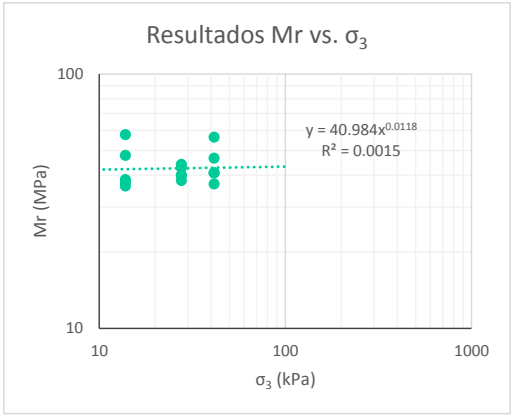
Ecuaciones

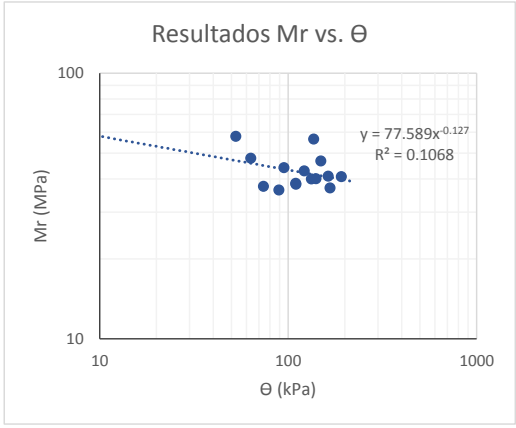
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

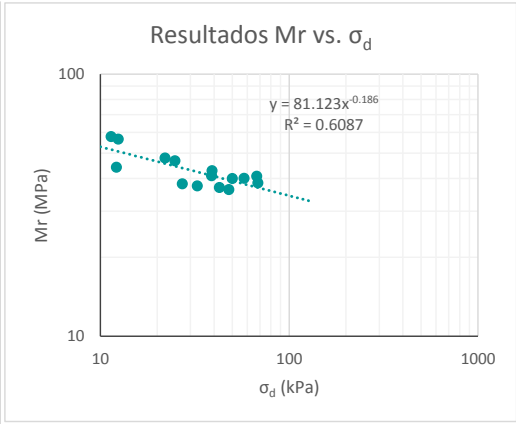
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	12.43	41.40	5.8578	136.626	56.5
2	24.85	41.40	11.7157	149.053	46.7
3	38.83	41.40	18.3057	163.032	40.9
4	42.72	41.40	20.1363	166.916	37.0
5	67.31	41.40	31.7300	191.509	40.8
6	12.17	27.60	5.7358	94.967	44.1
7	27.18	27.60	12.8140	109.983	38.2
8	39.09	27.60	18.4278	121.891	42.8
9	49.96	27.60	23.5534	132.764	40.0
10	57.73	27.60	27.2145	140.531	40.1
11	11.39	13.80	5.3697	52.791	57.8
12	22.00	13.80	10.3733	63.405	47.9
13	32.62	13.80	15.3768	74.019	37.5
14	47.89	13.80	22.5771	89.293	36.3
15	68.34	13.80	32.2181	109.745	38.5











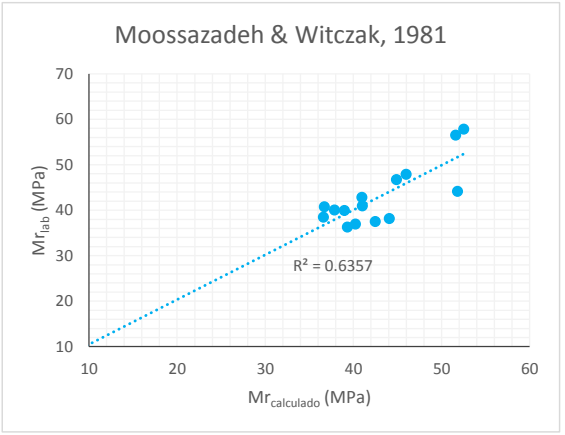
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

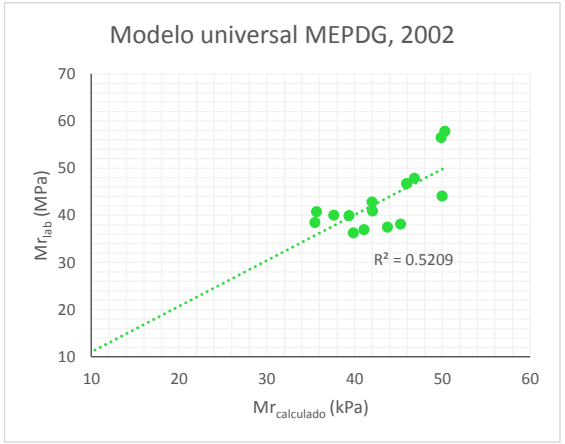
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	33.753			**k_1**	0.533	
		k_2	-0.202			**k_2**	-0.001	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.559	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	56.5	51.595	4.9	24.1	56.5	49.857	6.6	44.2
2	46.7	44.867	1.9	3.5	46.7	45.907	0.8	0.7
3	40.9	41.007	-0.1	0.0	40.9	42.044	-1.1	1.2
4	37.0	40.226	-3.3	10.6	37.0	41.065	-4.1	16.8
5	40.8	36.703	4.1	16.5	40.8	35.646	5.1	26.2
6	44.1	51.814	-7.7	59.1	44.1	49.967	-5.8	34.1
7	38.2	44.064	-5.9	34.8	38.2	45.241	-7.1	50.1
8	42.8	40.952	1.9	3.6	42.8	41.992	0.8	0.7
9	40.0	38.975	1.0	1.0	40.0	39.347	0.6	0.4
10	40.1	37.856	2.2	4.9	40.1	37.621	2.4	6.0
11	57.8	52.508	5.3	28.4	57.8	50.268	7.6	57.3
12	47.9	45.981	1.9	3.6	47.9	46.813	1.1	1.1
13	37.5	42.473	-5.0	24.7	37.5	43.732	-6.2	38.8
14	36.3	39.309	-3.0	9.1	36.3	39.848	-3.6	12.6
15	38.5	36.590	1.9	3.6	38.5	35.468	3.0	9.1
			Σ	227.4			**Σ**	299.3





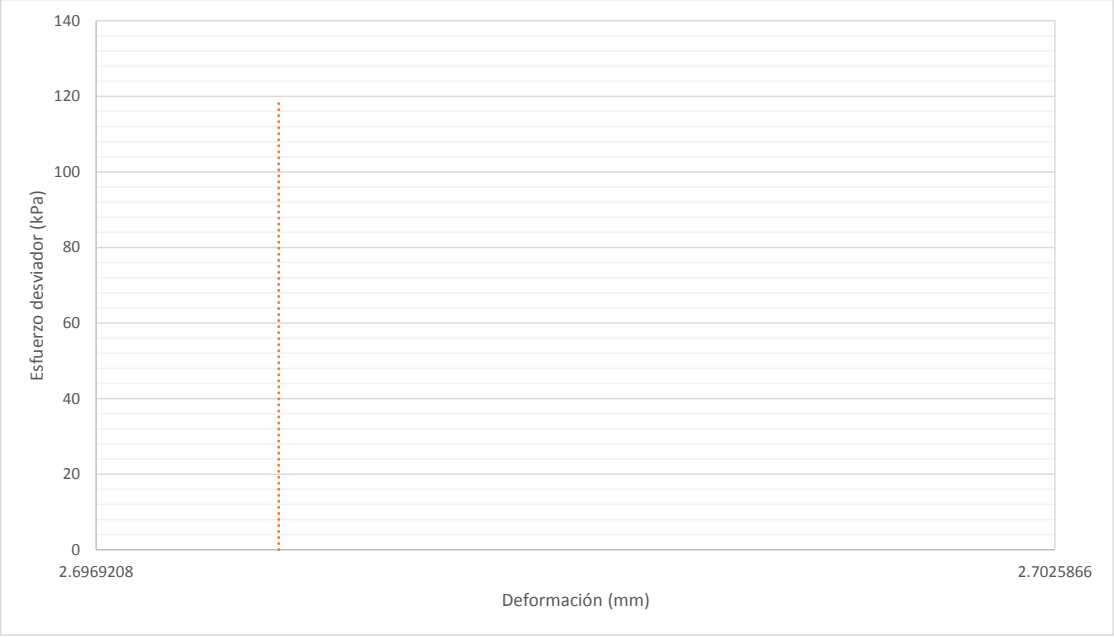
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.152
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

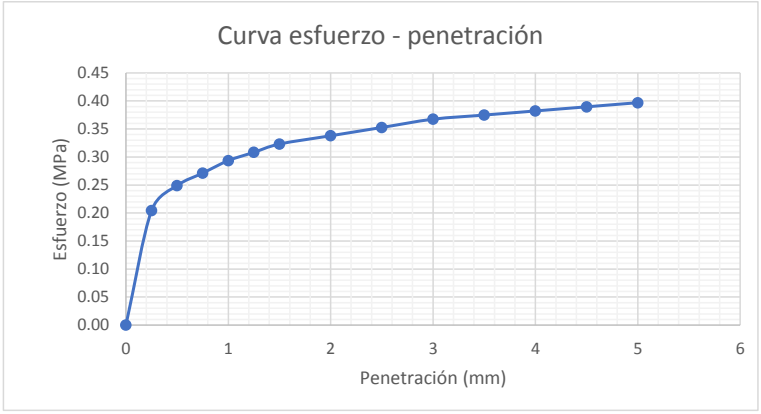
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	129.34
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	299.8
Masa recipiente + muestra seca (g)	247.53
Contenido de humedad (%)	**44.2**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	4.19	0.20
0.020	0.500	5.10	0.25
0.030	0.750	5.56	0.27
0.039	1.000	6.02	0.29
0.049	1.250	6.32	0.31
0.059	1.500	6.62	0.32
0.079	2.000	6.93	0.34
0.098	2.500	7.23	0.35
0.118	3.000	7.53	0.37
0.138	3.500	7.68	0.37
0.157	4.000	7.83	0.38
0.177	4.500	7.98	0.39
0.197	5.000	8.14	0.40

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

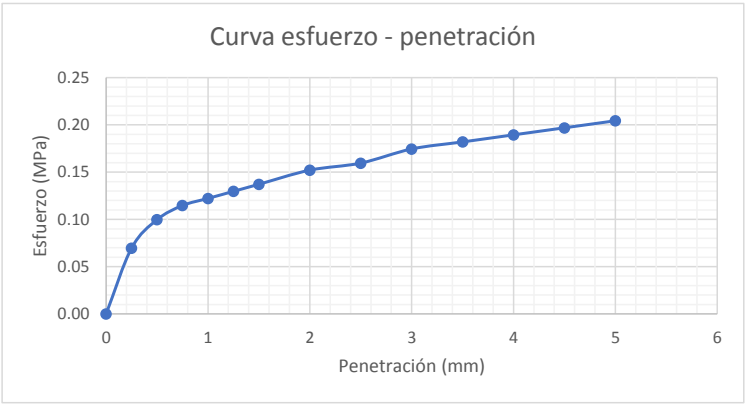
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 23 Y 24 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	129.34
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	299.8
Masa recipiente + muestra seca (g)	247.53
Contenido de humedad (%)	44.23

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.43	0.07
0.020	0.500	2.04	0.10
0.030	0.750	2.35	0.11
0.039	1.000	2.50	0.12
0.049	1.250	2.66	0.13
0.059	1.500	2.81	0.14
0.079	2.000	3.12	0.15
0.098	2.500	3.27	0.16
0.118	3.000	3.58	0.17
0.138	3.500	3.73	0.18
0.157	4.000	3.88	0.19
0.177	4.500	4.04	0.20
0.197	5.000	4.19	0.20



Humedad final	
# recipiente	4
Masa recipiente (g)	129.24
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	303.16
Masa recipiente + muestra seca (g)	246.78
Contenido de humedad (%)	**47.97**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	14.49
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	73.73
Masa recipiente + suelo seco (g)	55.69
Contenido de humedad (%)	**43.8**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	64.7
Masa de la muestra parafinada (g)	71.6
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	27.1
Temperatura del agua (º)	16
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99895
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**37.13**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	64.7
Volumen de la muestra (cm^3)	37.13
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.74
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**17.10**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

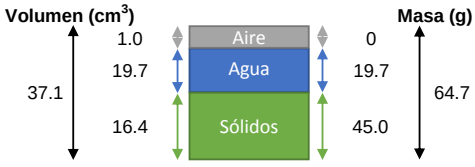
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	147.42	645.77	23.8	0.99735	499.67
2	147.41	646.47	16.5	0.99886	499.63
3	147.41	646.45	16.4	0.99888	499.60
4	147.41	646.49	16.4	0.99888	499.64
5	147.42	646.47	16.8	0.99881	499.64
Prom	**147.41**	**646.33**			**499.64**
Desv.	**0.01**	**0.31**			**0.03**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	50.1
Temperatura de ensayo (ºC)	18
Densidad del agua (g/cm^3)	0.9986
Masa picnómetro vacío (g)	147.41
Volumen picnómetro (cm^3)	499.64
Masa picnómetro con agua (g)	646.35
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	678.2
Gravedad específica sin corregir	2.74
Factor de corrección	1.00039
Gravedad específica corregida	**2.75**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.26**
η (%)	**55.82**
S (%)	**95.17**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

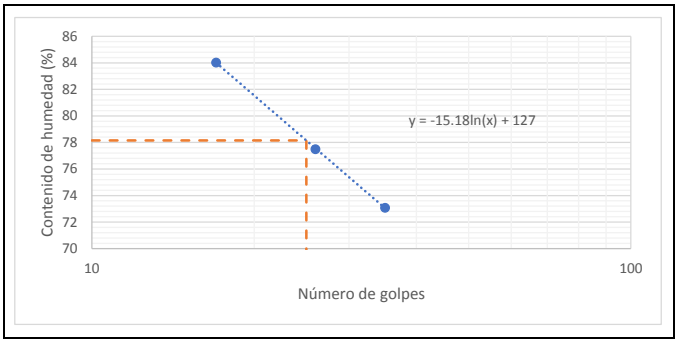
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	55	75	64
Masa del recipiente (g)	12.065	10.785	11.011
No. Golpes	17	26	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	22.4	25.91	20.494
Masa recipiente + suelo seco (g)	17.681	19.306	16.49
Contenido de humedad (%)	84	78	73



LL (%)	**78**

2. Determinación límite plástico

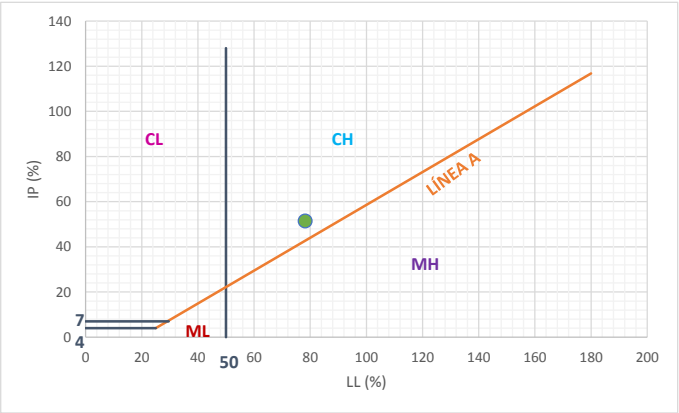
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	C5	73
Masa del recipiente (g)	6.831	10.885
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	13.82	17.546
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.354	16.135
Contenido de humedad (%)	27	27

LP (%)	**27**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**51**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**CH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

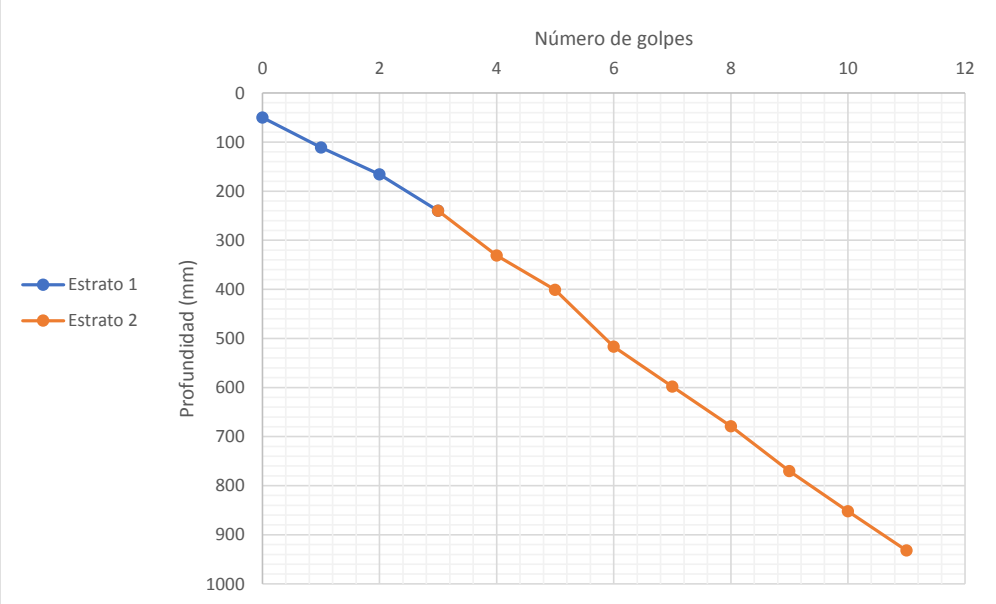
Procedencia:	Escuela Colombiana de Ingeniería
Fecha de exploración:	Julio 09 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	50	-	-	-	-
1	111	61	61	1	61
1	166	55	55	1	55
1	240	74	74	1	74
1	331	91	91	1	91
1	401	70	70	1	70
1	517	116	116	1	116
1	598	81	81	1	81
1	679	81	81	1	81
1	770	91	91	1	91
1	852	82	82	1	82
1	932	80	80	1	80

***El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestras**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	63	240
2	87	692



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	**87**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

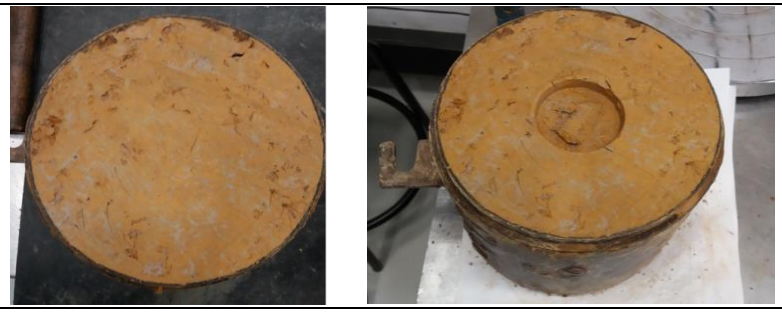
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	17.44
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	39.32
Masa recipiente + muestra seca (g)	32.53
Contenido de humedad (%)	45.0

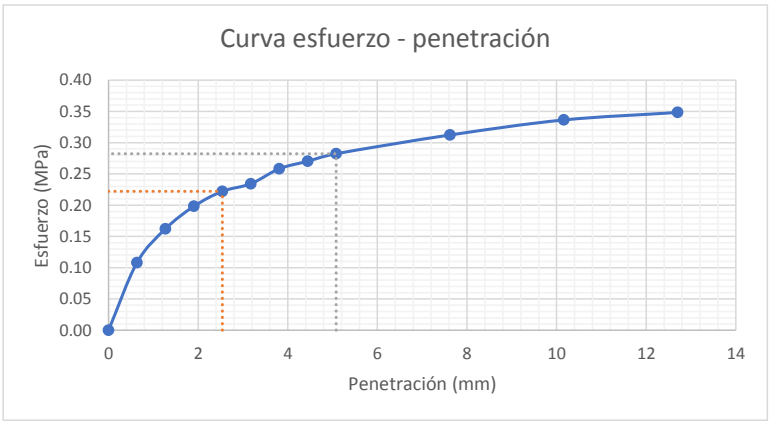
Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	21.33	0.11
0.050	1.270	31.99	0.16
0.075	1.905	39.10	0.20
0.100	2.540	43.84	0.22
0.125	3.175	46.21	0.23
0.150	3.810	50.95	0.26
0.175	4.445	53.32	0.27
0.200	5.080	55.69	0.28
0.300	7.620	61.61	0.31
0.400	10.160	66.35	0.34
0.500	12.700	68.72	0.35

Registro fotográfico





Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.22
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.28
$CBR_{2,54}$ (%)	3.23
$CBR_{5,08}$ (%)	2.73
CBR sin imersión (%)	**3.23**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

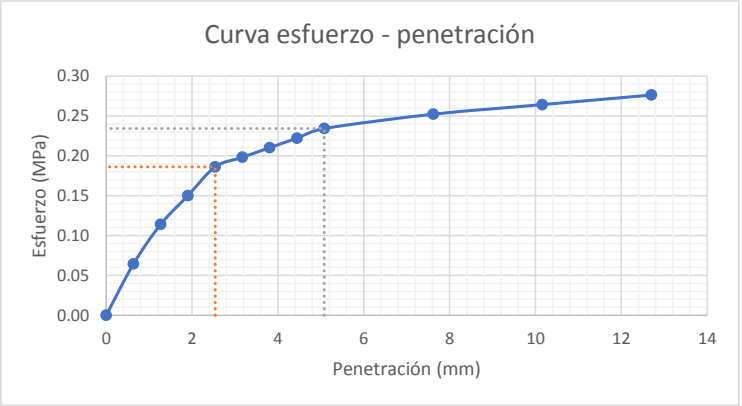
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	17.44
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	39.32
Masa recipiente + muestra seca (g)	32.53
Contenido de humedad (%)	45.0

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	12.680	0.06
0.050	1.270	22.510	0.11
0.075	1.905	29.620	0.15
0.100	2.540	36.730	0.19
0.125	3.175	39.100	0.20
0.150	3.810	41.470	0.21
0.175	4.445	43.840	0.22
0.200	5.080	46.210	0.23
0.300	7.620	49.760	0.25
0.400	10.160	52.130	0.26
0.500	12.700	54.501	0.28



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.19
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.23
$CBR_{2,54}$ (%)	2.70
$CBR_{5,08}$ (%)	2.27
CBR con inmersión (%)	**2.70**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	7.12
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	79.04
Masa recipiente + muestra seca (g)	56.33
Contenido de humedad (%)	46.1

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	154.71	154.92	154.21	154.66	154.63
Diámetro (mm)	69.92	69.5	70.68	70.73	70.21

Área (mm^2)	3871.30
Volumen (cm^3)	598.60
Masa húmeda muestra (g)	1068.91
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.79

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	116	106	10	29.96	27.38	2.58	0.088	0.090	0.089	0.00058	47.57
1	41.4	12.4	46	43	3	11.88	11.11	0.77	0.030	0.030	0.030	0.00019	57.25
2	41.4	24.8	101	91	10	26.09	23.51	2.58	0.075	0.076	0.076	0.00049	48.14
3	41.4	37.3	176	162	14	45.46	41.85	3.62	0.159	0.162	0.161	0.00104	40.31
4	41.4	49.7	210	189	21	54.25	48.82	5.42	0.194	0.199	0.197	0.00127	38.42
5	41.4	62	257	233	24	66.39	60.19	6.20	0.253	0.258	0.256	0.00165	36.42
6	27.6	12.4	50	46	4	12.92	11.88	1.03	0.040	0.040	0.040	0.00026	45.93
7	27.6	24.8	97	87	10	25.06	22.47	2.58	0.080	0.082	0.081	0.00052	42.90
8	27.6	37.3	156	143	13	40.30	36.94	3.36	0.132	0.135	0.134	0.00086	42.78
9	27.6	49.7	198	179	19	51.15	46.24	4.91	0.179	0.183	0.181	0.00117	39.50
10	27.6	62	251	226	25	64.84	58.38	6.46	0.240	0.245	0.243	0.00157	37.22
11	13.8	12.4	51	51	0	13.17	13.17	0.00	0.036	0.038	0.037	0.00024	55.05
12	13.8	24.8	101	93	8	26.09	24.02	2.07	0.084	0.087	0.086	0.00055	43.44
13	13.8	37.3	192	178	14	49.60	45.98	3.62	0.160	0.164	0.162	0.00105	43.89
14	13.8	49.7	202	181	21	52.18	46.75	5.42	0.217	0.221	0.219	0.00142	33.01
15	13.8	62	250	225	25	64.58	58.12	6.46	0.242	0.247	0.245	0.00158	36.76

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	60
Masa recipiente (g)	123.6
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1192.51
Masa recipiente + muestra seca (g)	899.66
Masa del agua (g)	292.85
Masa material seco (g)	776.06
Masa material húmedo (g)	1068.91
Humedad (%)	37.74

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	60
Masa recipiente (g)	123.6
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1190.9
Masa recipiente + muestra seca (g)	899.66
Masa del agua (g)	291.24
Masa material seco (g)	776.06
Masa material húmedo (g)	1067.3
Humedad (%)	37.53

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

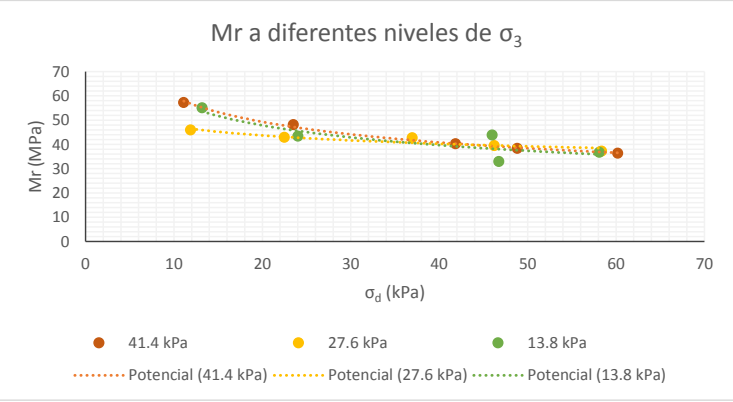
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

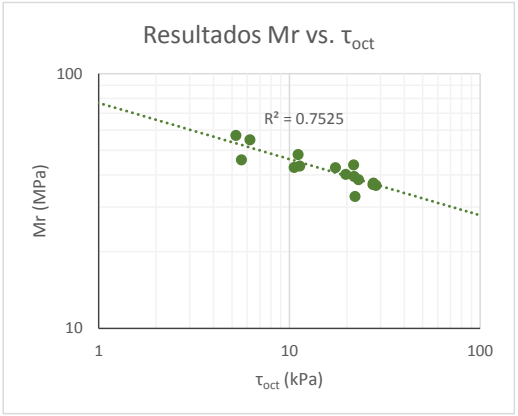
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

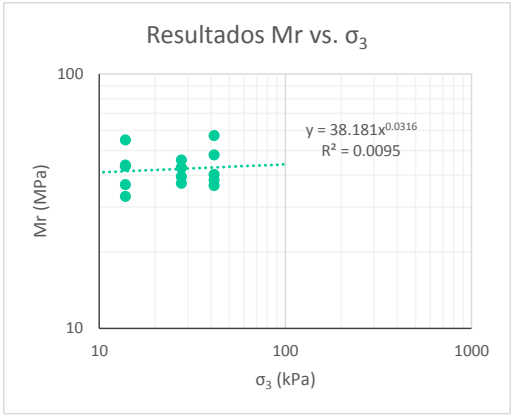
Ecuaciones

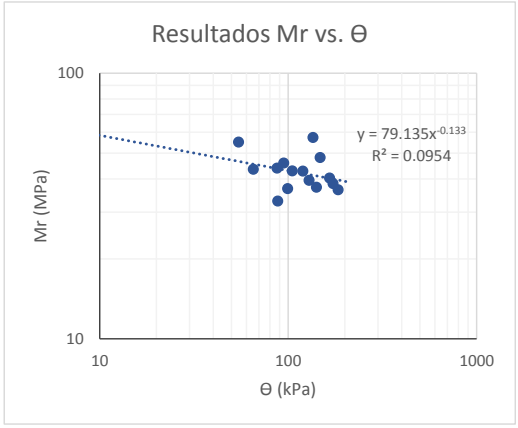
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

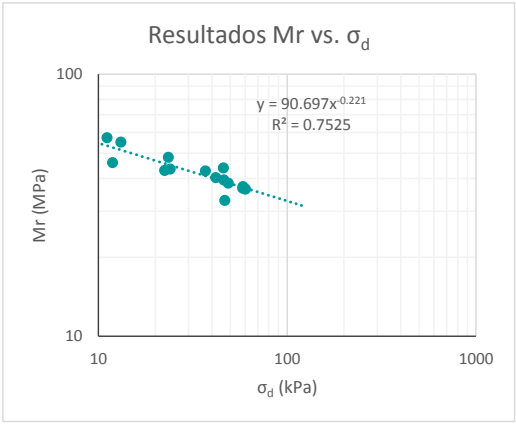
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.11	41.40	5.2361	135.307	57.2
2	23.51	41.40	11.0810	147.706	48.1
3	41.85	41.40	19.7266	166.046	40.3
4	48.82	41.40	23.0143	173.021	38.4
5	60.19	41.40	28.3722	184.386	36.4
6	11.88	27.60	5.6014	94.682	45.9
7	22.47	27.60	10.5939	105.273	42.9
8	36.94	27.60	17.4130	119.738	42.8
9	46.24	27.60	21.7967	129.038	39.5
10	58.38	27.60	27.5198	141.178	37.2
11	13.17	13.80	6.2102	54.574	55.1
12	24.02	13.80	11.3245	65.423	43.4
13	45.98	13.80	21.6749	87.379	43.9
14	46.75	13.80	22.0402	88.154	33.0
15	58.12	13.80	27.3980	99.520	36.8











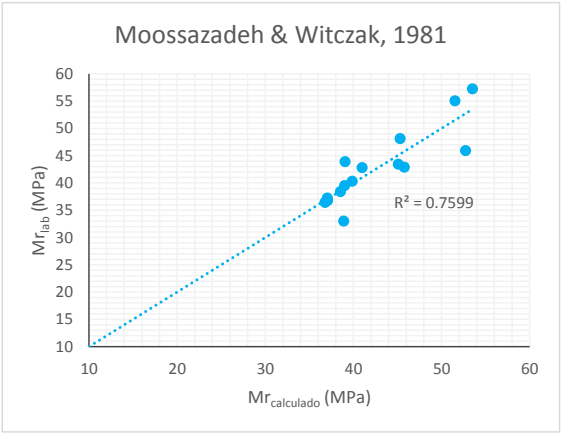
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

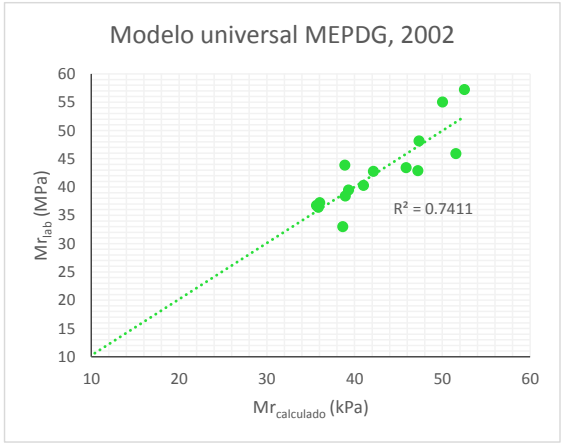
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	32.714			**k_1**	0.564	
		k_2	-0.222			**k_2**	0.033	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-2.004	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	57.2	53.503	3.7	14.0	57.2	52.505	4.7	22.5
2	48.1	45.305	2.8	8.0	48.1	47.345	0.8	0.6
3	40.3	39.864	0.5	0.2	40.3	41.006	-0.7	0.5
4	38.4	38.524	-0.1	0.0	38.4	38.926	-0.5	0.3
5	36.4	36.776	-0.4	0.1	36.4	35.862	0.6	0.3
6	45.9	52.708	-6.8	45.9	45.9	51.529	-5.6	31.3
7	42.9	45.759	-2.9	8.2	42.9	47.219	-4.3	18.7
8	42.8	40.983	1.8	3.2	42.8	42.150	0.6	0.4
9	39.5	38.991	0.5	0.3	39.5	39.310	0.2	0.0
10	37.2	37.026	0.2	0.0	37.2	36.013	1.2	1.5
11	55.1	51.516	3.5	12.5	55.1	50.020	5.0	25.3
12	43.4	45.087	-1.6	2.7	43.4	45.875	-2.4	5.9
13	43.9	39.040	4.8	23.5	43.9	38.877	5.0	25.1
14	33.0	38.895	-5.9	34.6	33.0	38.659	-5.6	31.9
15	36.8	37.062	-0.3	0.1	36.8	35.662	1.1	1.2
			Σ	153.5			**Σ**	165.5





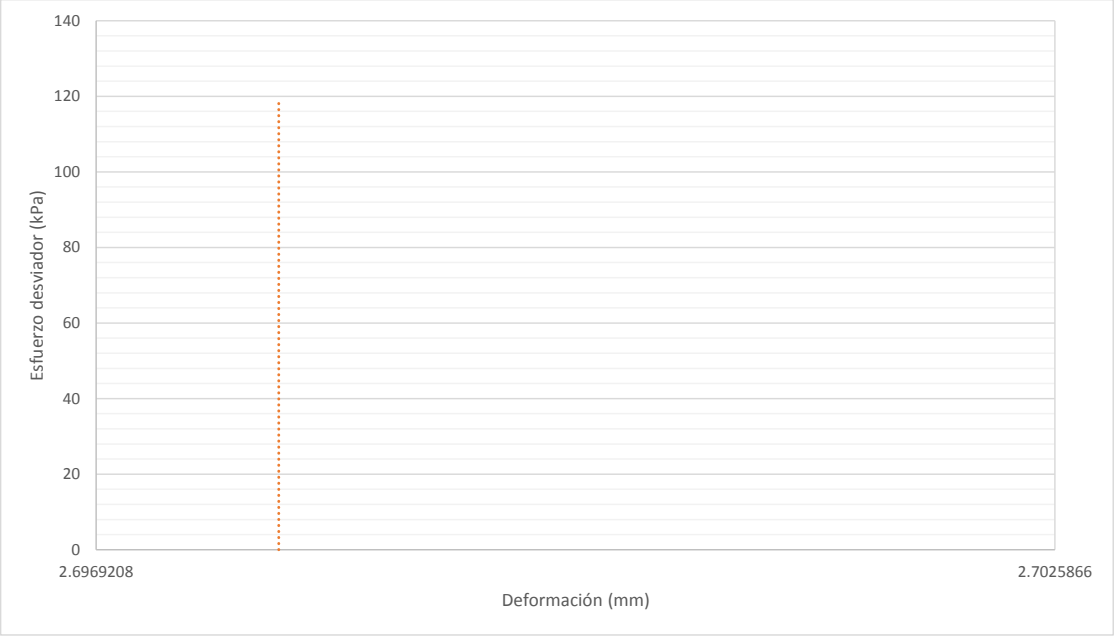
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.155
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

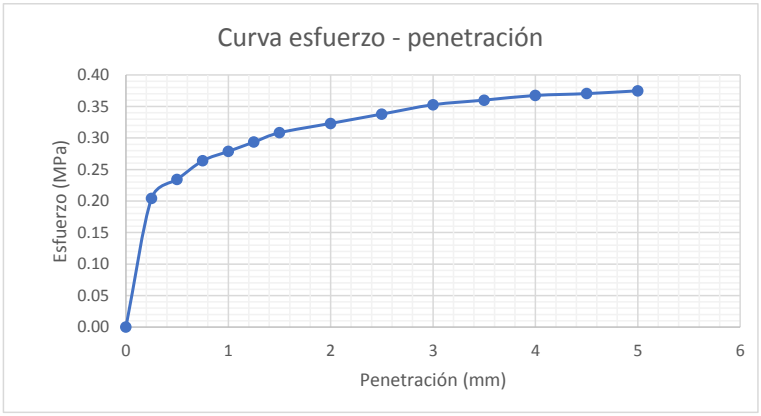
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.58
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	293
Masa recipiente + muestra seca (g)	230.67
Contenido de humedad (%)	**54.2**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	4.19	0.20
0.020	0.500	4.80	0.23
0.030	0.750	5.41	0.26
0.039	1.000	5.71	0.28
0.049	1.250	6.02	0.29
0.059	1.500	6.32	0.31
0.079	2.000	6.62	0.32
0.098	2.500	6.93	0.34
0.118	3.000	7.23	0.35
0.138	3.500	7.38	0.36
0.157	4.000	7.53	0.37
0.177	4.500	7.59	0.37
0.197	5.000	7.68	0.37

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

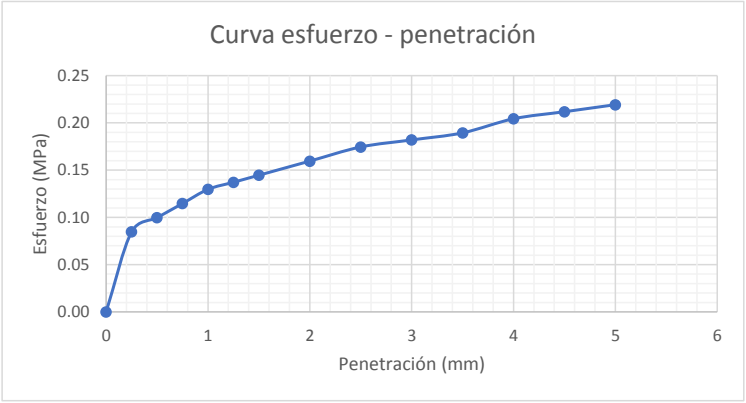
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.58
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	293
Masa recipiente + muestra seca (g)	230.67
Contenido de humedad (%)	54.16

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.74	0.08
0.020	0.500	2.04	0.10
0.030	0.750	2.35	0.11
0.039	1.000	2.66	0.13
0.049	1.250	2.81	0.14
0.059	1.500	2.96	0.14
0.079	2.000	3.27	0.16
0.098	2.500	3.58	0.17
0.118	3.000	3.73	0.18
0.138	3.500	3.88	0.19
0.157	4.000	4.19	0.20
0.177	4.500	4.34	0.21
0.197	5.000	4.49	0.22



Humedad final	
# recipiente	11
Masa recipiente (g)	106.01
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	279.65
Masa recipiente + muestra seca (g)	224.16
Contenido de humedad (%)	**46.97**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	17.6
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	117.01
Masa recipiente + suelo seco (g)	85.9
Contenido de humedad (%)	**45.5**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	241
Masa de la muestra parafinada (g)	260.7
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	98.6
Temperatura del agua (º)	16.5
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99886
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**141.10**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	241
Volumen de la muestra (cm^3)	141.10
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.71
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**16.76**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

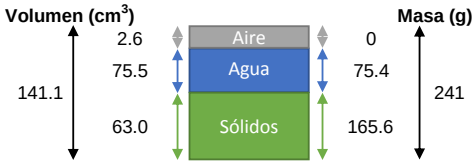
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	147.42	645.77	23.8	0.99735	499.67
2	147.41	646.47	16.5	0.99886	499.63
3	147.41	646.45	16.4	0.99888	499.60
4	147.41	646.49	16.4	0.99888	499.64
5	147.42	646.47	16.8	0.99881	499.64
Prom	**147.41**	**646.33**			**499.64**
Desv.	**0.01**	**0.31**			**0.03**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	50.71
Temperatura de ensayo (ºC)	21
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99799
Masa picnómetro vacío (g)	147.41
Volumen picnómetro (cm^3)	499.64
Masa picnómetro con agua (g)	646.05
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	677.5
Gravedad específica sin corregir	2.63
Factor de corrección	0.99979
Gravedad específica corregida	**2.63**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.24**
η (%)	**55.38**
S (%)	**96.63**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

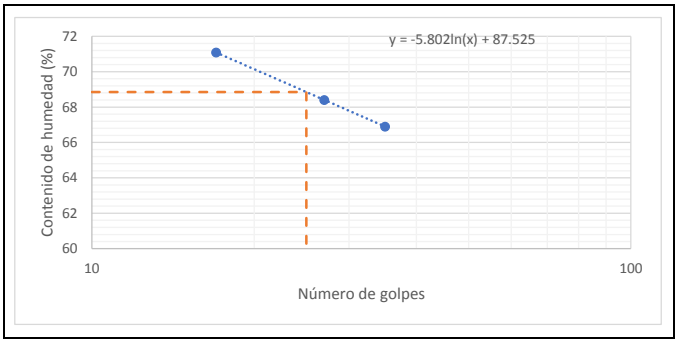
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	H2	70	10
Masa del recipiente (g)	6.663	11.234	9.494
No. Golpes	17	27	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	16.001	20.385	18.827
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.121	16.668	15.086
Contenido de humedad (%)	71	68	67



LL (%)	**69**

2. Determinación límite plástico

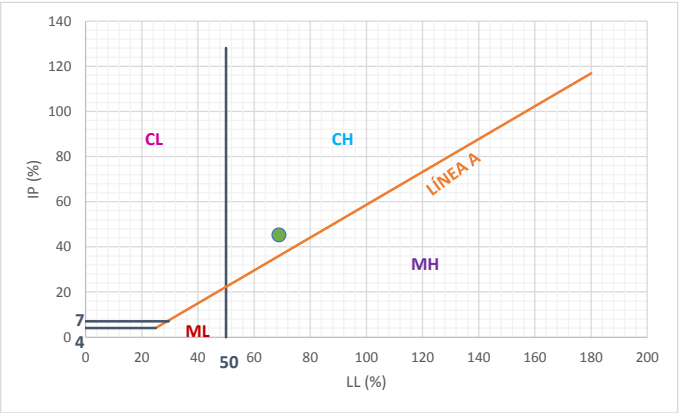
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	18	B1
Masa del recipiente (g)	6.69	6.824
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	15.498	14.372
Masa recipiente + suelo seco (g)	13.821	12.93
Contenido de humedad (%)	24	24

LP (%)	**24**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**45**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**CH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

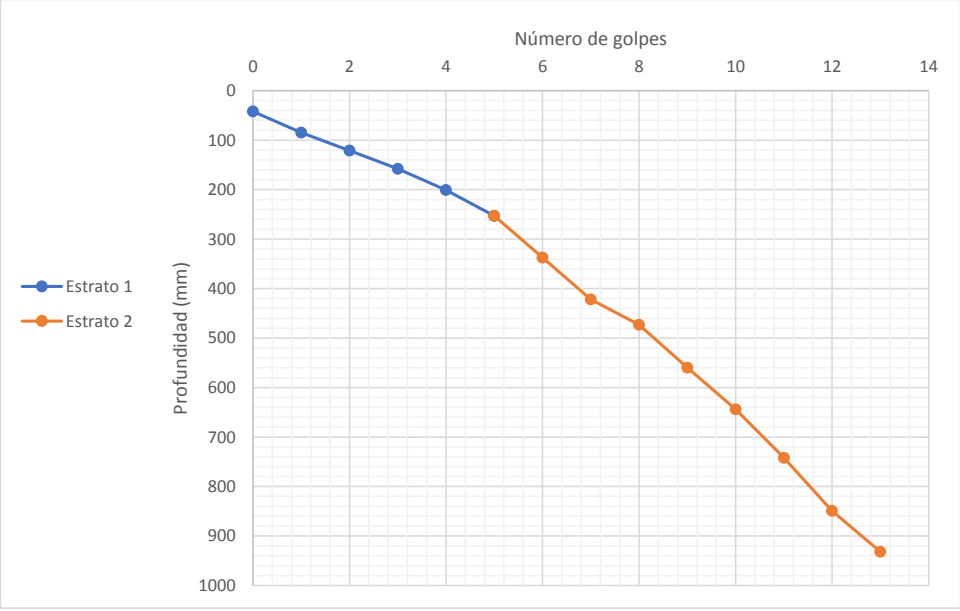
Procedencia:	Escuela Colombiana de Ingeniería
Fecha de exploración:	Julio 09 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	42	-	-	-	-
1	85	43	43	1	43
1	121	36	36	1	36
1	158	37	37	1	37
1	201	43	43	1	43
1	253	52	52	1	52
1	337	84	84	1	84
1	422	85	85	1	85
1	473	51	51	1	51
1	560	87	87	1	87
1	644	84	84	1	84
1	742	98	98	1	98
1	849	107	107	1	107
1	932	83	83	1	83

***El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestra**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	41	253
2	86	679



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe) **86**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

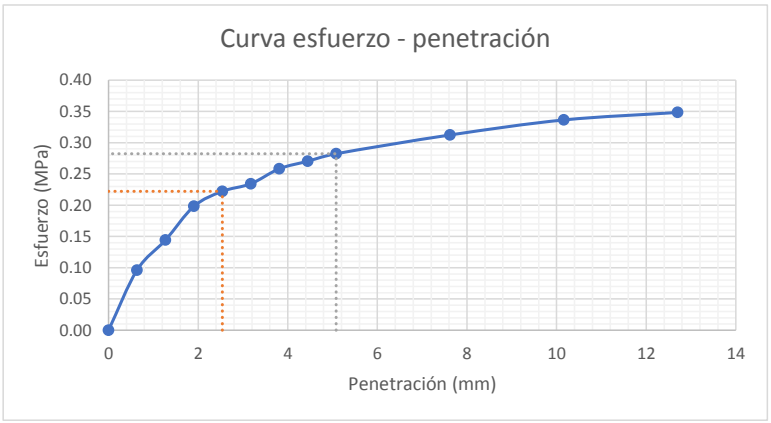
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	17.69
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	35.82
Masa recipiente + muestra seca (g)	30.29
Contenido de humedad (%)	43.9

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	18.96	0.10
0.050	1.270	28.44	0.14
0.075	1.905	39.10	0.20
0.100	2.540	43.84	0.22
0.125	3.175	46.21	0.23
0.150	3.810	50.95	0.26
0.175	4.445	53.32	0.27
0.200	5.080	55.69	0.28
0.300	7.620	61.61	0.31
0.400	10.160	66.35	0.34
0.500	12.700	68.72	0.35

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.22
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.28
$CBR_{2,54}$ (%)	3.23
$CBR_{5,08}$ (%)	2.73
CBR sin imersión (%)	**3.23**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

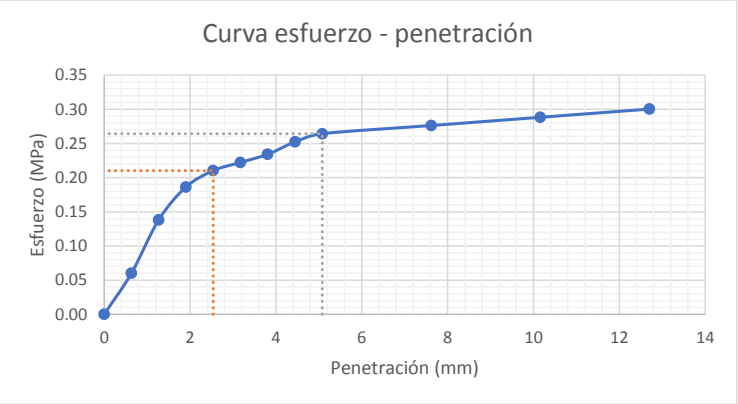
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	17.69
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	35.82
Masa recipiente + muestra seca (g)	30.29
Contenido de humedad (%)	43.9

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		4.54	
Diámetro del pistón (mm)		49.64	
Área del pistón (mm^2)		1935.32	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	11.850	0.06
0.050	1.270	27.250	0.14
0.075	1.905	36.730	0.19
0.100	2.540	41.470	0.21
0.125	3.175	43.840	0.22
0.150	3.810	46.210	0.23
0.175	4.445	49.760	0.25
0.200	5.080	52.130	0.26
0.300	7.620	54.500	0.28
0.400	10.160	56.870	0.29
0.500	12.700	59.240	0.30



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.21
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.26
$CBR_{2,54}$ (%)	3.05
$CBR_{5,08}$ (%)	2.56
CBR con inmersión (%)	**3.05**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	10.94
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	63.23
Masa recipiente + muestra seca (g)	47.05
Contenido de humedad (%)	44.8

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	153.99	154.07	154.41	154.18	154.16
Diámetro (mm)	69.91	69.78	70.54	70.56	70.20

Área (mm^2)	3870.20
Volumen (cm^3)	596.64
Masa húmeda muestra (g)	1041.73
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.75

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	125	116	9	32.30	29.97	2.33	0.148	0.146	0.147	0.00095	31.43
1	41.4	12.4	45	42	3	11.63	10.85	0.78	0.047	0.046	0.047	0.00030	35.98
2	41.4	24.8	104	95	9	26.87	24.55	2.33	0.141	0.139	0.140	0.00091	27.03
3	41.4	37.3	152	138	14	39.27	35.66	3.62	0.213	0.212	0.213	0.00138	25.87
4	41.4	49.7	211	192	19	54.52	49.61	4.91	0.308	0.307	0.308	0.00199	24.87
5	41.4	62	252	226	26	65.11	58.39	6.72	0.379	0.378	0.379	0.00246	23.78
6	27.6	12.4	51	47	4	13.18	12.14	1.03	0.043	0.043	0.043	0.00028	43.54
7	27.6	24.8	104	96	8	26.87	24.80	2.07	0.114	0.114	0.114	0.00074	33.54
8	27.6	37.3	165	151	14	42.63	39.02	3.62	0.202	0.202	0.202	0.00131	29.78
9	27.6	49.7	197	178	19	50.90	45.99	4.91	0.288	0.288	0.288	0.00187	24.62
10	27.6	62	246	221	25	63.56	57.10	6.46	0.259	0.258	0.259	0.00168	34.05
11	13.8	12.4	56	52	4	14.47	13.44	1.03	0.042	0.042	0.042	0.00027	49.32
12	13.8	24.8	115	106	9	29.71	27.39	2.33	0.106	0.106	0.106	0.00069	39.83
13	13.8	37.3	172	157	15	44.44	40.57	3.88	0.196	0.196	0.196	0.00127	31.91
14	13.8	49.7	259	240	19	66.92	62.01	4.91	0.295	0.292	0.294	0.00190	32.57
15	13.8	62	240	216	24	62.01	55.81	6.20	0.360	0.361	0.361	0.00234	23.87

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	113.3
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1155.03
Masa recipiente + muestra seca (g)	848.89
Masa del agua (g)	306.14
Masa material seco (g)	735.59
Masa material húmedo (g)	1041.73
Humedad (%)	41.62

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	113.3
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1154.06
Masa recipiente + muestra seca (g)	848.89
Masa del agua (g)	305.17
Masa material seco (g)	735.59
Masa material húmedo (g)	1040.76
Humedad (%)	41.49

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

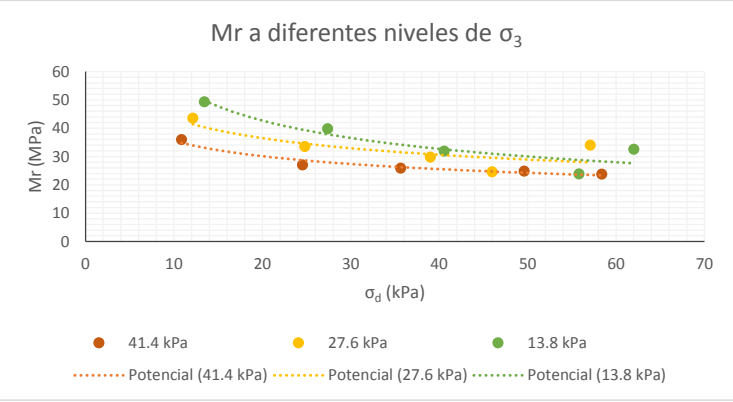
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

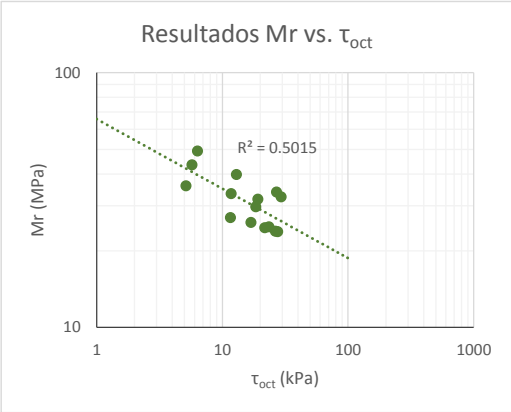
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

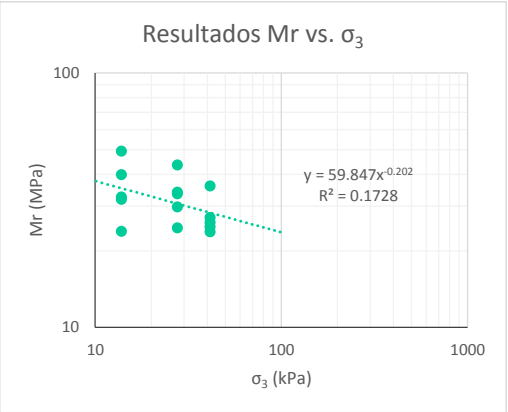
Ecuaciones

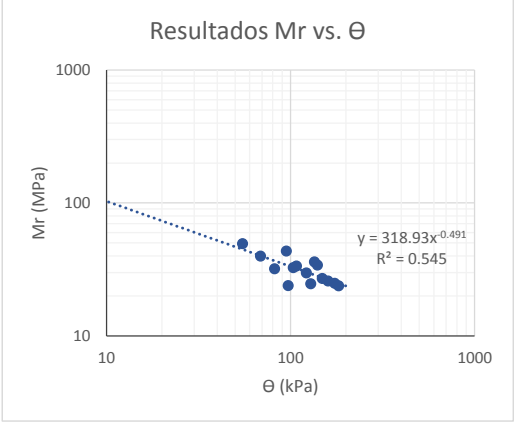
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

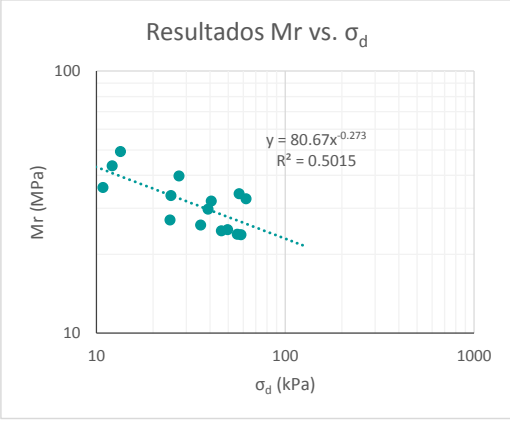
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	10.85	41.40	5.1158	135.052	36.0
2	24.55	41.40	11.5714	148.747	27.0
3	35.66	41.40	16.8089	159.857	25.9
4	49.61	41.40	23.3863	173.810	24.9
5	58.39	41.40	27.5276	182.595	23.8
6	12.14	27.60	5.7248	94.944	43.5
7	24.80	27.60	11.6932	107.605	33.5
8	39.02	27.60	18.3924	121.816	29.8
9	45.99	27.60	21.6811	128.792	24.6
10	57.10	27.60	26.9186	139.903	34.1
11	13.44	13.80	6.3338	54.836	49.3
12	27.39	13.80	12.9112	68.789	39.8
13	40.57	13.80	19.1232	81.966	31.9
14	62.01	13.80	29.2329	103.412	32.6
15	55.81	13.80	26.3096	97.211	23.9











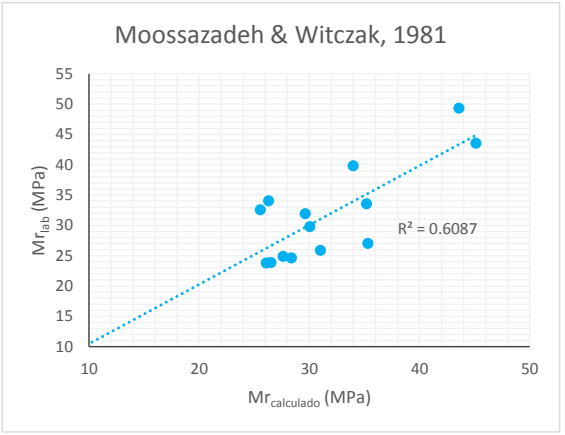
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

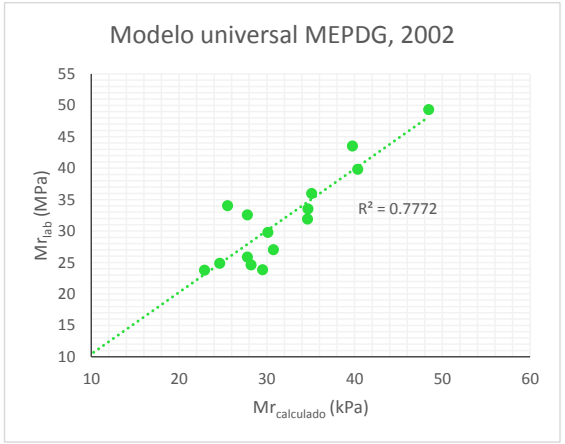
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	21.482			**k_1**	0.415	
		k_2	-0.349			**k_2**	-0.378	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.649	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	36.0	46.932	-11.0	120.0	36.0	35.114	0.9	0.7
2	27.0	35.305	-8.3	68.5	27.0	30.741	-3.7	13.8
3	25.9	30.994	-5.1	26.3	25.9	27.772	-1.9	3.6
4	24.9	27.622	-2.8	7.6	24.9	24.620	0.3	0.1
5	23.8	26.095	-2.3	5.3	23.8	22.905	0.9	0.8
6	43.5	45.126	-1.6	2.5	43.5	39.743	3.8	14.4
7	33.5	35.176	-1.6	2.7	33.5	34.681	-1.1	1.3
8	29.8	30.036	-0.3	0.1	29.8	30.112	-0.3	0.1
9	24.6	28.361	-3.7	14.0	24.6	28.203	-3.6	12.8
10	34.1	26.299	7.8	60.1	34.1	25.528	8.5	72.7
11	49.3	43.563	5.8	33.1	49.3	48.453	0.9	0.7
12	39.8	33.981	5.9	34.2	39.8	40.356	-0.5	0.3
13	31.9	29.630	2.3	5.2	31.9	34.629	-2.7	7.4
14	32.6	25.554	7.0	49.3	32.6	27.790	4.8	22.9
15	23.9	26.510	-2.6	7.0	23.9	29.524	-5.7	32.0
			Σ	315.8			**Σ**	183.6





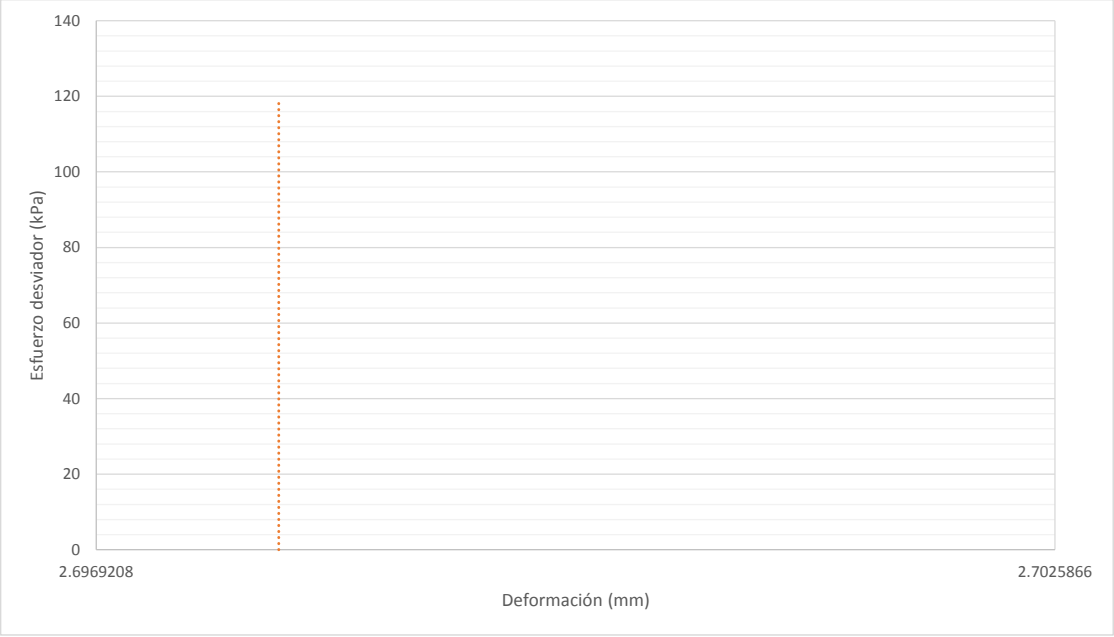
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.154
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

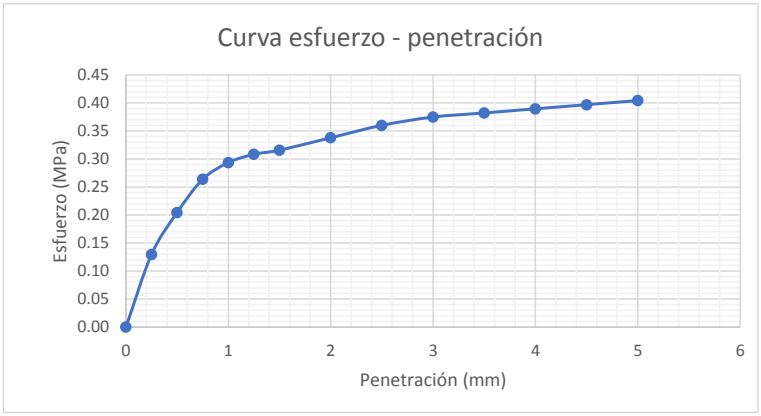
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	106
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	274.94
Masa recipiente + muestra seca (g)	222.46
Contenido de humedad (%)	**45.1**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	2.66	0.13
0.020	0.500	4.19	0.20
0.030	0.750	5.41	0.26
0.039	1.000	6.02	0.29
0.049	1.250	6.32	0.31
0.059	1.500	6.47	0.32
0.079	2.000	6.93	0.34
0.098	2.500	7.38	0.36
0.118	3.000	7.68	0.37
0.138	3.500	7.83	0.38
0.157	4.000	7.98	0.39
0.177	4.500	8.14	0.40
0.197	5.000	8.29	0.40

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

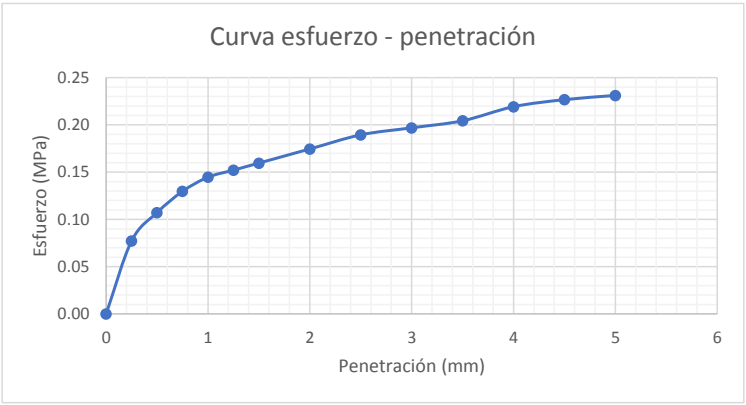
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Julio 30 y 31 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	106
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	274.94
Masa recipiente + muestra seca (g)	222.46
Contenido de humedad (%)	45.06

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.58	0.08
0.020	0.500	2.20	0.11
0.030	0.750	2.66	0.13
0.039	1.000	2.96	0.14
0.049	1.250	3.12	0.15
0.059	1.500	3.27	0.16
0.079	2.000	3.58	0.17
0.098	2.500	3.88	0.19
0.118	3.000	4.04	0.20
0.138	3.500	4.19	0.20
0.157	4.000	4.49	0.22
0.177	4.500	4.65	0.23
0.197	5.000	4.74	0.23



Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	113.06
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	285.71
Masa recipiente + muestra seca (g)	229.84
Contenido de humedad (%)	**47.84**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	17.6
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	67.3
Masa recipiente + suelo seco (g)	51.74
Contenido de humedad (%)	**45.6**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	178.5
Masa de la muestra parafinada (g)	187.5
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	76.2
Temperatura del agua (º)	15
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99910
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**101.72**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	178.5
Volumen de la muestra (cm^3)	101.72
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.75
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**17.21**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

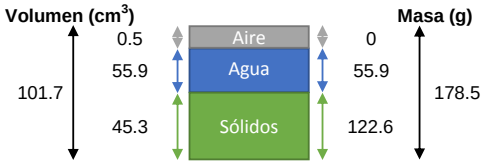
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	145.20	643.47	23.8	0.99735	499.59
2	145.21	643.72	21.2	0.99795	499.53
3	145.21	644.21	16.8	0.99881	499.59
4	145.20	644.20	16.6	0.99885	499.57
5	145.20	644.12	16.8	0.99881	499.51
Prom	**145.20**	**643.94**			**499.56**
Desv.	**0.01**	**0.33**			**0.04**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	48.89
Temperatura de ensayo (ºC)	19
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99841
Masa picnómetro vacío (g)	145.20
Volumen picnómetro (cm^3)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	643.97
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	674.8
Gravedad específica sin corregir	2.71
Factor de corrección	1.00020
Gravedad específica corregida	**2.71**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.24**
η (%)	**55.44**
S (%)	**99.19**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

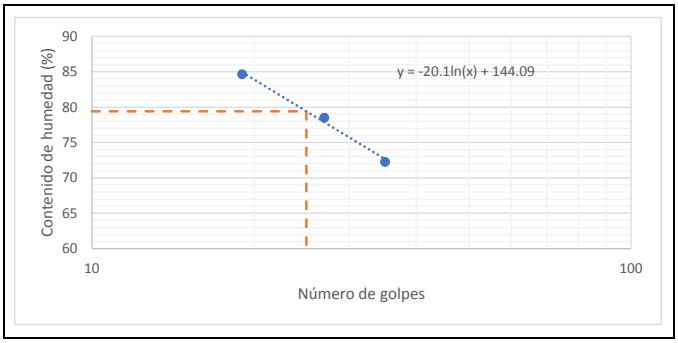
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	85	56	71
Masa del recipiente (g)	6.606	11.051	7.614
No. Golpes	19	27	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	17.308	19.037	15.299
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.402	15.525	12.075
Contenido de humedad (%)	85	78	72



LL (%)	79

2. Determinación límite plástico

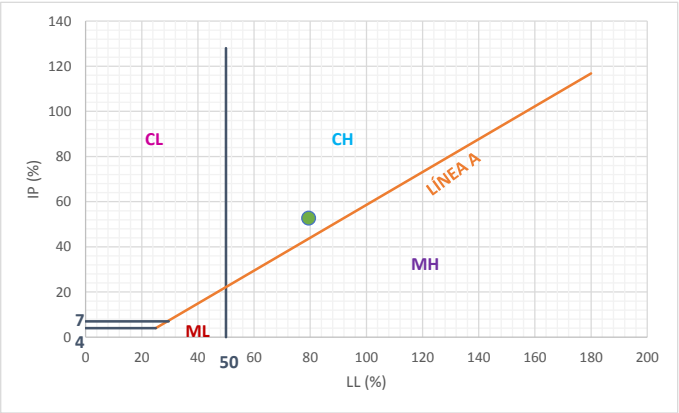
Ensayo	1	2
Número recipiente	19	57
Masa del recipiente (g)	7.271	11.047
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	13.792	18.847
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.416	17.209
Contenido de humedad (%)	27	27

LP (%)	27

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	53

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	CH

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

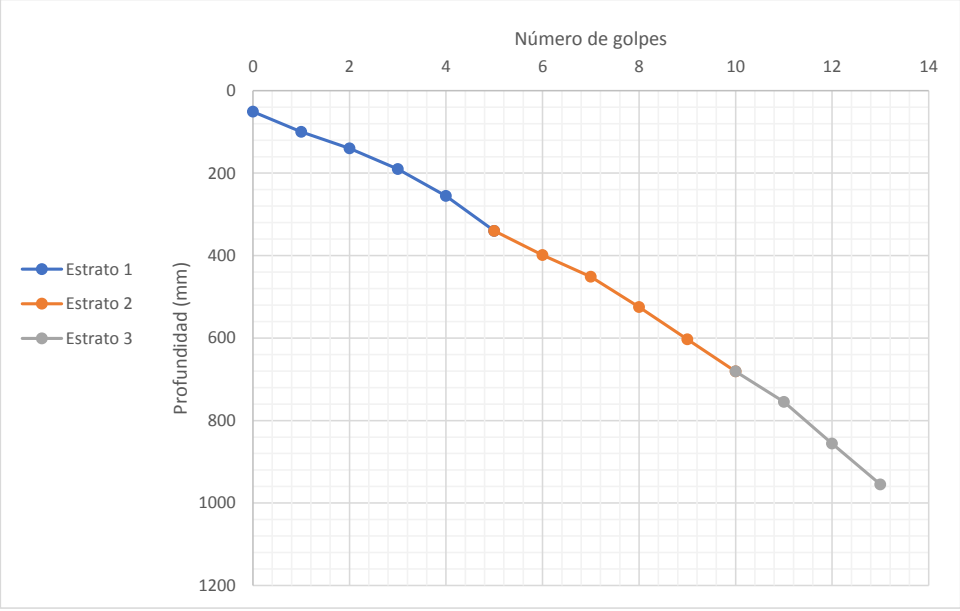
Procedencia:	Escuela Colombiana de Ingeniería
Fecha de exploración:	Julio 09 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	51	-	-	-	-
1	100	49	49	1	49
1	140	40	40	1	40
1	190	50	50	1	50
1	255	65	65	1	65
1	340	85	85	1	85
1	399	59	59	1	59
1	451	52	52	1	52
1	525	74	74	1	74
1	603	78	78	1	78
1	681	78	78	1	78
1	755	74	74	1	74
1	856	101	101	1	101
1	955	99	99	1	99

***El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestra**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	56	340
2	72	341
3	92	614



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe) **72**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

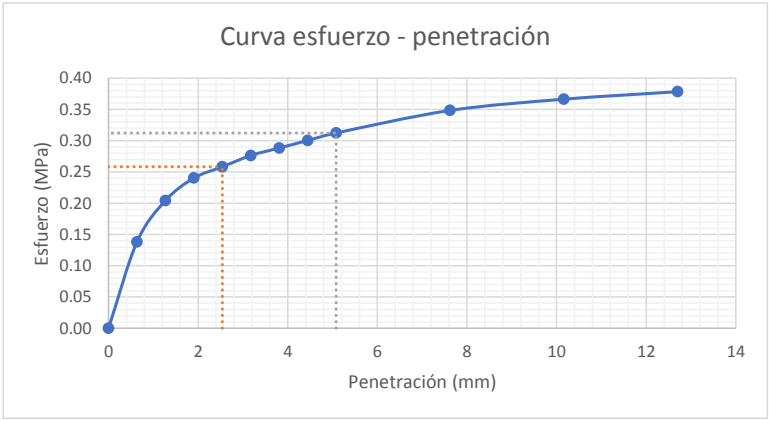
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	19.18
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	48.91
Masa recipiente + muestra seca (g)	39.62
Contenido de humedad (%)	45.5

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	27.25	0.14
0.050	1.270	40.28	0.20
0.075	1.905	47.39	0.24
0.100	2.540	50.95	0.26
0.125	3.175	54.50	0.28
0.150	3.810	56.87	0.29
0.175	4.445	59.24	0.30
0.200	5.080	61.61	0.31
0.300	7.620	68.72	0.35
0.400	10.160	72.27	0.37
0.500	12.700	74.64	0.38

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.26
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.31
$CBR_{2,54}$ (%)	3.75
$CBR_{5,08}$ (%)	3.02
CBR sin imersión (%)	**3.75**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

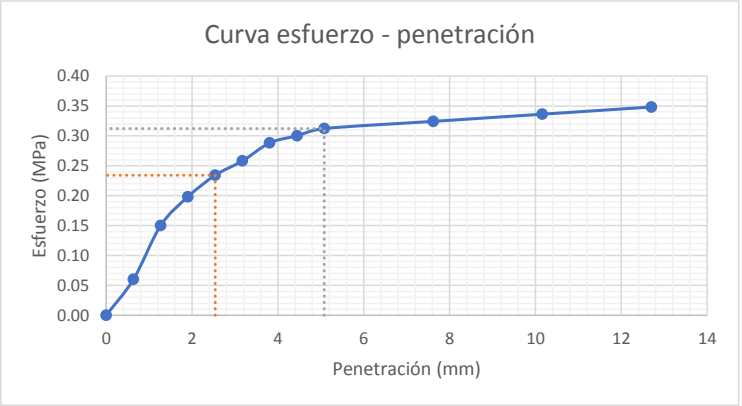
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	19.18
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	48.91
Masa recipiente + muestra seca (g)	39.62
Contenido de humedad (%)	45.5

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	11.850	0.06
0.050	1.270	29.620	0.15
0.075	1.905	39.100	0.20
0.100	2.540	46.210	0.23
0.125	3.175	50.950	0.26
0.150	3.810	56.870	0.29
0.175	4.445	59.240	0.30
0.200	5.080	61.610	0.31
0.300	7.620	63.980	0.32
0.400	10.160	66.350	0.34
0.500	12.700	68.720	0.35



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.23
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.31
$CBR_{2,54}$ (%)	3.40
$CBR_{5,08}$ (%)	3.02
CBR con inmersión (%)	**3.40**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	11.14
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	36.58
Masa recipiente + muestra seca (g)	28.42
Contenido de humedad (%)	47.2

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	139.79	140.01	140.34	139.86	140.00
Diámetro (mm)	69.49	70.99	69.51	70.09	70.02

Área (mm^2)	3850.65
Volumen (cm^3)	539.09
Masa húmeda muestra (g)	945.01
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.75

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	113	105	8	29.35	27.27	2.08	0.079	0.077	0.078	0.00056	48.94
1	41.4	12.4	50	46	4	12.98	11.95	1.04	0.030	0.029	0.030	0.00021	56.69
2	41.4	24.8	111	102	9	28.83	26.49	2.34	0.078	0.076	0.077	0.00055	48.16
3	41.4	37.3	156	142	14	40.51	36.88	3.64	0.107	0.105	0.106	0.00076	48.71
4	41.4	49.7	223	205	18	57.91	53.24	4.67	0.161	0.159	0.160	0.00114	46.58
5	41.4	62	278	253	25	72.20	65.70	6.49	0.208	0.206	0.207	0.00148	44.44
6	27.6	12.4	52	49	3	13.50	12.73	0.78	0.036	0.035	0.036	0.00025	50.18
7	27.6	24.8	104	94	10	27.01	24.41	2.60	0.073	0.071	0.072	0.00051	47.47
8	27.6	37.3	177	163	14	45.97	42.33	3.64	0.144	0.142	0.143	0.00102	41.44
9	27.6	49.7	215	195	20	55.83	50.64	5.19	0.171	0.169	0.170	0.00121	41.70
10	27.6	62	282	258	24	73.23	67.00	6.23	0.239	0.236	0.238	0.00170	39.50
11	13.8	12.4	51	50	1	13.24	12.98	0.26	0.033	0.033	0.033	0.00024	55.09
12	13.8	24.8	111	102	9	28.83	26.49	2.34	0.082	0.080	0.081	0.00058	45.78
13	13.8	37.3	168	154	14	43.63	39.99	3.64	0.136	0.134	0.135	0.00096	41.47
14	13.8	49.7	222	203	19	57.65	52.72	4.93	0.195	0.193	0.194	0.00139	38.04
15	13.8	62	275	250	25	71.42	64.92	6.49	0.263	0.260	0.262	0.00187	34.76

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.55
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1060.56
Masa recipiente + muestra seca (g)	773.5
Masa del agua (g)	287.06
Masa material seco (g)	657.95
Masa material húmedo (g)	945.01
Humedad (%)	43.63

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.55
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1060.35
Masa recipiente + muestra seca (g)	773.5
Masa del agua (g)	286.85
Masa material seco (g)	657.95
Masa material húmedo (g)	944.8
Humedad (%)	43.60

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

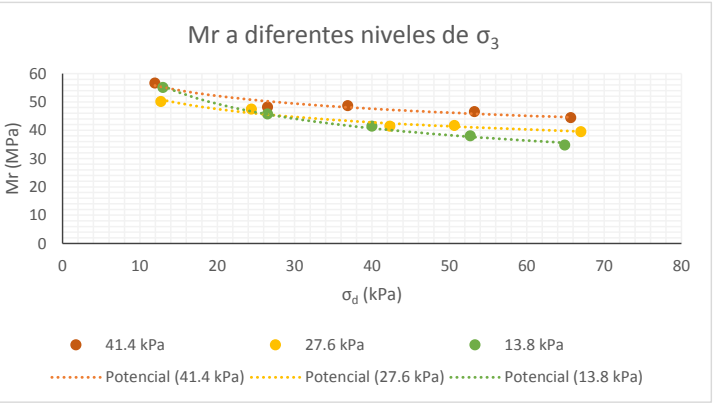
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

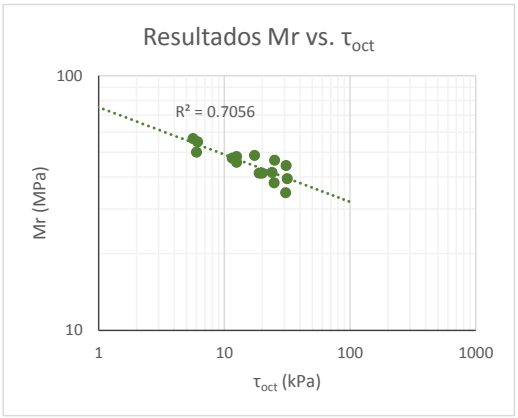
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

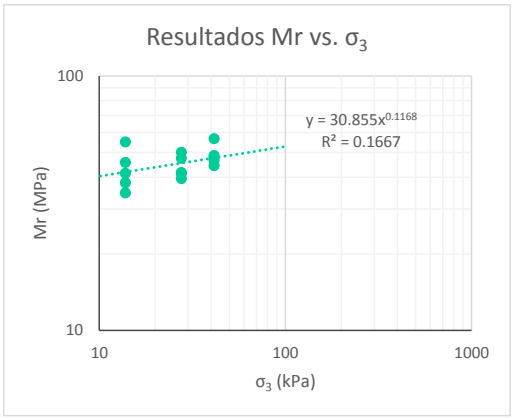
Ecuaciones

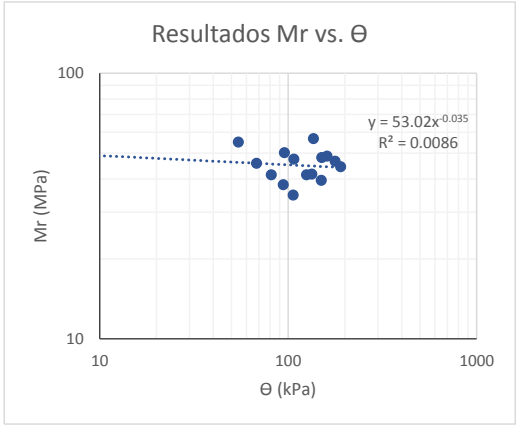
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

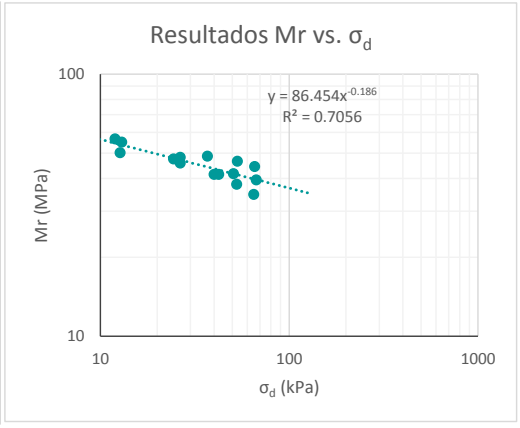
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.95	41.40	5.6314	136.146	56.7
2	26.49	41.40	12.4870	150.689	48.2
3	36.88	41.40	17.3839	161.077	48.7
4	53.24	41.40	25.0965	177.438	46.6
5	65.70	41.40	30.9728	189.903	44.4
6	12.73	27.60	5.9987	95.525	50.2
7	24.41	27.60	11.5077	107.211	47.5
8	42.33	27.60	19.9548	125.131	41.4
9	50.64	27.60	23.8723	133.441	41.7
10	67.00	27.60	31.5849	149.802	39.5
11	12.98	13.80	6.1211	54.385	55.1
12	26.49	13.80	12.4870	67.889	45.8
13	39.99	13.80	18.8530	81.393	41.5
14	52.72	13.80	24.8517	94.118	38.0
15	64.92	13.80	30.6055	106.324	34.8











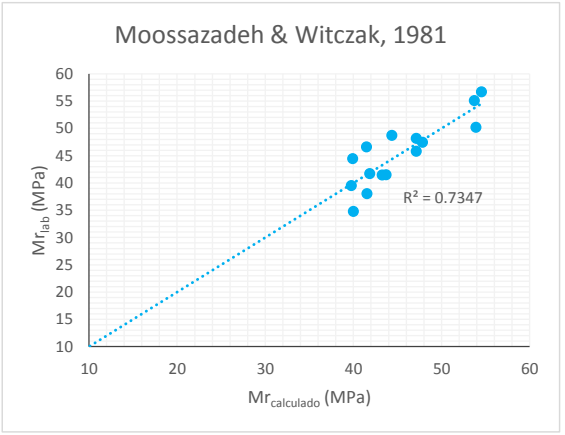
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

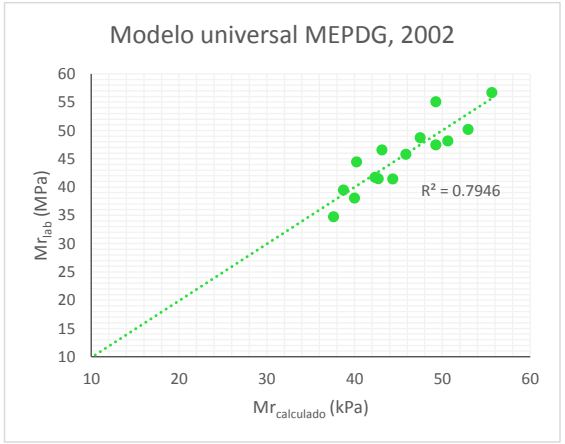
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	36.811			**k_1**	0.577	
		k_2	-0.183			**k_2**	0.124	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.731	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	56.7	54.528	2.2	4.7	56.7	55.634	1.1	1.1
2	48.2	47.126	1.0	1.1	48.2	50.630	-2.5	6.1
3	48.7	44.354	4.4	18.9	48.7	47.482	1.2	1.5
4	46.6	41.468	5.1	26.2	46.6	43.122	3.5	12.0
5	44.4	39.900	4.5	20.6	44.4	40.215	4.2	17.8
6	50.2	53.901	-3.7	13.8	50.2	52.923	-2.7	7.5
7	47.5	47.836	-0.4	0.1	47.5	49.258	-1.8	3.2
8	41.4	43.247	-1.8	3.3	41.4	44.348	-2.9	8.4
9	41.7	41.850	-0.1	0.0	41.7	42.323	-0.6	0.4
10	39.5	39.757	-0.3	0.1	39.5	38.737	0.8	0.6
11	55.1	53.702	1.4	1.9	55.1	49.246	5.8	34.1
12	45.8	47.126	-1.3	1.8	45.8	45.851	-0.1	0.0
13	41.5	43.699	-2.2	4.9	41.5	42.704	-1.2	1.5
14	38.0	41.542	-3.5	12.2	38.0	39.985	-1.9	3.8
15	34.8	39.987	-5.2	27.3	34.8	37.596	-2.8	8.1
			Σ	137.0			**Σ**	106.1





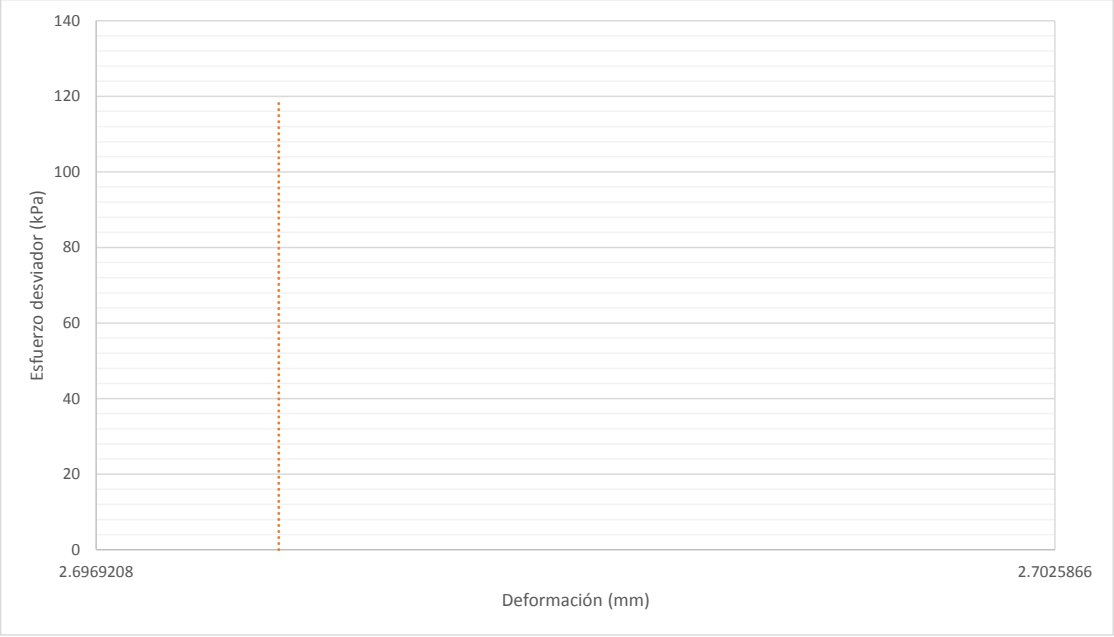
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.140
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

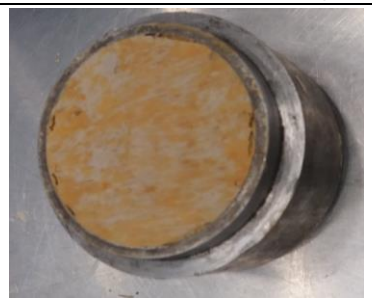
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	113.58
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	284.5
Masa recipiente + muestra seca (g)	231.05
Contenido de humedad (%)	**45.5**

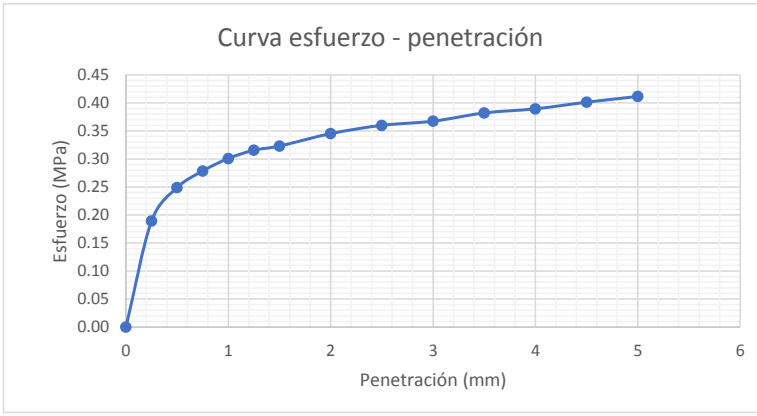
Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	3.88	0.19
0.020	0.500	5.10	0.25
0.030	0.750	5.71	0.28
0.039	1.000	6.17	0.30
0.049	1.250	6.47	0.32
0.059	1.500	6.62	0.32
0.079	2.000	7.08	0.35
0.098	2.500	7.38	0.36
0.118	3.000	7.53	0.37
0.138	3.500	7.83	0.38
0.157	4.000	7.98	0.39
0.177	4.500	8.23	0.40
0.197	5.000	8.44	0.41

Registro fotográfico





ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

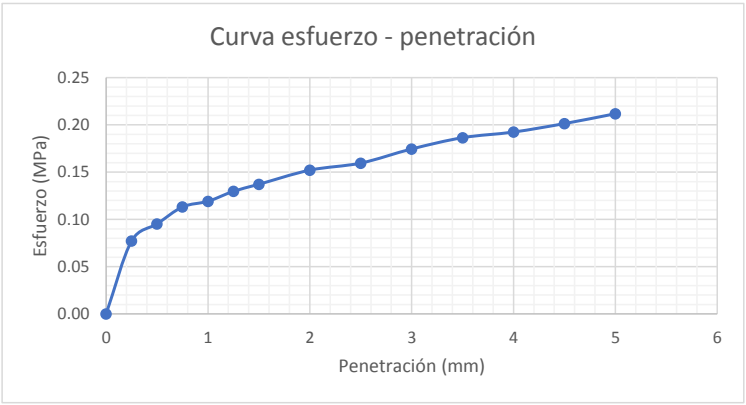
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	113.58
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	284.5
Masa recipiente + muestra seca (g)	231.05
Contenido de humedad (%)	45.50

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.58	0.08
0.020	0.500	1.95	0.10
0.030	0.750	2.32	0.11
0.039	1.000	2.44	0.12
0.049	1.250	2.66	0.13
0.059	1.500	2.81	0.14
0.079	2.000	3.12	0.15
0.098	2.500	3.27	0.16
0.118	3.000	3.58	0.17
0.138	3.500	3.82	0.19
0.157	4.000	3.94	0.19
0.177	4.500	4.13	0.20
0.197	5.000	4.34	0.21



Humedad final	
# recipiente	5
Masa recipiente (g)	91.46
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	261.12
Masa recipiente + muestra seca (g)	203.6
Contenido de humedad (%)	**51.29**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	16.6
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	51.3
Masa recipiente + suelo seco (g)	40.31
Contenido de humedad (%)	**46.4**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	165.1
Masa de la muestra parafinada (g)	172.5
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	70
Temperatura del agua (º)	15
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99910
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**94.64**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	165.1
Volumen de la muestra (cm^3)	94.64
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.74
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**17.11**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

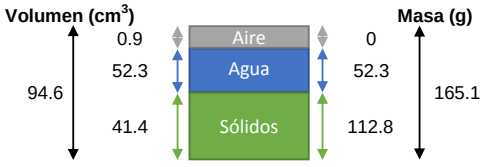
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	147.42	645.77	23.8	0.99735	499.67
2	147.41	646.47	16.5	0.99886	499.63
3	147.41	646.45	16.4	0.99888	499.60
4	147.41	646.49	16.4	0.99888	499.64
5	147.42	646.47	16.8	0.99881	499.64
Prom	**147.41**	**646.33**			**499.64**
Desv.	**0.01**	**0.31**			**0.03**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	48.54
Temperatura de ensayo (ºC)	21
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99799
Masa picnómetro vacío (g)	147.41
Volumen picnómetro (cm^3)	499.64
Masa picnómetro con agua (g)	646.05
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	676.8
Gravedad específica sin corregir	2.73
Factor de corrección	0.99979
Gravedad específica corregida	**2.73**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.29**
η (%)	**56.27**
S (%)	**98.28**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

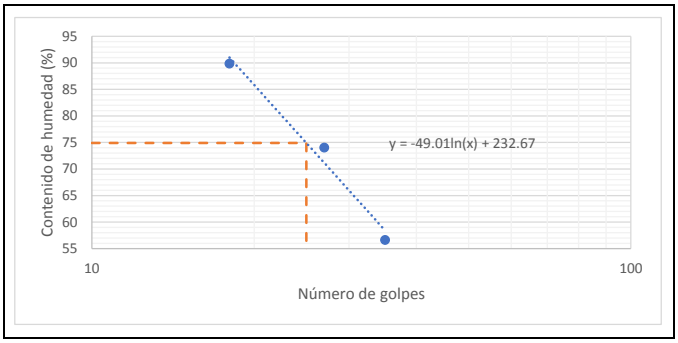
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	20	65	53
Masa del recipiente (g)	11.273	11.023	11.17
No. Golpes	18	27	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	22.808	19.535	18.78
Masa recipiente + suelo seco (g)	17.348	15.914	16.028
Contenido de humedad (%)	90	74	57



LL (%)	75

2. Determinación límite plástico

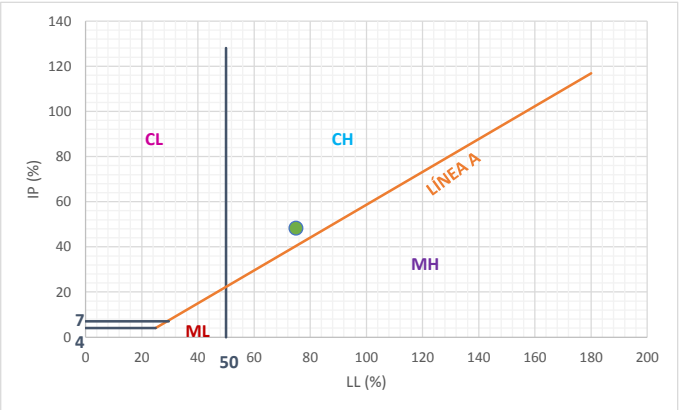
Ensayo	1	2
Número recipiente	63	9
Masa del recipiente (g)	10.832	7.562
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	16.871	14.618
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.595	13.145
Contenido de humedad (%)	27	26

LP (%)	27

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	48

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	CH

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

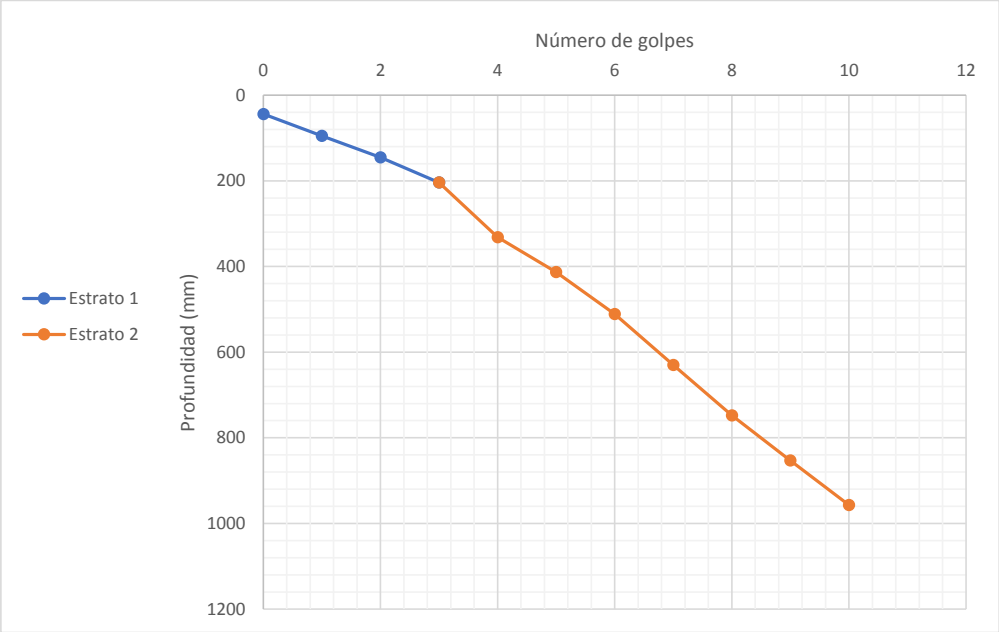
Procedencia:	Escuela Colombiana de Ingeniería
Fecha de exploración:	Julio 09 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	44	-	-	-	-
1	95	51	51	1	51
1	145	50	50	1	50
1	204	59	59	1	59
1	332	128	128	1	128
1	413	81	81	1	81
1	511	98	98	1	98
1	630	119	119	1	119
1	748	118	118	1	118
1	853	105	105	1	105
1	957	104	104	1	104

***El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestra**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	53	204
2	107	753



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe) **107**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

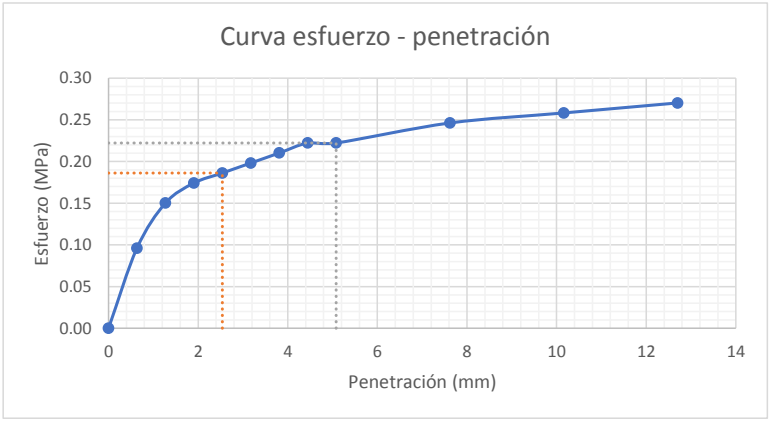
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	16.61
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	49.64
Masa recipiente + muestra seca (g)	39.2
Contenido de humedad (%)	46.2

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	18.96	0.10
0.050	1.270	29.62	0.15
0.075	1.905	34.36	0.17
0.100	2.540	36.73	0.19
0.125	3.175	39.10	0.20
0.150	3.810	41.47	0.21
0.175	4.445	43.84	0.22
0.200	5.080	43.84	0.22
0.300	7.620	48.58	0.25
0.400	10.160	50.95	0.26
0.500	12.700	53.32	0.27

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.19
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.22
$CBR_{2,54}$ (%)	2.70
$CBR_{5,08}$ (%)	2.15
CBR sin imersión (%)	**2.70**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

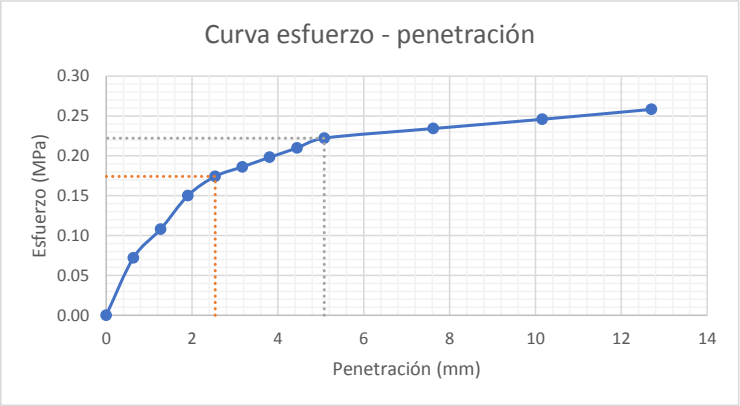
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	16.61
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	49.64
Masa recipiente + muestra seca (g)	39.2
Contenido de humedad (%)	46.2

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		4.54	
Diámetro del pistón (mm)		49.64	
Área del pistón (mm^2)		1935.32	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	14.220	0.07
0.050	1.270	21.330	0.11
0.075	1.905	29.620	0.15
0.100	2.540	34.360	0.17
0.125	3.175	36.730	0.19
0.150	3.810	39.100	0.20
0.175	4.445	41.400	0.21
0.200	5.080	43.830	0.22
0.300	7.620	46.210	0.23
0.400	10.160	48.500	0.25
0.500	12.700	50.950	0.26



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.17
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.22
$CBR_{2,54}$ (%)	2.53
$CBR_{5,08}$ (%)	2.15
CBR con inmersión (%)	**2.53**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	16.99
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	35.27
Masa recipiente + muestra seca (g)	29.31
Contenido de humedad (%)	48.4

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	146.26	146.58	146.45	146.05	146.34
Diámetro (mm)	69.03	69.03	69.84	69.4	69.33

Área (mm^2)	3774.59
Volumen (cm^3)	552.35
Masa húmeda muestra (g)	963.11
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.74

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	113	105	8	29.94	27.82	2.12	0.079	0.077	0.078	0.00053	52.19
1	41.4	12.4	50	46	4	13.25	12.19	1.06	0.030	0.029	0.030	0.00020	60.45
2	41.4	24.8	111	102	9	29.41	27.02	2.38	0.078	0.076	0.077	0.00053	51.36
3	41.4	37.3	156	142	14	41.33	37.62	3.71	0.107	0.105	0.106	0.00072	51.94
4	41.4	49.7	223	205	18	59.08	54.31	4.77	0.161	0.159	0.160	0.00109	49.67
5	41.4	62	278	253	25	73.65	67.03	6.62	0.208	0.206	0.207	0.00141	47.38
6	27.6	12.4	52	49	3	13.78	12.98	0.79	0.036	0.035	0.036	0.00024	53.51
7	27.6	24.8	104	94	10	27.55	24.90	2.65	0.073	0.071	0.072	0.00049	50.61
8	27.6	37.3	177	163	14	46.89	43.18	3.71	0.144	0.142	0.143	0.00098	44.19
9	27.6	49.7	215	195	20	56.96	51.66	5.30	0.171	0.169	0.170	0.00116	44.47
10	27.6	62	282	258	24	74.71	68.35	6.36	0.239	0.236	0.238	0.00162	42.11
11	13.8	12.4	51	50	1	13.51	13.25	0.26	0.033	0.033	0.033	0.00023	58.74
12	13.8	24.8	111	102	9	29.41	27.02	2.38	0.082	0.080	0.081	0.00055	48.82
13	13.8	37.3	168	154	14	44.51	40.80	3.71	0.136	0.134	0.135	0.00092	44.22
14	13.8	49.7	222	203	19	58.81	53.78	5.03	0.195	0.193	0.194	0.00133	40.57
15	13.8	62	275	250	25	72.86	66.23	6.62	0.263	0.260	0.262	0.00179	37.06

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.95
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1079.06
Masa recipiente + muestra seca (g)	775.8
Masa del agua (g)	303.26
Masa material seco (g)	659.85
Masa material húmedo (g)	963.11
Humedad (%)	45.96

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.95
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1079.06
Masa recipiente + muestra seca (g)	775.8
Masa del agua (g)	303.26
Masa material seco (g)	659.85
Masa material húmedo (g)	963.11
Humedad (%)	45.96

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

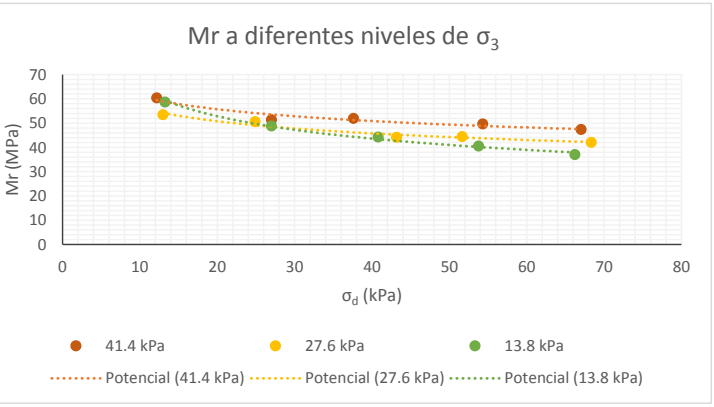
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

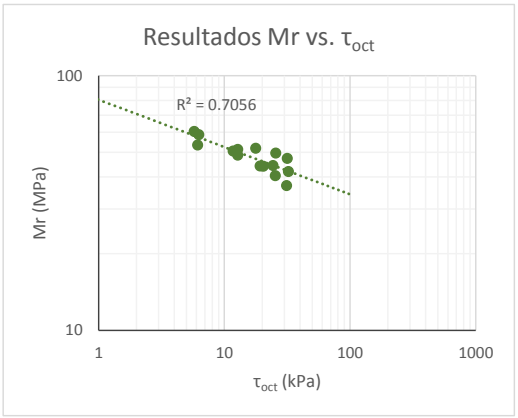
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

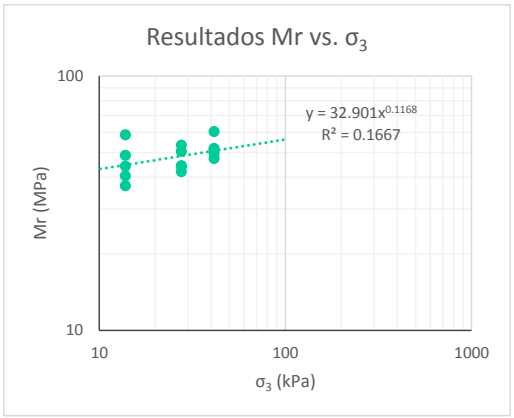
Ecuaciones

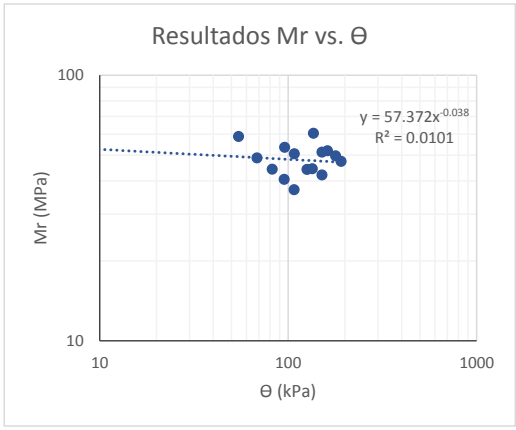
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

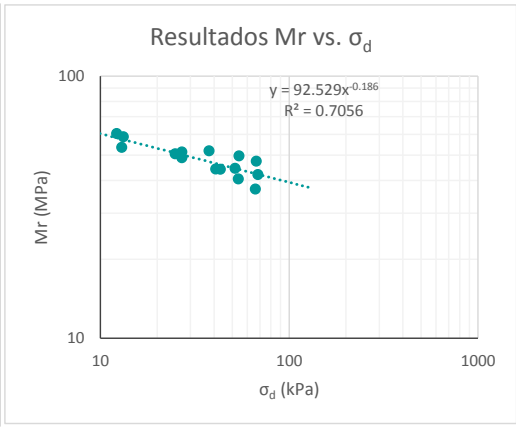
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	12.19	41.40	5.7449	136.387	60.5
2	27.02	41.40	12.7387	151.223	51.4
3	37.62	41.40	17.7342	161.820	51.9
4	54.31	41.40	25.6022	178.511	49.7
5	67.03	41.40	31.5969	191.227	47.4
6	12.98	27.60	6.1196	95.782	53.5
7	24.90	27.60	11.7396	107.703	50.6
8	43.18	27.60	20.3569	125.984	44.2
9	51.66	27.60	24.3534	134.461	44.5
10	68.35	27.60	32.2214	151.152	42.1
11	13.25	13.80	6.2444	54.646	58.7
12	27.02	13.80	12.7387	68.423	48.8
13	40.80	13.80	19.2329	82.199	44.2
14	53.78	13.80	25.3525	95.181	40.6
15	66.23	13.80	31.2222	107.632	37.1











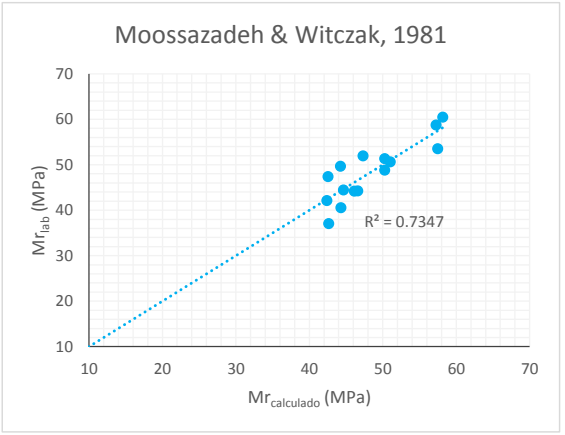
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

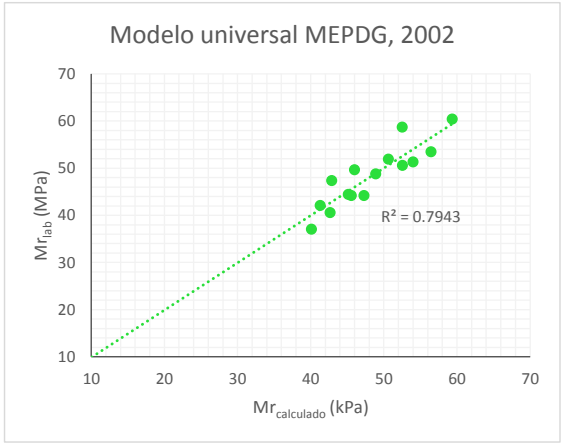
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	39.395			**k_1**	0.616	
		k_2	-0.183			**k_2**	0.125	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.706	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	60.5	58.144	2.3	5.3	60.5	59.327	1.1	1.3
2	51.4	50.251	1.1	1.2	51.4	53.982	-2.6	6.9
3	51.9	47.295	4.6	21.5	51.9	50.621	1.3	1.7
4	49.7	44.218	5.5	29.7	49.7	45.972	3.7	13.7
5	47.4	42.546	4.8	23.4	47.4	42.875	4.5	20.3
6	53.5	57.475	-4.0	15.7	53.5	56.434	-2.9	8.5
7	50.6	51.008	-0.4	0.2	50.6	52.522	-1.9	3.6
8	44.2	46.115	-1.9	3.7	44.2	47.284	-3.1	9.6
9	44.5	44.625	-0.2	0.0	44.5	45.126	-0.7	0.4
10	42.1	42.393	-0.3	0.1	42.1	41.305	0.8	0.7
11	58.7	57.263	1.5	2.2	58.7	52.515	6.2	38.8
12	48.8	50.251	-1.4	2.0	48.8	48.897	-0.1	0.0
13	44.2	46.597	-2.4	5.6	44.2	45.543	-1.3	1.7
14	40.6	44.297	-3.7	13.9	40.6	42.646	-2.1	4.3
15	37.1	42.639	-5.6	31.1	37.1	40.100	-3.0	9.2
			Σ	155.8			**Σ**	120.8





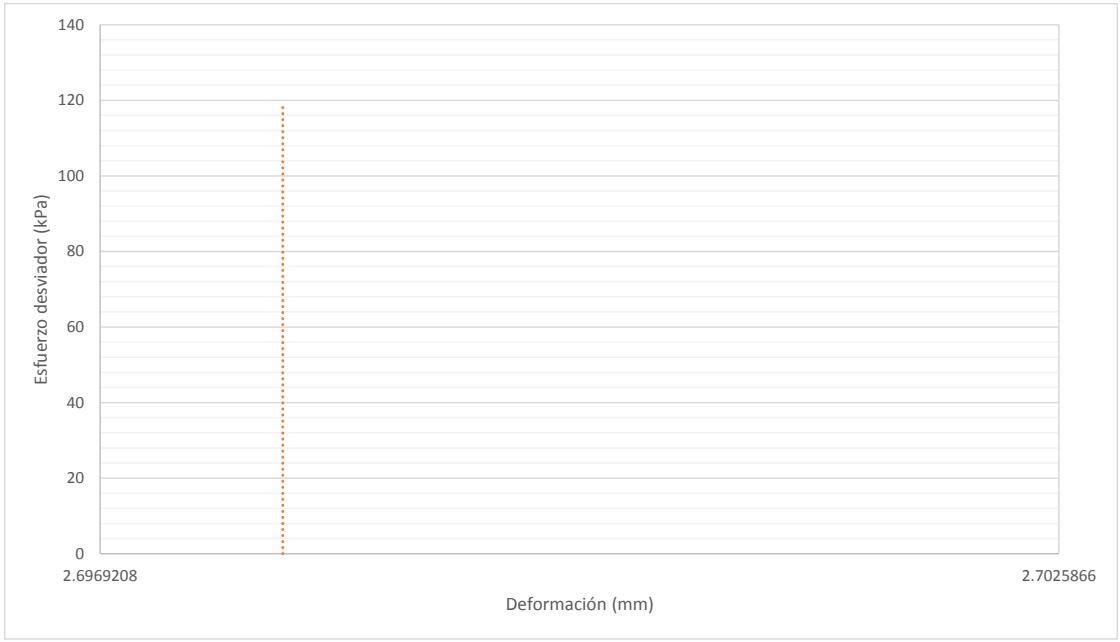
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.146
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

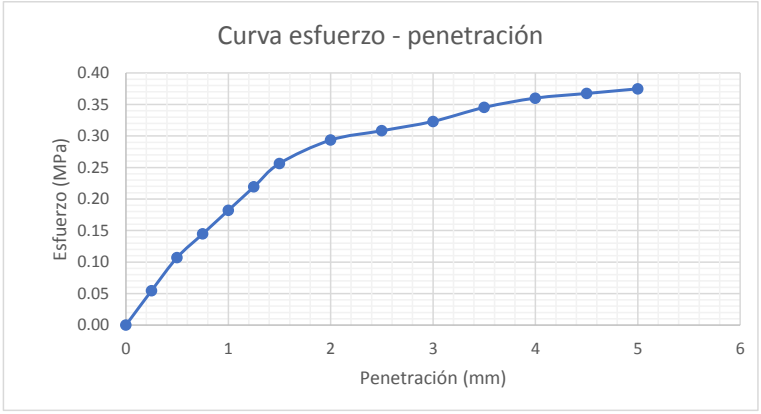
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	129.78
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	300.46
Masa recipiente + muestra seca (g)	247.81
Contenido de humedad (%)	**44.6**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.12	0.05
0.020	0.500	2.20	0.11
0.030	0.750	2.96	0.14
0.039	1.000	3.73	0.18
0.049	1.250	4.49	0.22
0.059	1.500	5.26	0.26
0.079	2.000	6.02	0.29
0.098	2.500	6.32	0.31
0.118	3.000	6.62	0.32
0.138	3.500	7.08	0.35
0.157	4.000	7.38	0.36
0.177	4.500	7.53	0.37
0.197	5.000	7.68	0.37

Registro fotográfico



0.00
2.96
4.19
5.26
6.02
6.32
6.62

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

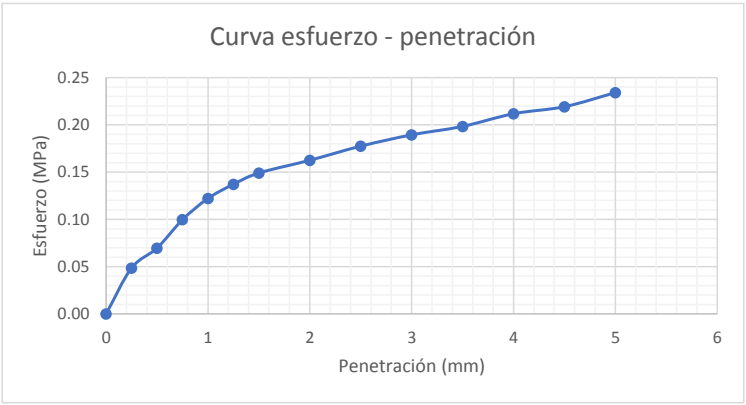
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 7 y 8 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	129.78
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	300.46
Masa recipiente + muestra seca (g)	247.81
Contenido de humedad (%)	44.61

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.00	0.05
0.020	0.500	1.43	0.07
0.030	0.750	2.04	0.10
0.039	1.000	2.50	0.12
0.049	1.250	2.81	0.14
0.059	1.500	3.06	0.15
0.079	2.000	3.33	0.16
0.098	2.500	3.64	0.18
0.118	3.000	3.88	0.19
0.138	3.500	4.07	0.20
0.157	4.000	4.34	0.21
0.177	4.500	4.49	0.22
0.197	5.000	4.80	0.23



Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.37
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	285.22
Masa recipiente + muestra seca (g)	229.3
Contenido de humedad (%)	**49.08**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	109.2
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	206.4
Masa recipiente + suelo seco (g)	176.7
Contenido de humedad (%)	**44.0**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	139.8
Masa de la muestra parafinada (g)	147.6
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	60
Temperatura del agua (º)	15
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99910
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**79.29**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	139.8
Volumen de la muestra (cm^3)	79.29
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.76
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**17.30**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

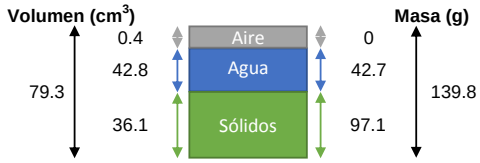
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	147.42	645.77	23.8	0.99735	499.67
2	147.41	646.47	16.5	0.99886	499.63
3	147.41	646.45	16.4	0.99888	499.60
4	147.41	646.49	16.4	0.99888	499.64
5	147.42	646.47	16.8	0.99881	499.64
Prom	**147.41**	**646.33**			**499.64**
Desv.	**0.01**	**0.31**			**0.03**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	48.64
Temperatura de ensayo (ºC)	20.5
Densidad del agua (g/cm^3)	0.9981
Masa picnómetro vacío (g)	147.41
Volumen picnómetro (cm^3)	499.64
Masa picnómetro con agua (g)	646.10
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	676.65
Gravedad específica sin corregir	2.69
Factor de corrección	0.99990
Gravedad específica corregida	**2.69**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.19**
η (%)	**54.41**
S (%)	**99.10**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

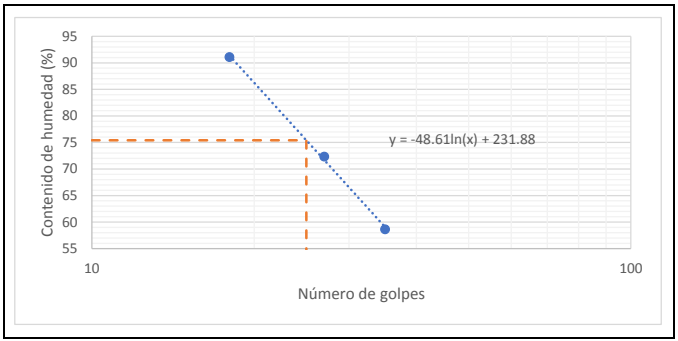
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	20	65	53
Masa del recipiente (g)	11.275	11.025	11.19
No. Golpes	18	27	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	24.808	21.535	20.78
Masa recipiente + suelo seco (g)	18.356	17.123	17.235
Contenido de humedad (%)	91	72	59



LL (%)	**75**

2. Determinación límite plástico

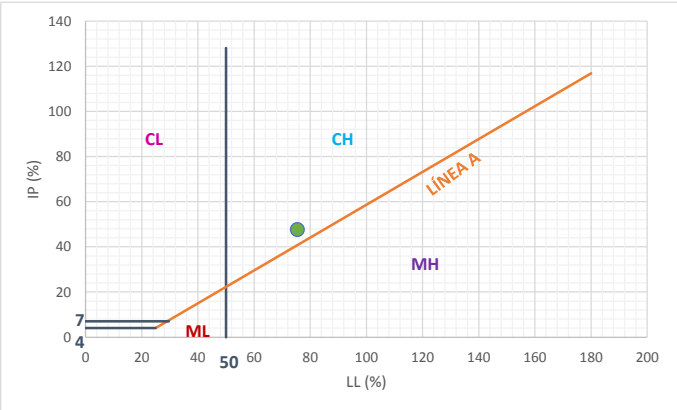
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	63	9
Masa del recipiente (g)	10.832	7.562
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	20.871	16.618
Masa recipiente + suelo seco (g)	18.652	14.689
Contenido de humedad (%)	28	27

LP (%)	**28**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**48**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**CH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

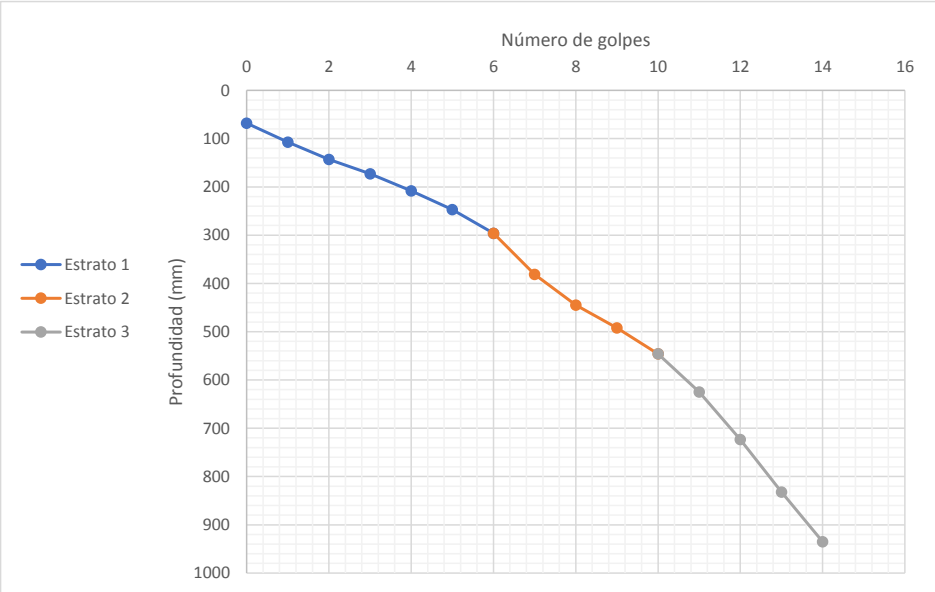
Procedencia:	Escuela Colombiana de Ingeniería
Fecha de exploración:	Julio 09 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	68	-	-	-	-
1	107	39	39	1	39
1	143	36	36	1	36
1	173	30	30	1	30
1	208	35	35	1	35
1	247	39	39	1	39
1	296	49	49	1	49
1	381	85	85	1	85
1	445	64	64	1	64
1	492	47	47	1	47
1	546	54	54	1	54
1	625	79	79	1	79
1	723	98	98	1	98
1	832	109	109	1	109
1	935	103	103	1	103

***El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestra**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	37	296
2	61	250
3	99	685



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe) **99**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

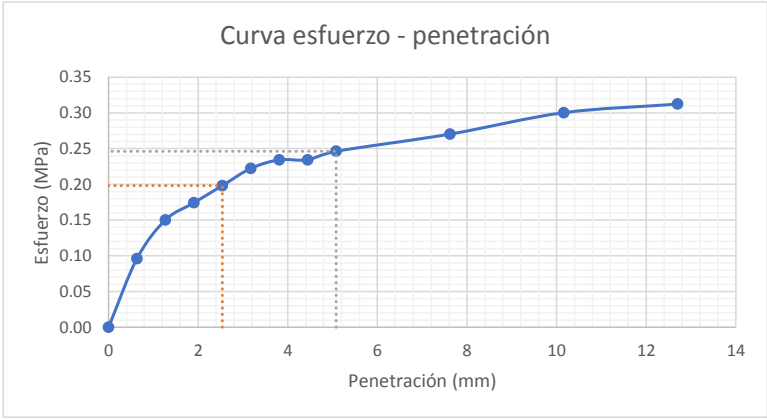
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	16.84
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	30.79
Masa recipiente + muestra seca (g)	26.4
Contenido de humedad (%)	45.9

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	18.96	0.10
0.050	1.270	29.62	0.15
0.075	1.905	34.36	0.17
0.100	2.540	39.10	0.20
0.125	3.175	43.84	0.22
0.150	3.810	46.21	0.23
0.175	4.445	46.21	0.23
0.200	5.080	48.58	0.25
0.300	7.620	53.32	0.27
0.400	10.160	59.24	0.30
0.500	12.700	61.61	0.31

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.20
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.25
$CBR_{2,54}$ (%)	2.88
$CBR_{5,08}$ (%)	2.38
CBR sin imersión (%)	**2.88**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

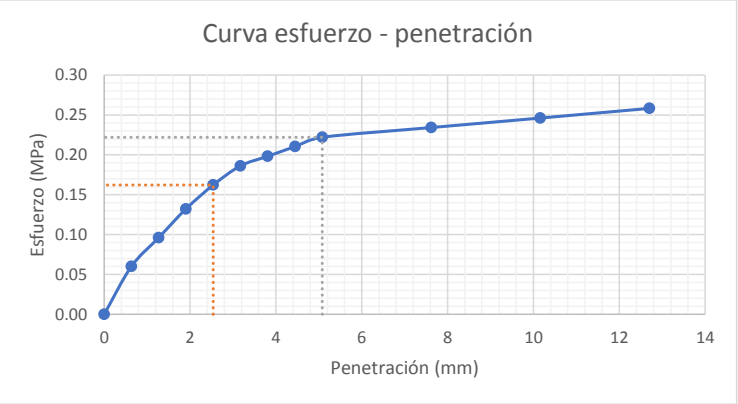
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	16.84
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	30.79
Masa recipiente + muestra seca (g)	26.4
Contenido de humedad (%)	45.9

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		4.54	
Diámetro del pistón (mm)		49.64	
Área del pistón (mm^2)		1935.32	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	11.850	0.06
0.050	1.270	18.960	0.10
0.075	1.905	26.070	0.13
0.100	2.540	31.990	0.16
0.125	3.175	36.730	0.19
0.150	3.810	39.100	0.20
0.175	4.445	41.500	0.21
0.200	5.080	43.800	0.22
0.300	7.620	46.210	0.23
0.400	10.160	48.560	0.25
0.500	12.700	50.950	0.26



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.16
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.22
$CBR_{2,54}$ (%)	2.35
$CBR_{5,08}$ (%)	2.15
CBR con inmersión (%)	**2.35**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	18.03
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	46.13
Masa recipiente + muestra seca (g)	37.1
Contenido de humedad (%)	47.4

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	149.12	150.07	149.02	149.92	149.53
Diámetro (mm)	68.8	69.03	69.4	69.43	69.17

Área (mm^2)	3757.19
Volumen (cm^3)	561.82
Masa húmeda muestra (g)	979.9
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.74

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	95	86	9	25.28	22.89	2.40	0.057	0.056	0.057	0.00038	60.58
1	41.4	12.4	42	39	3	11.18	10.38	0.80	0.029	0.029	0.029	0.00019	53.52
2	41.4	24.8	93	84	9	24.75	22.36	2.40	0.080	0.079	0.080	0.00053	42.05
3	41.4	37.3	148	135	13	39.39	35.93	3.46	0.160	0.159	0.160	0.00107	33.69
4	41.4	49.7	205	186	19	54.56	49.51	5.06	0.185	0.184	0.185	0.00123	40.12
5	41.4	62	239	215	24	63.61	57.22	6.39	0.244	0.243	0.244	0.00163	35.14
6	27.6	12.4	42	40	2	11.18	10.65	0.53	0.034	0.034	0.034	0.00023	46.82
7	27.6	24.8	97	89	8	25.82	23.69	2.13	0.098	0.098	0.098	0.00066	36.14
8	27.6	37.3	150	137	13	39.92	36.46	3.46	0.130	0.129	0.130	0.00087	42.10
9	27.6	49.7	202	183	19	53.76	48.71	5.06	0.187	0.186	0.187	0.00125	39.05
10	27.6	62	248	223	25	66.01	59.35	6.65	0.241	0.240	0.241	0.00161	36.90
11	13.8	12.4	40	37	3	10.65	9.85	0.80	0.024	0.024	0.024	0.00016	61.36
12	13.8	24.8	99	91	8	26.35	24.22	2.13	0.095	0.094	0.095	0.00063	38.33
13	13.8	37.3	156	142	14	41.52	37.79	3.73	0.132	0.130	0.131	0.00088	43.14
14	13.8	49.7	204	186	18	54.30	49.51	4.79	0.192	0.191	0.192	0.00128	38.66
15	13.8	62	248	224	24	66.01	59.62	6.39	0.232	0.231	0.232	0.00155	38.51

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.7
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1095.6
Masa recipiente + muestra seca (g)	786.3
Masa del agua (g)	309.3
Masa material seco (g)	670.6
Masa material húmedo (g)	979.9
Humedad (%)	46.12

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.7
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1095.5
Masa recipiente + muestra seca (g)	786.3
Masa del agua (g)	309.2
Masa material seco (g)	670.6
Masa material húmedo (g)	979.8
Humedad (%)	46.11

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

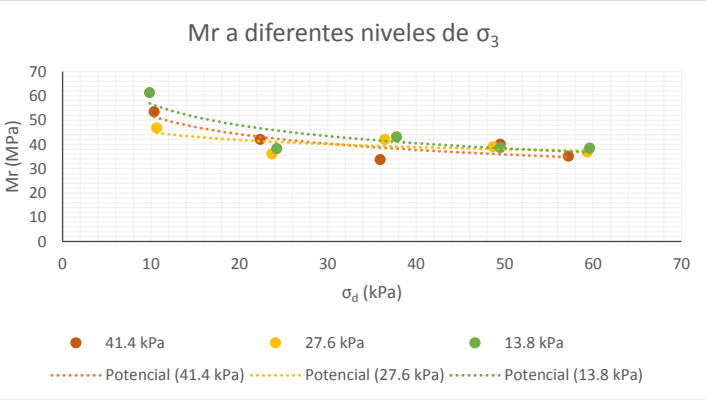
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

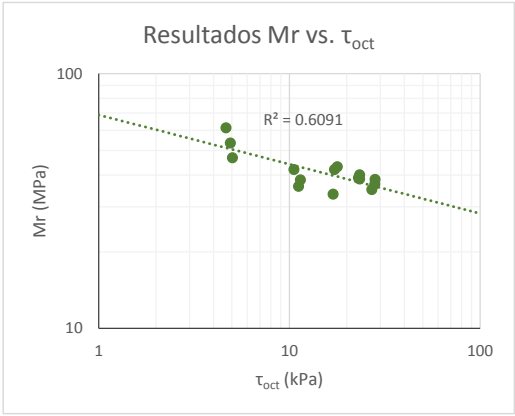
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

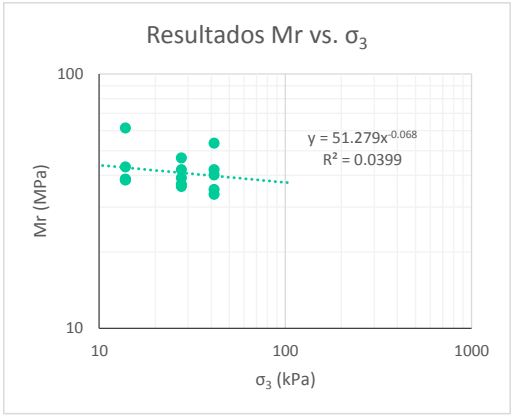
Ecuaciones

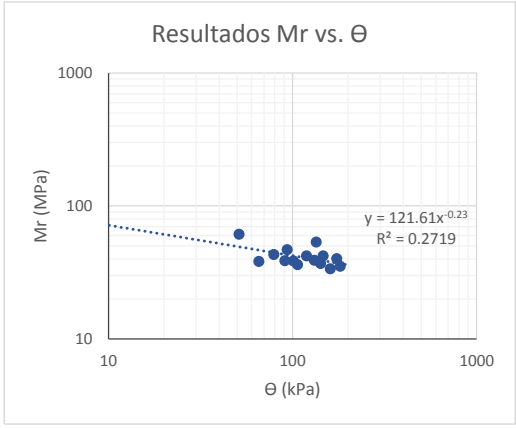
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

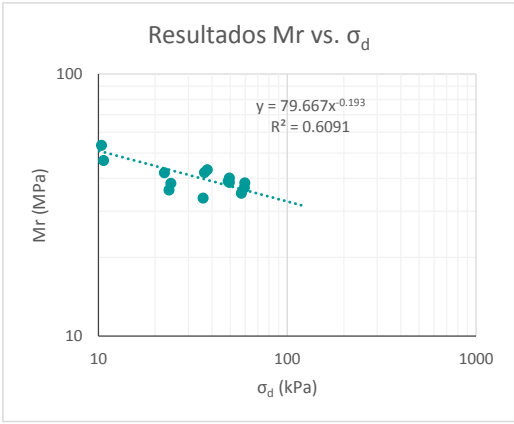
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	10.38	41.40	4.8932	134.580	53.5
2	22.36	41.40	10.5393	146.557	42.1
3	35.93	41.40	16.9381	160.131	33.7
4	49.51	41.40	23.3369	173.705	40.1
5	57.22	41.40	26.9755	181.424	35.1
6	10.65	27.60	5.0187	93.446	46.8
7	23.69	27.60	11.1666	106.488	36.1
8	36.46	27.60	17.1890	119.263	42.1
9	48.71	27.60	22.9605	131.507	39.1
10	59.35	27.60	27.9792	142.153	36.9
11	9.85	13.80	4.6423	51.248	61.4
12	24.22	13.80	11.4175	65.620	38.3
13	37.79	13.80	17.8164	79.194	43.1
14	49.51	13.80	23.3369	90.905	38.7
15	59.62	13.80	28.1047	101.019	38.5











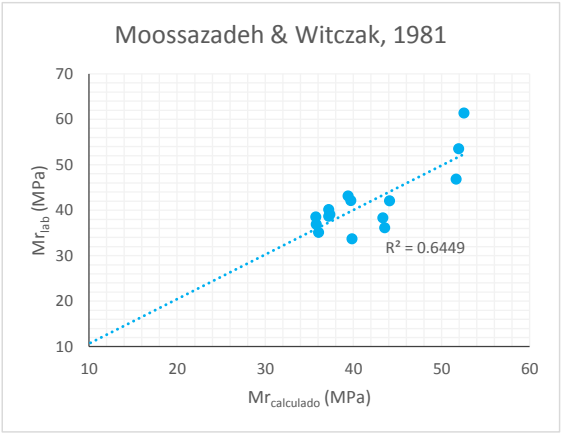
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

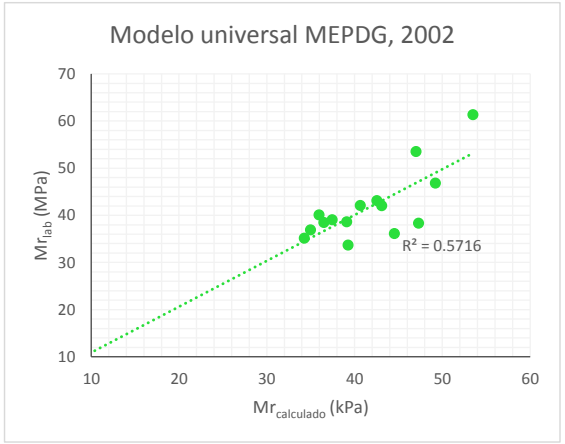
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	31.863			**k_1**	0.512	
		k_2	-0.214			**k_2**	-0.130	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.476	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	53.5	51.941	1.6	2.5	53.5	47.000	6.5	42.6
2	42.1	44.081	-2.0	4.1	42.1	43.081	-1.0	1.1
3	33.7	39.828	-6.1	37.7	33.7	39.250	-5.6	31.0
4	40.1	37.190	2.9	8.6	40.1	35.947	4.2	17.4
5	35.1	36.056	-0.9	0.8	35.1	34.266	0.9	0.8
6	46.8	51.661	-4.8	23.4	46.8	49.196	-2.4	5.6
7	36.1	43.540	-7.4	54.7	36.1	44.540	-8.4	70.5
8	42.1	39.703	2.4	5.8	42.1	40.656	1.4	2.1
9	39.1	37.320	1.7	3.0	39.1	37.436	1.6	2.6
10	36.9	35.775	1.1	1.3	36.9	34.967	1.9	3.7
11	61.4	52.529	8.8	77.9	61.4	53.467	7.9	62.2
12	38.3	43.333	-5.0	25.1	38.3	47.277	-9.0	80.1
13	43.1	39.400	3.7	14.0	43.1	42.546	0.6	0.4
14	38.7	37.190	1.5	2.1	38.7	39.102	-0.4	0.2
15	38.5	35.741	2.8	7.7	38.5	36.502	2.0	4.0
			Σ	268.8			**Σ**	324.3





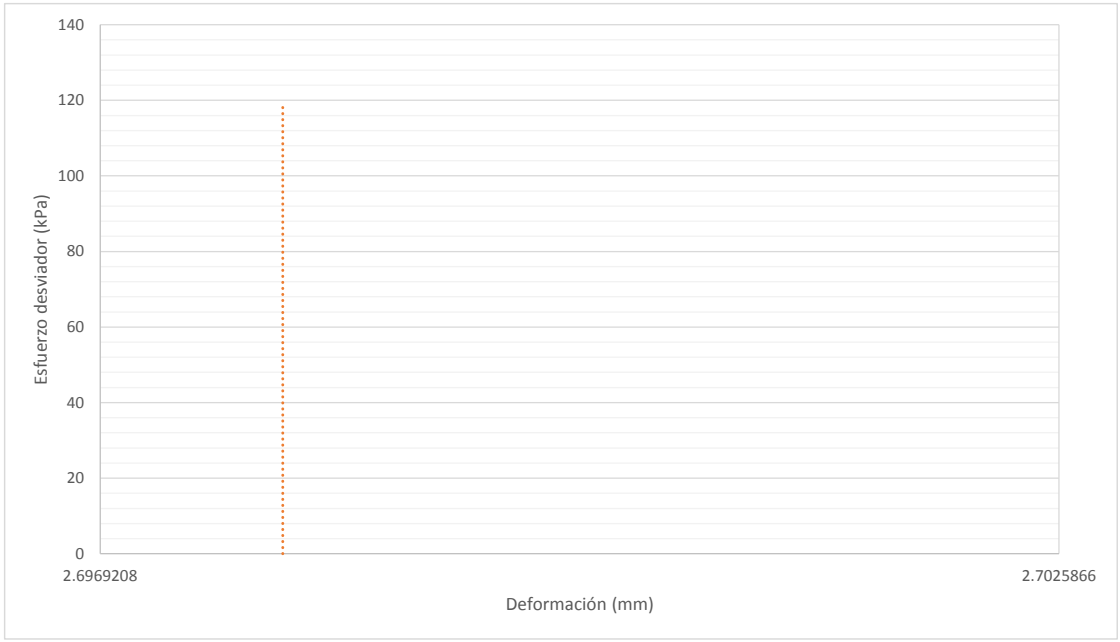
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.150
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

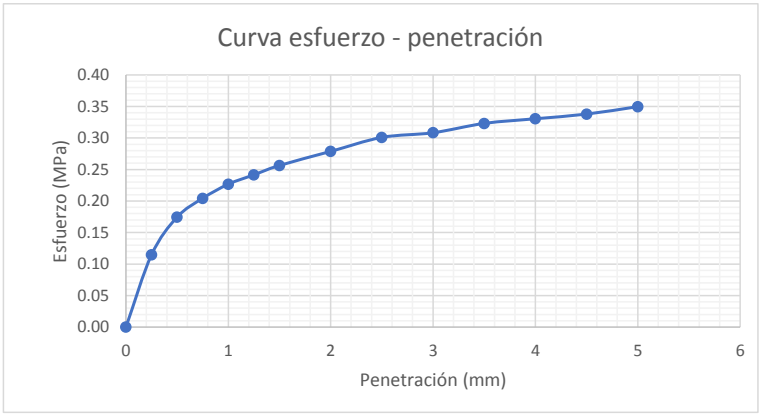
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	91.2
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	270.2
Masa recipiente + muestra seca (g)	214
Contenido de humedad (%)	**45.8**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	2.35	0.11
0.020	0.500	3.58	0.17
0.030	0.750	4.19	0.20
0.039	1.000	4.65	0.23
0.049	1.250	4.95	0.24
0.059	1.500	5.26	0.26
0.079	2.000	5.71	0.28
0.098	2.500	6.17	0.30
0.118	3.000	6.32	0.31
0.138	3.500	6.62	0.32
0.157	4.000	6.77	0.33
0.177	4.500	6.93	0.34
0.197	5.000	7.17	0.35

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

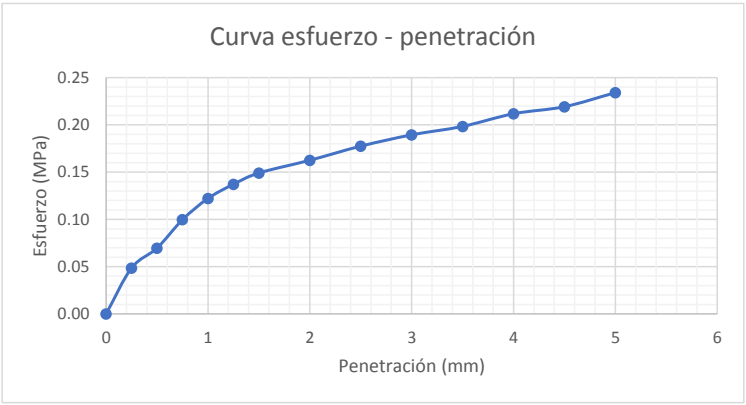
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	91.2
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	270.2
Masa recipiente + muestra seca (g)	214
Contenido de humedad (%)	45.77

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.00	0.05
0.020	0.500	1.43	0.07
0.030	0.750	2.04	0.10
0.039	1.000	2.50	0.12
0.049	1.250	2.81	0.14
0.059	1.500	3.06	0.15
0.079	2.000	3.33	0.16
0.098	2.500	3.64	0.18
0.118	3.000	3.88	0.19
0.138	3.500	4.07	0.20
0.157	4.000	4.34	0.21
0.177	4.500	4.49	0.22
0.197	5.000	4.80	0.23



Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	129.3
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	300.6
Masa recipiente + muestra seca (g)	0
Contenido de humedad (%)	**-232.48**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Registro fotográfico

1. Determinación del contenido de humedad

Masa del recipiente (g)	129.6
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	261.9
Masa recipiente + suelo seco (g)	219.3
Contenido de humedad (%)	**47.5**

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	133.7
Masa de la muestra parafinada (g)	140.4
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	55.8
Temperatura del agua (º)	15
Densidad del agua (g/cm^3)	0.99910
Densidad de la parafina (gr/cm^3)	0.93
Volumen de la muestra (cm^3)	**77.47**

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	133.7
Volumen de la muestra (cm^3)	77.47
Densidad de la muestra (gr/cm^3)	1.73
Peso unitario de la muestra (kN/m^3)	**16.93**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO
INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

4. Calibración del picnómetro

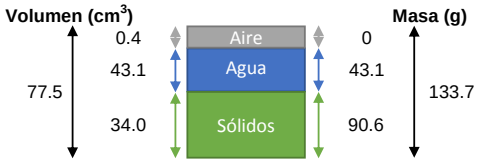
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm^3)	V. picnómetro (cm^3)
1	147.42	645.77	23.8	0.99735	499.67
2	147.41	646.47	16.5	0.99886	499.63
3	147.41	646.45	16.4	0.99888	499.60
4	147.41	646.49	16.4	0.99888	499.64
5	147.42	646.47	16.8	0.99881	499.64
Prom	**147.41**	**646.33**			**499.64**
Desv.	**0.01**	**0.31**			**0.03**

***Calibración realizada en agosto de 2018**

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.1
Temperatura de ensayo (ºC)	20.5
Densidad del agua (g/cm^3)	0.9981
Masa picnómetro vacío (g)	147.41
Volumen picnómetro (cm^3)	499.64
Masa picnómetro con agua (g)	646.10
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	676.8
Gravedad específica sin corregir	2.67
Factor de corrección	0.99990
Gravedad específica corregida	**2.67**

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	**1.28**
η (%)	**56.10**
S (%)	**99.14**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

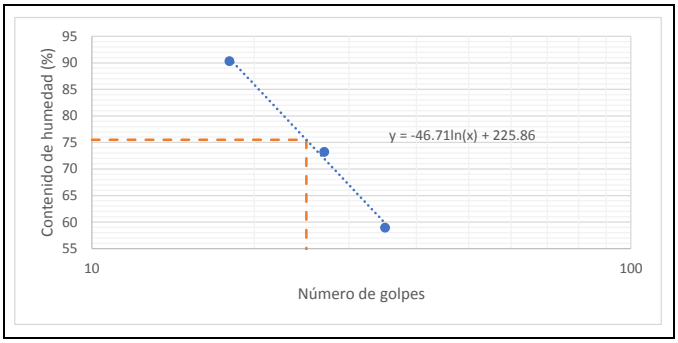
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS
INV - E- 125/126/181

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

1. Determinación límite líquido

Punto	**1**	**2**	**3**
Número de recipiente	20	65	53
Masa del recipiente (g)	11.273	11.023	11.17
No. Golpes	18	27	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	23.808	20.533	19.78
Masa recipiente + suelo seco (g)	17.859	16.512	16.586
Contenido de humedad (%)	90	73	59



LL (%)	**76**

2. Determinación límite plástico

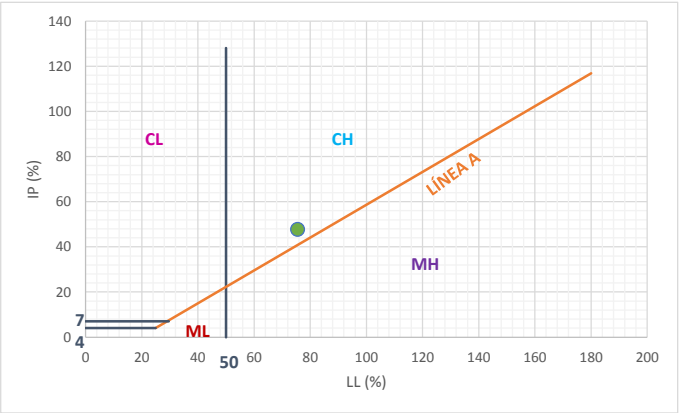
Ensayo	**1**	**2**
Número recipiente	63	9
Masa del recipiente (g)	10.83	7.561
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	19.871	15.618
Masa recipiente + suelo seco (g)	17.925	13.852
Contenido de humedad (%)	27	28

LP (%)	**28**

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	**48**

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	**CH**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

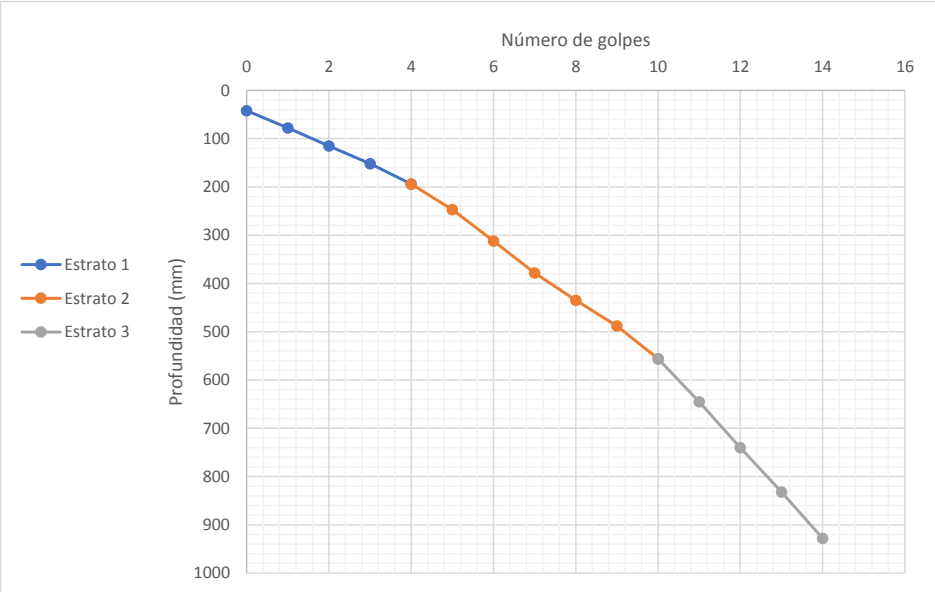
Procedencia:	Escuela Colombiana de Ingeniería
Fecha de exploración:	Julio 09 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	42	-	-	-	-
1	78	36	36	1	36
1	115	37	37	1	37
1	152	37	37	1	37
1	194	42	42	1	42
1	247	53	53	1	53
1	312	65	65	1	65
1	378	66	66	1	66
1	435	57	57	1	57
1	488	53	53	1	53
1	556	68	68	1	68
1	645	89	89	1	89
1	740	95	95	1	95
1	832	92	92	1	92
1	928	96	96	1	96

***El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestra**

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	38	247
2	60	309
3	93	619



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe) **60**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

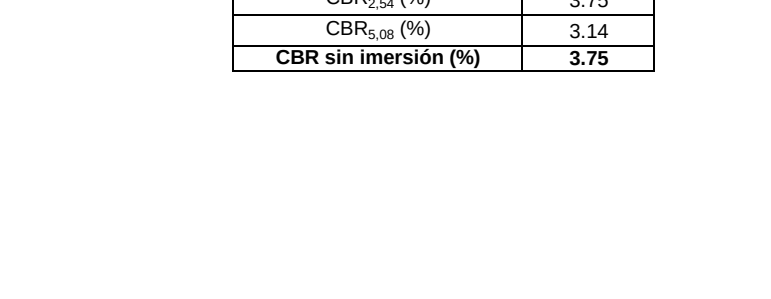
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	17.74
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	38.62
Masa recipiente + muestra seca (g)	31.99
Contenido de humedad (%)	46.5

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.025	0.635	29.62	0.15
0.050	1.270	39.10	0.20
0.075	1.905	46.21	0.23
0.100	2.540	50.95	0.26
0.125	3.175	53.32	0.27
0.150	3.810	59.24	0.30
0.175	4.445	61.61	0.31
0.200	5.080	63.98	0.32
0.300	7.620	71.09	0.36
0.400	10.160	75.83	0.38
0.500	12.700	78.20	0.40

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.26
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.32
$CBR_{2,54}$ (%)	3.75
$CBR_{5,08}$ (%)	3.14
CBR sin imersión (%)	**3.75**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

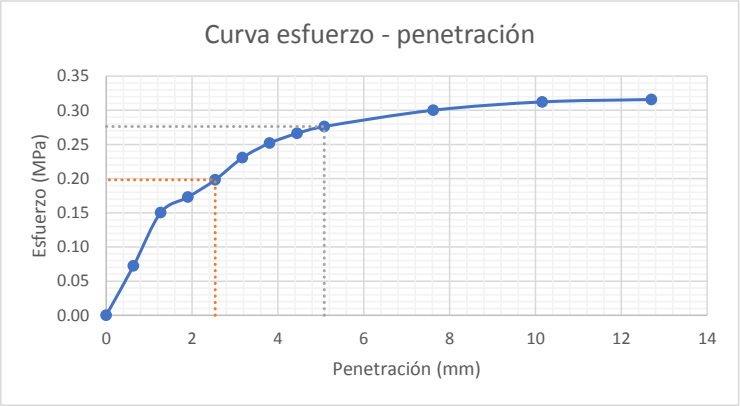
ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	17.74
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	38.62
Masa recipiente + muestra seca (g)	31.99
Contenido de humedad (%)	46.5

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0
Expansión (%)	0.00

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	4.54
Diámetro del pistón (mm)	49.64
Área del pistón (mm^2)	1935.32

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.000	0.00
0.025	0.635	14.220	0.07
0.050	1.270	29.620	0.15
0.075	1.905	34.100	0.17
0.100	2.540	39.100	0.20
0.125	3.175	45.500	0.23
0.150	3.810	49.700	0.25
0.175	4.445	52.500	0.27
0.200	5.080	54.500	0.28
0.300	7.620	59.200	0.30
0.400	10.160	61.600	0.31
0.500	12.700	62.300	0.32



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.20
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.28
$CBR_{2,54}$ (%)	2.88
$CBR_{5,08}$ (%)	2.67
CBR con inmersión (%)	**2.88**

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	7.09
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	22.22
Masa recipiente + muestra seca (g)	17.32
Contenido de humedad (%)	47.9

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Datos de la muestra antes del ensayo					
Dato	**1**	**2**	**3**	**4**	**Prom (mm)**
Altura (mm)	154.02	153.7	153.97	154.02	153.93
Diámetro (mm)	70	69.86	69.07	69.45	69.60

Área (mm^2)	3804.05
Volumen (cm^3)	585.55
Masa húmeda muestra (g)	1029.6
Densidad húmeda aprox. (g/cm^3)	1.76

Ciclo	**Norma**		**Ensayo**										
	Presión de cámara (kPa)	**Esfuerzo cíclico (kPa)**	**Carga máxima real (N)**	**Carga cíclica real (N)**	**Carga de contacto real (N)**	**Esfuerzo máximo real (kPa)**	**Esfuerzo cíclico real (kPa)**	**Esfuerzo de contacto real (kPa)**	**Deformación resiliente LVDT1 (mm)**	**Deformación resiliente LVDT2 (mm)**	**Deformación resiliente prom (mm)**	**Deformación resiliente unitaria**	**Módulo resiliente (MPa)**
	S_3	$S_{cíclico}$	P_{max}	$P_{cíclico}$	$P_{contacto}$	$S_{max\ r}$	$S_{ciclico\ r}$	$S_{contacto\ r}$	H_1	H_2	$H_{promedio}$	ε_r	M_r
0	41.4	24.8	110	101	9	28.92	26.55	2.37	0.081	0.083	0.082	0.00053	49.84
1	41.4	12.4	45	41	4	11.83	10.78	1.05	0.028	0.028	0.028	0.00018	59.25
2	41.4	24.8	111	102	9	29.18	26.81	2.37	0.082	0.084	0.083	0.00054	49.73
3	41.4	37.3	159	146	13	41.80	38.38	3.42	0.147	0.150	0.149	0.00096	39.78
4	41.4	49.7	201	182	19	52.84	47.84	4.99	0.160	0.162	0.161	0.00105	45.74
5	41.4	62	268	244	24	70.45	64.14	6.31	0.237	0.238	0.238	0.00154	41.57
6	27.6	12.4	53	49	4	13.93	12.88	1.05	0.037	0.037	0.037	0.00024	53.59
7	27.6	24.8	115	107	8	30.23	28.13	2.10	0.084	0.085	0.085	0.00055	51.24
8	27.6	37.3	161	147	14	42.32	38.64	3.68	0.125	0.126	0.126	0.00082	47.40
9	27.6	49.7	218	199	19	57.31	52.31	4.99	0.170	0.171	0.171	0.00111	47.23
10	27.6	62	256	231	25	67.30	60.72	6.57	0.222	0.222	0.222	0.00144	42.10
11	13.8	12.4	56	52	4	14.72	13.67	1.05	0.039	0.040	0.040	0.00026	53.27
12	13.8	24.8	102	93	9	26.81	24.45	2.37	0.082	0.083	0.083	0.00054	45.61
13	13.8	37.3	194	180	14	51.00	47.32	3.68	0.168	0.169	0.169	0.00109	43.23
14	13.8	49.7	214	194	20	56.26	51.00	5.26	0.182	0.172	0.177	0.00115	44.35
15	13.8	62	256	232	24	67.30	60.99	6.31	0.221	0.219	0.220	0.00143	42.67

Datos de humedad al incio del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.1
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1144.7
Masa recipiente + muestra seca (g)	830.8
Masa del agua (g)	313.9
Masa material seco (g)	715.7
Masa material húmedo (g)	1029.6
Humedad (%)	43.86

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	115.1
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1144
Masa recipiente + muestra seca (g)	830.8
Masa del agua (g)	313.2
Masa material seco (g)	715.7
Masa material húmedo (g)	1028.9
Humedad (%)	43.76

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

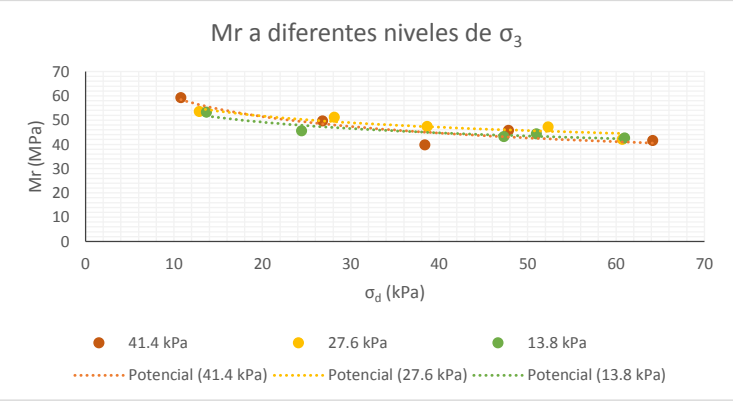
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

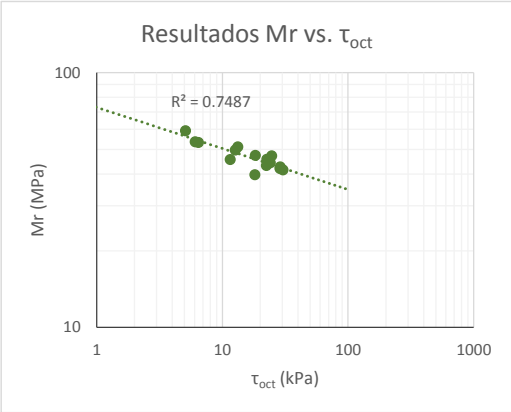
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

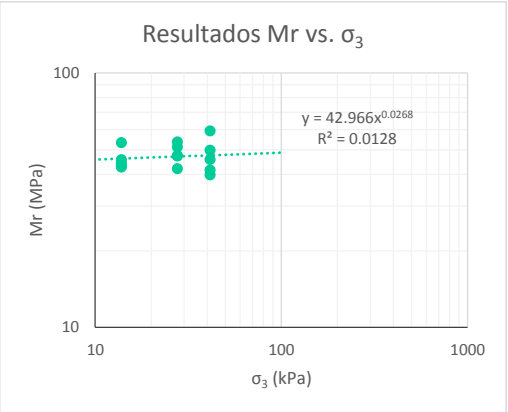
Ecuaciones

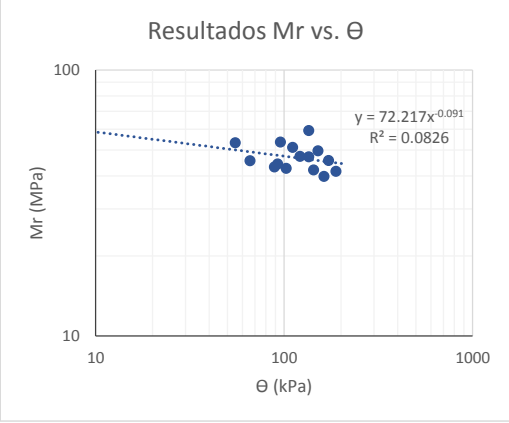
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \qquad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

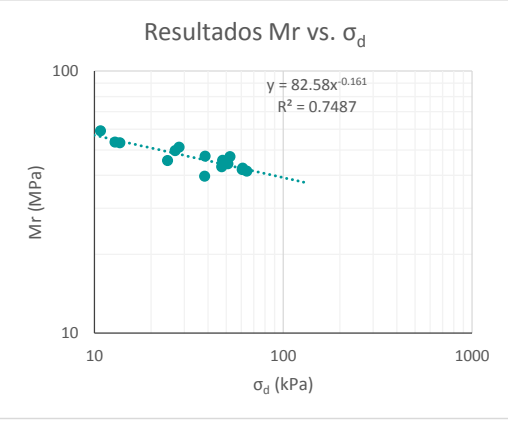
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Θ (kPa)	Mr (MPa)
1	10.78	41.40	5.0808	134.978	59.3
2	26.81	41.40	12.6400	151.014	49.7
3	38.38	41.40	18.0926	162.580	39.8
4	47.84	41.40	22.5538	172.044	45.7
5	64.14	41.40	30.2369	188.342	41.6
6	12.88	27.60	6.0722	95.681	53.6
7	28.13	27.60	13.2596	110.928	51.2
8	38.64	27.60	18.2165	121.443	47.4
9	52.31	27.60	24.6604	135.113	47.2
10	60.72	27.60	28.6259	143.525	42.1
11	13.67	13.80	6.4439	55.070	53.3
12	24.45	13.80	11.5247	65.848	45.6
13	47.32	13.80	22.3059	88.718	43.2
14	51.00	13.80	24.0408	92.398	44.4
15	60.99	13.80	28.7499	102.388	42.7











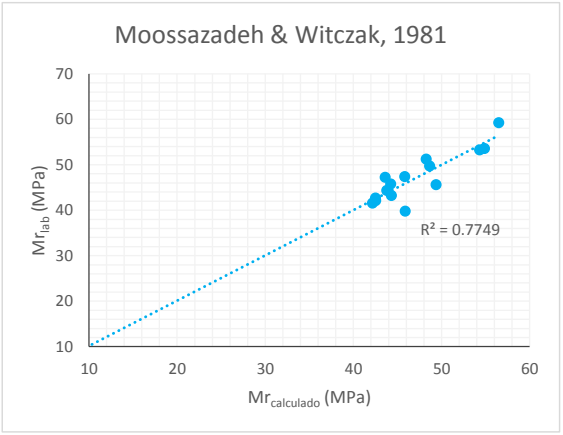
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

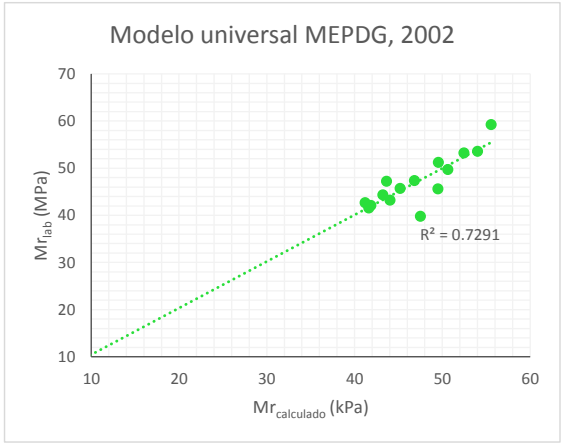
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

	Moossazadeh & Witczak, 1981				**Modelo universal MEPDG, 2002**			
	$M_r = k_1\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$				$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$			
		k_1	39.070			**k_1**	0.577	
		k_2	-0.164			**k_2**	0.044	
		P_a (kPa)	102			**k_3**	-1.436	
						P_a (kPa)	102	
Ciclo	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (Mpa)**	**Mr_{lab} (MPa)**	**Mr_{cal} (MPa)**	**Difer (MPa)**	**Difer^2 (MPa)**
1	59.3	56.482	2.8	7.7	59.3	55.543	3.7	13.8
2	49.7	48.640	1.1	1.2	49.7	50.606	-0.9	0.8
3	39.8	45.862	-6.1	37.0	39.8	47.492	-7.7	59.4
4	45.7	44.234	1.5	2.3	45.7	45.179	0.6	0.3
5	41.6	42.158	-0.6	0.3	41.6	41.622	-0.1	0.0
6	53.6	54.854	-1.3	1.6	53.6	53.995	-0.4	0.2
7	51.2	48.260	3.0	8.9	51.2	49.544	1.7	2.9
8	47.4	45.811	1.6	2.5	47.4	46.821	0.6	0.3
9	47.2	43.591	3.6	13.2	47.2	43.641	3.6	12.9
10	42.1	42.538	-0.4	0.2	42.1	41.861	0.2	0.1
11	53.3	54.323	-1.1	1.1	53.3	52.448	0.8	0.7
12	45.6	49.383	-3.8	14.2	45.6	49.495	-3.9	15.1
13	43.2	44.315	-1.1	1.2	43.2	44.017	-0.8	0.6
14	44.4	43.774	0.6	0.3	44.4	43.226	1.1	1.3
15	42.7	42.508	0.2	0.0	42.7	41.192	1.5	2.2
			Σ	91.7			**Σ**	110.4





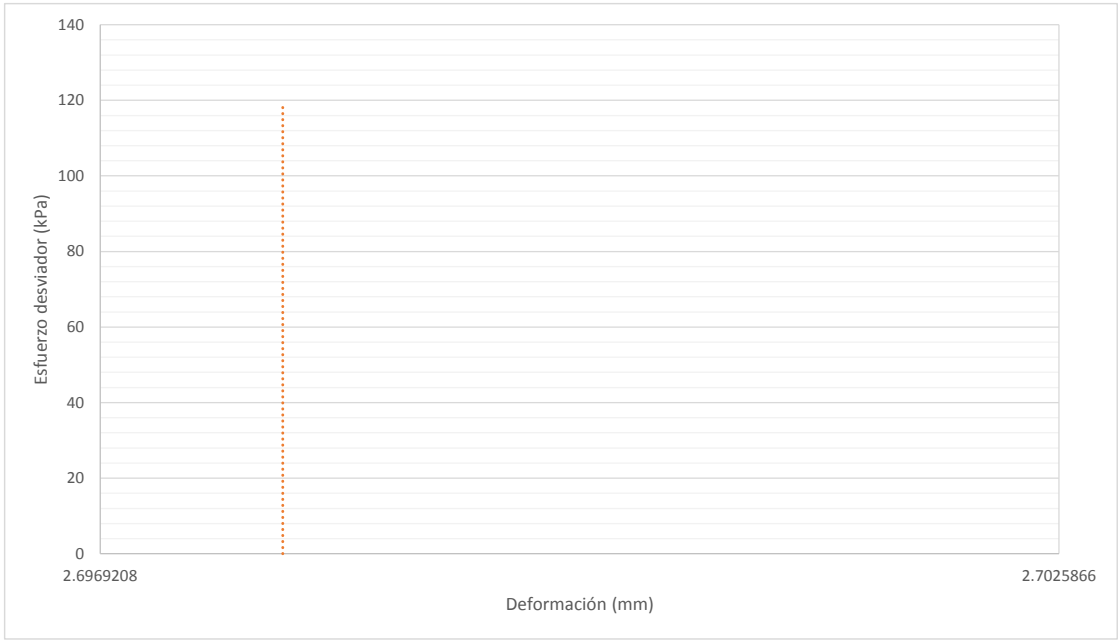
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.154
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

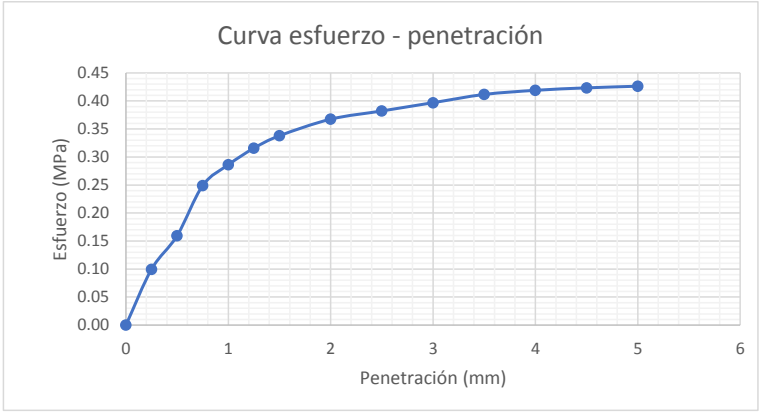
Humedad natural	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	114.2
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	284.8
Masa recipiente + muestra seca (g)	232.4
Contenido de humedad (%)	**44.3**

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm^3)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm^3)	-
Densidad seca (g/cm^3)	-

Penetración de la muestra	
Masa inicial del sistema (kg)	0
Masa sobrecargas (kg)	0.5
Diámetro del pistón (mm)	16
Área del pistón (mm^2)	201.06

Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	2.04	0.10
0.020	0.500	3.27	0.16
0.030	0.750	5.10	0.25
0.039	1.000	5.86	0.29
0.049	1.250	6.47	0.32
0.059	1.500	6.93	0.34
0.079	2.000	7.53	0.37
0.098	2.500	7.83	0.38
0.118	3.000	8.14	0.40
0.138	3.500	8.44	0.41
0.157	4.000	8.59	0.42
0.177	4.500	8.68	0.42
0.197	5.000	8.74	0.43

Registro fotográfico



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
Mini-CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
Adaptado de DNER 254/97

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

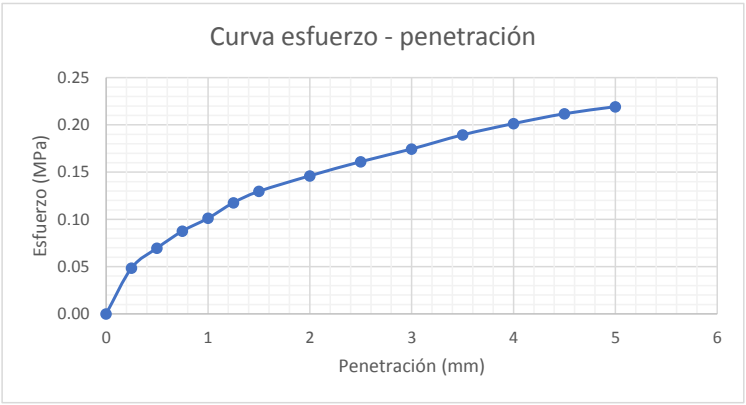
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda de color café con vetas naranjas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	Escuela Colombiana de Ingeniería				
Fecha exploración:	Julio 09 de 2020	**Fecha ensayos:**	Septiembre 10 y 11 de 2020	**Profundidad (m):**	0.50 - 0.80

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	114.2
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	284.8
Masa recipiente + muestra seca (g)	232.4
Contenido de humedad (%)	44.33

Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	24
Altura inicial de la muestra (mm)	50
Lectura inicial (mm)	0
Lectura final (mm)	0.02
Expansión (%)	0.04

Penetración de la muestra			
Masa inicial del sistema (kg)		0	
Masa sobrecargas (kg)		0.5	
Diámetro del pistón (mm)		16	
Área del pistón (mm^2)		201.06	
Pen (")	**Pen (mm)**	**Carga (kg)**	**Esfuerzo (MPa)**
0.000	0.000	0.00	0.00
0.010	0.250	1.00	0.05
0.020	0.500	1.43	0.07
0.030	0.750	1.80	0.09
0.039	1.000	2.07	0.10
0.049	1.250	2.41	0.12
0.059	1.500	2.66	0.13
0.079	2.000	2.99	0.15
0.098	2.500	3.30	0.16
0.118	3.000	3.58	0.17
0.138	3.500	3.88	0.19
0.157	4.000	4.13	0.20
0.177	4.500	4.34	0.21
0.197	5.000	4.49	0.22



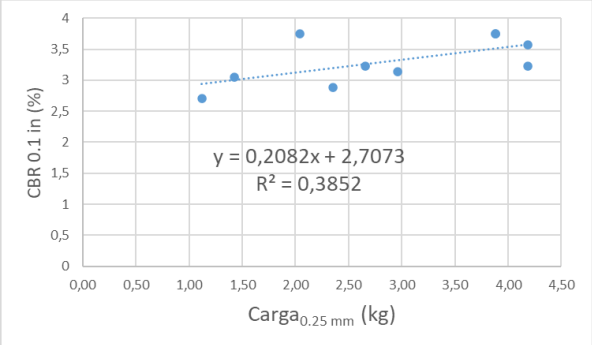
Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	114.2
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	283.1
Masa recipiente + muestra seca (g)	0
Contenido de humedad (%)	**-247.90**

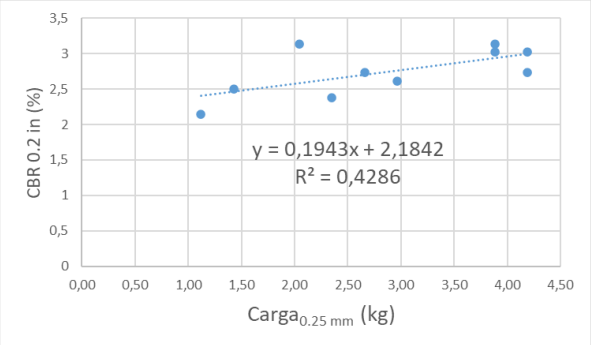
ANEXO 4: Relaciones entre el Mini-CBR con las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.

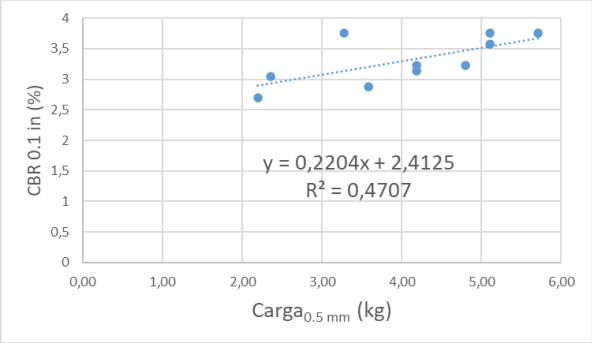
Comparación cargas Mini-CBR Vs. CBR, condición natural.

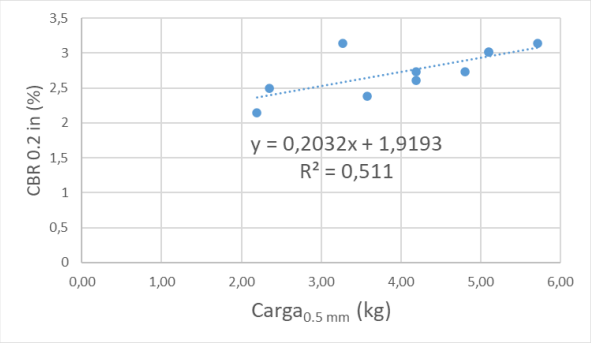
Muestras Escuela Colombiana de Ingeniería (CH)

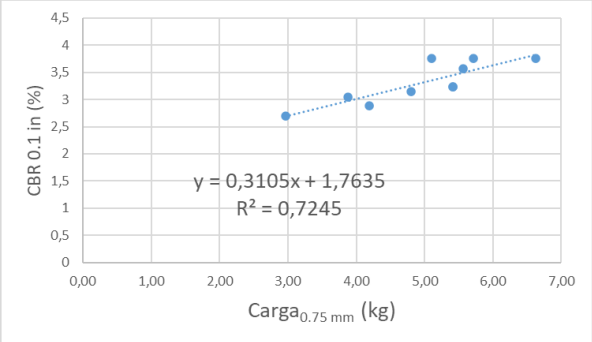
Carga Mini-CBR Vs. CBR

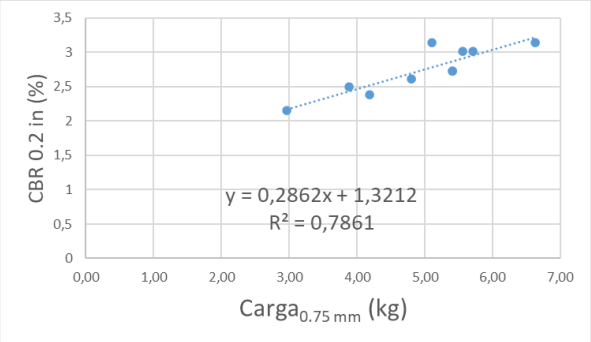


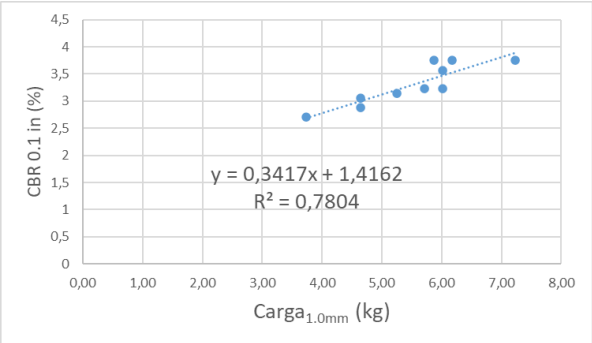


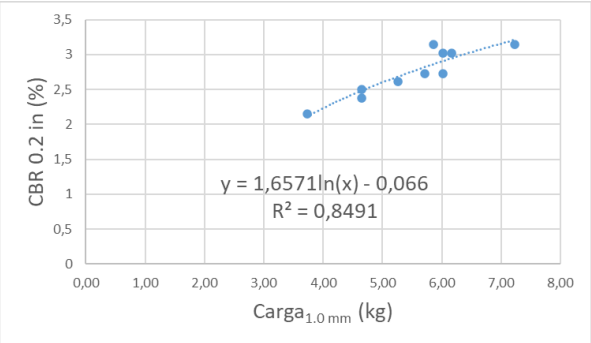


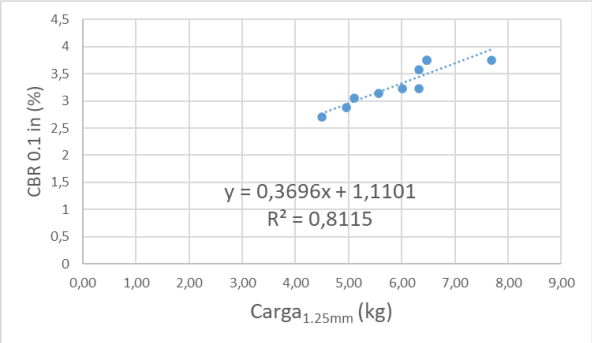


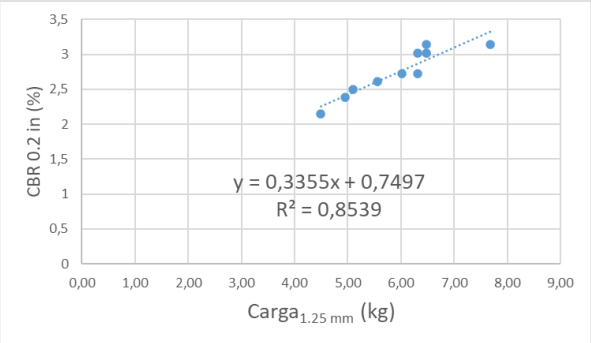


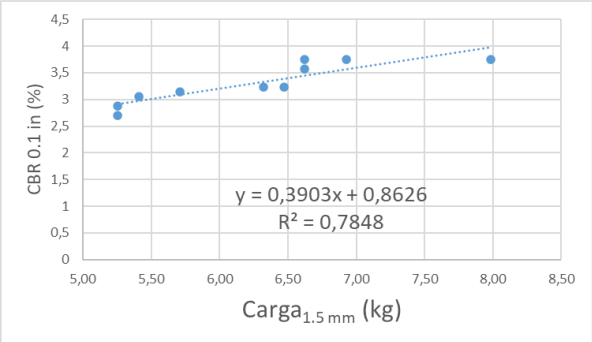


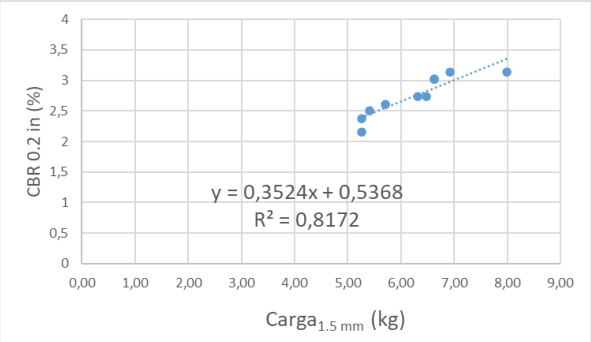

CBR 0.1 in (%)
y = 0,3417x + 1,4162
R² = 0,7804
Carga1.0mm (kg)

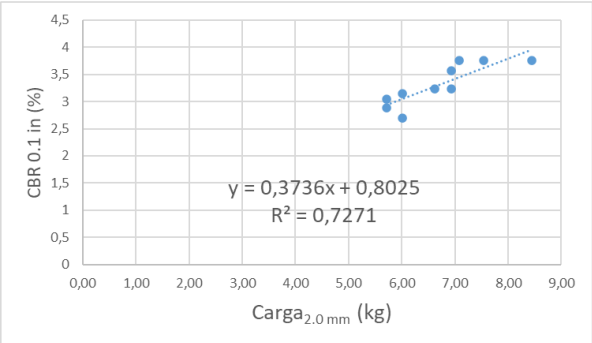

CBR 0.2 in (%)
y = 1,6571ln(x) - 0,066
R² = 0,8491
Carga1.0 mm (kg)

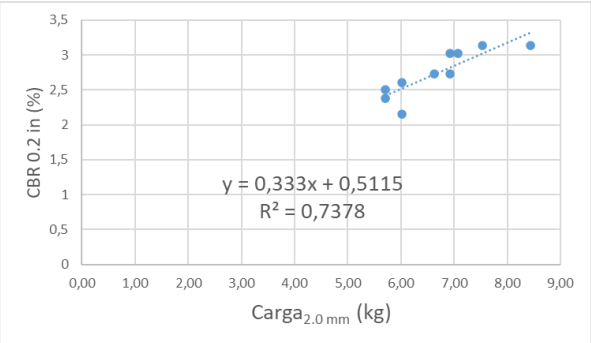

CBR 0.1 in (%)
y = 0,3696x + 1,1101
R² = 0,8115
Carga1.25mm (kg)

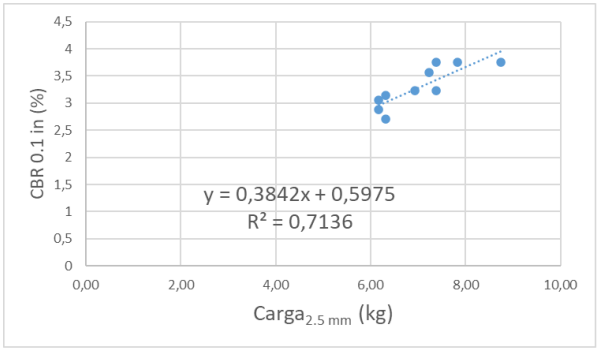

CBR 0.2 in (%)
y = 0,3355x + 0,7497
R² = 0,8539
Carga1.25 mm (kg)

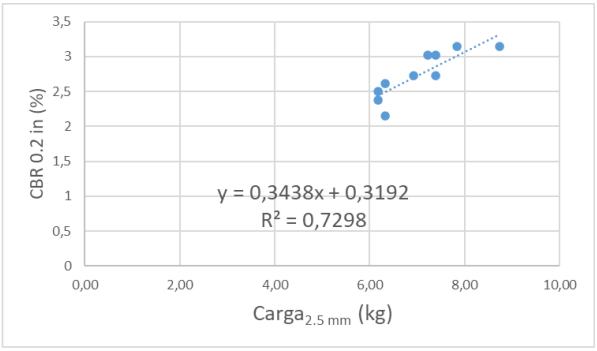

CBR 0.1 in (%)
y = 0,3903x + 0,8626
R² = 0,7848
Carga1.5 mm (kg)

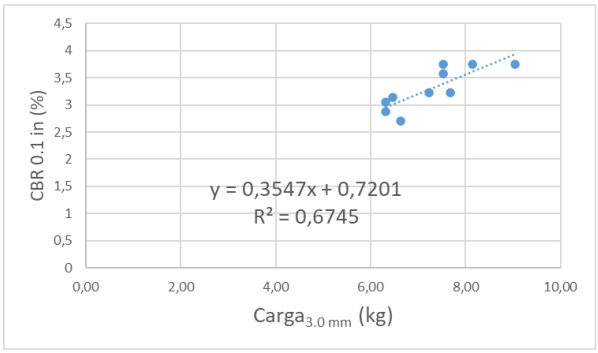

CBR 0.2 in (%)
y = 0,3524x + 0,5368
R² = 0,8172
Carga1.5 mm (kg)

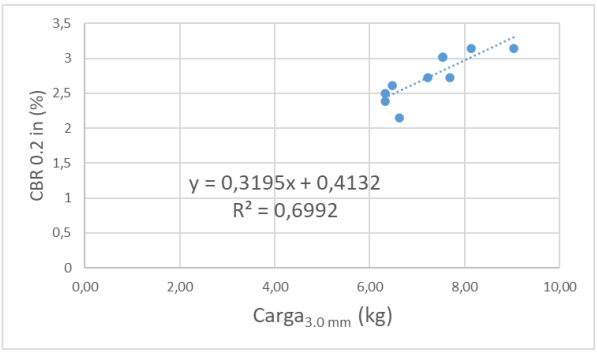

CBR 0.1 in (%)
y = 0,3736x + 0,8025
R² = 0,7271
Carga2.0 mm (kg)

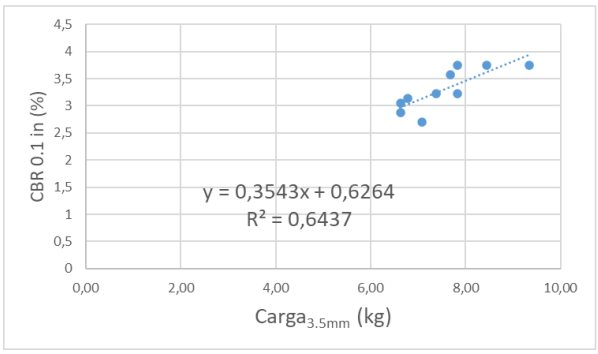

CBR 0.2 in (%)
y = 0,333x + 0,5115
R² = 0,7378
Carga2.0 mm (kg)

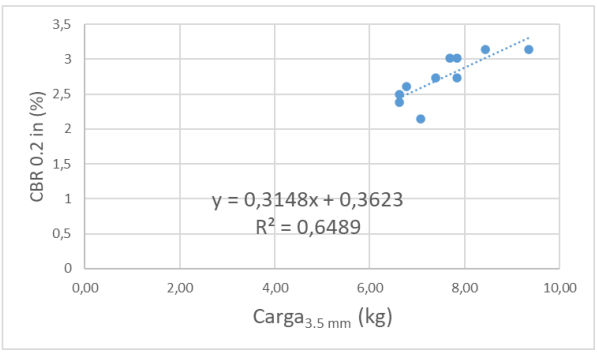

CBR 0.1 in (%)
y = 0,3842x + 0,5975
R² = 0,7136
Carga2.5 mm (kg)

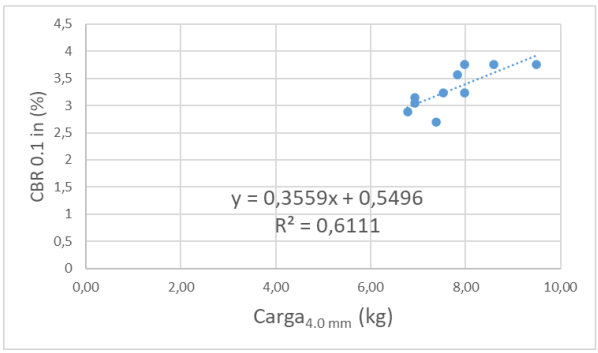

CBR 0.2 in (%)
y = 0,3438x + 0,3192
R² = 0,7298
Carga2.5 mm (kg)

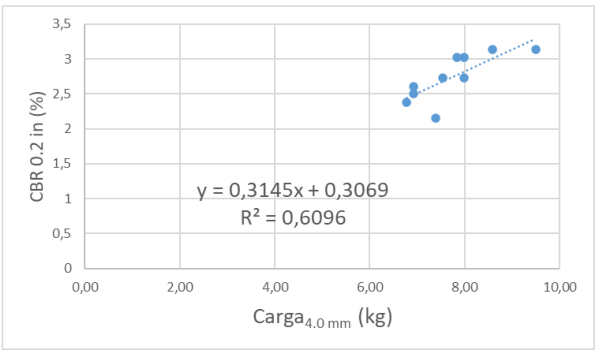

CBR 0.1 in (%)
y = 0,3547x + 0,7201
R² = 0,6745
Carga3.0 mm (kg)

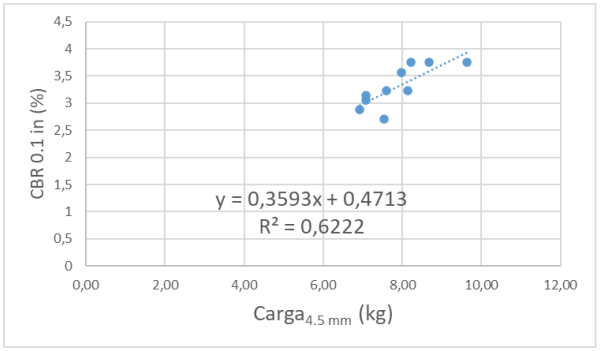

CBR 0.2 in (%)
y = 0,3195x + 0,4132
R² = 0,6992
Carga3.0 mm (kg)

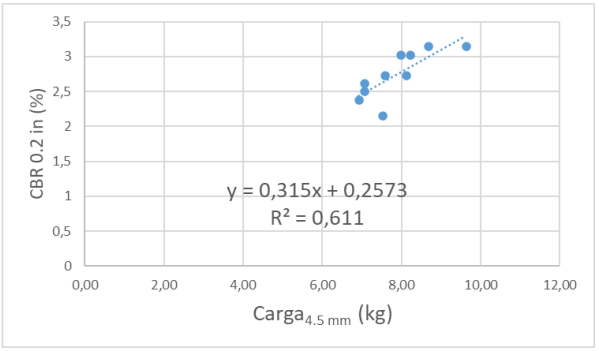

CBR 0.1 in (%)
y = 0,3543x + 0,6264
R² = 0,6437
Carga3.5mm (kg)

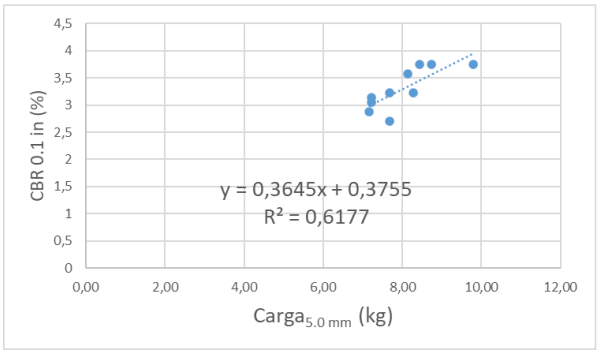

CBR 0.2 in (%)
y = 0,3148x + 0,3623
R² = 0,6489
Carga3.5 mm (kg)

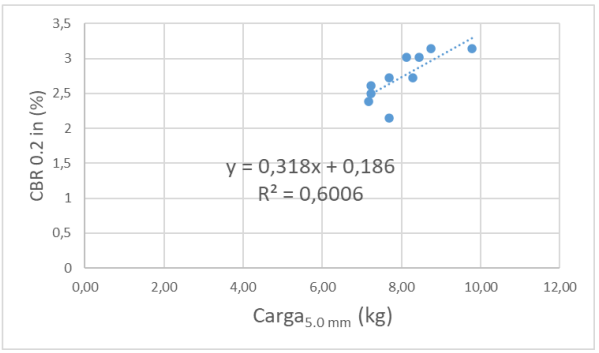

CBR 0.1 in (%)
y = 0,3559x + 0,5496
R² = 0,6111
Carga4.0 mm (kg)


CBR 0.2 in (%)
y = 0,3145x + 0,3069
R² = 0,6096
Carga4.0 mm (kg)

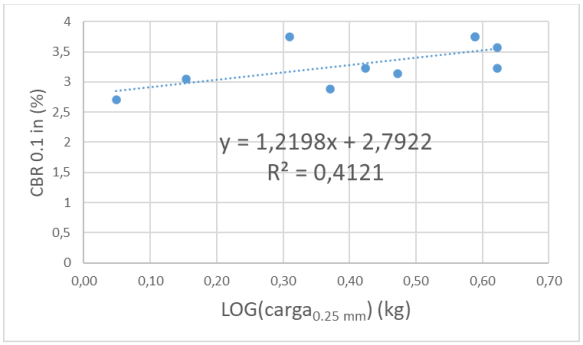


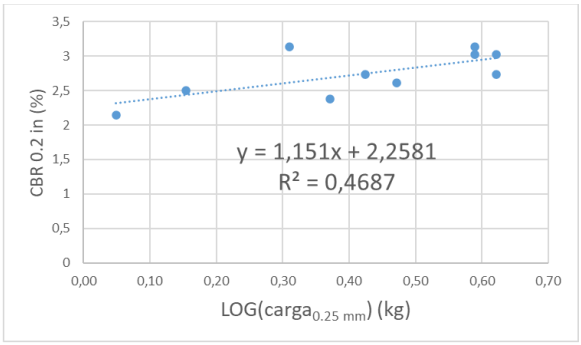


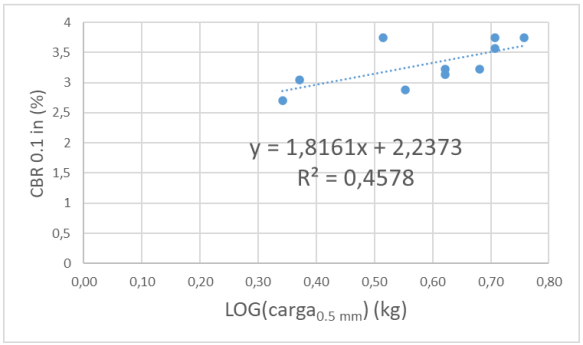


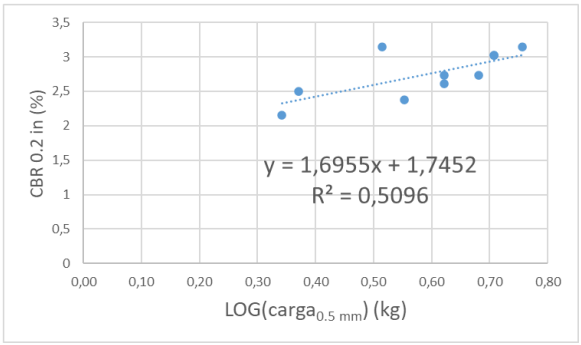


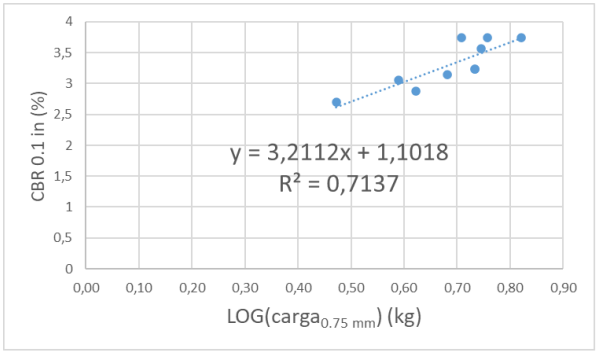
LOG (Carga Mini-CBR) Vs. CBR

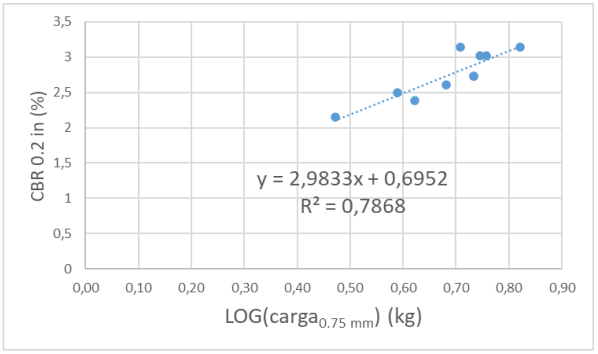


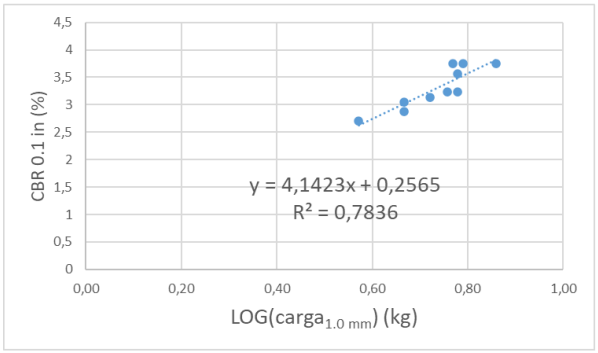


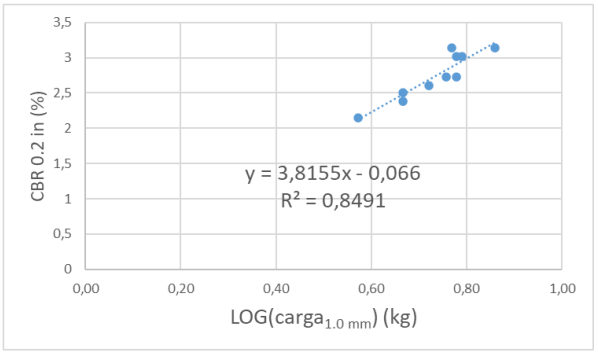


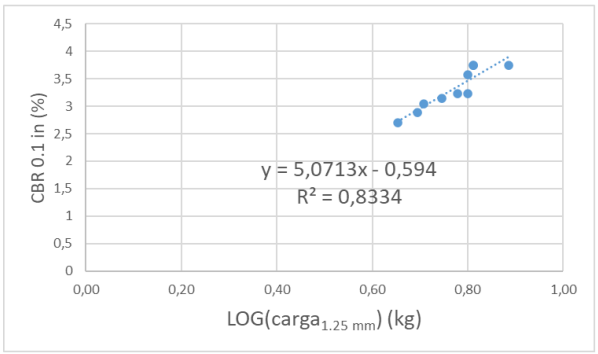


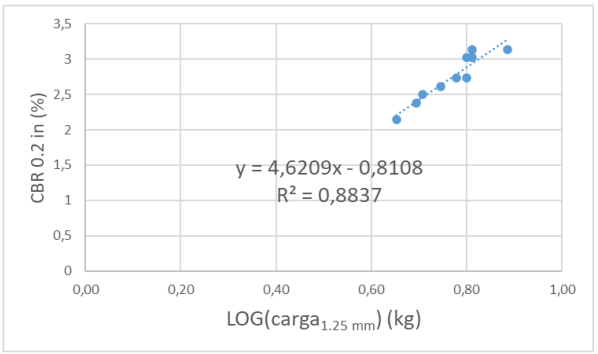

CBR 0.1 in (%)
y = 3,2112x + 1,1018
R² = 0,7137
LOG(carga0.75 mm) (kg)

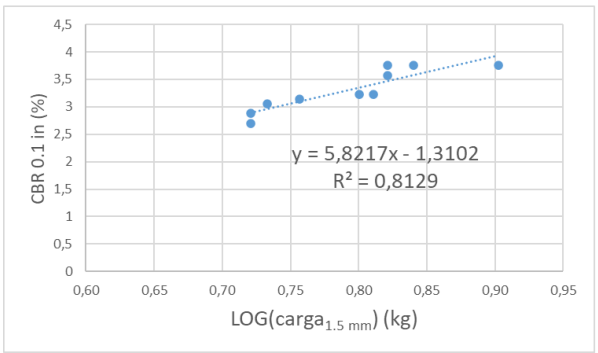

CBR 0.2 in (%)
y = 2,9833x + 0,6952
R² = 0,7868
LOG(carga0.75 mm) (kg)

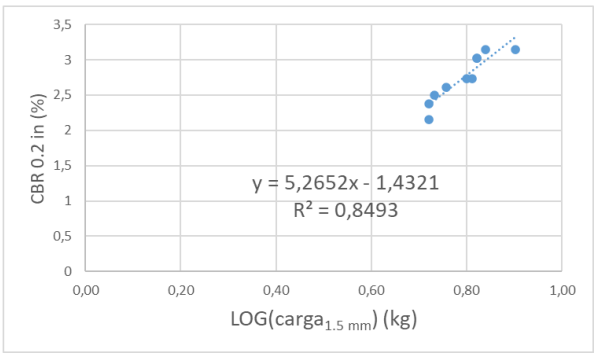

CBR 0.1 in (%)
y = 4,1423x + 0,2565
R² = 0,7836
LOG(carga1.0 mm) (kg)

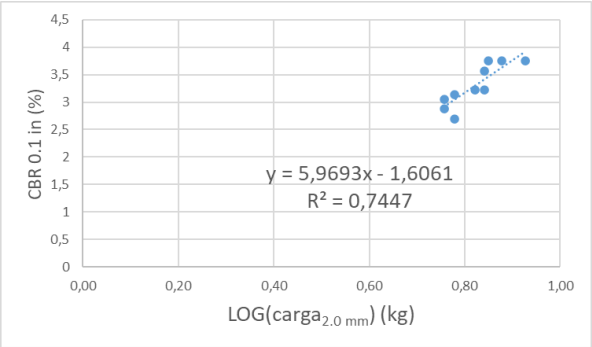

CBR 0.2 in (%)
y = 3,8155x - 0,066
R² = 0,8491
LOG(carga1.0 mm) (kg)

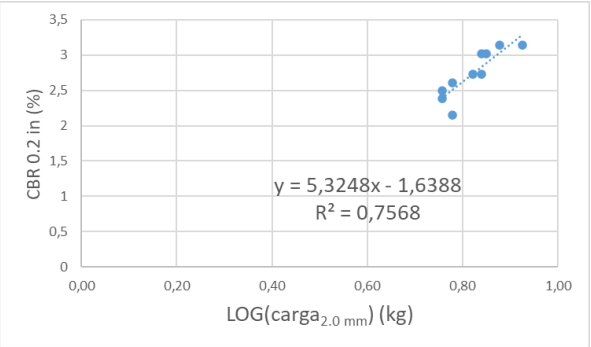

CBR 0.1 in (%)
y = 5,0713x - 0,594
R² = 0,8334
LOG(carga1.25 mm) (kg)

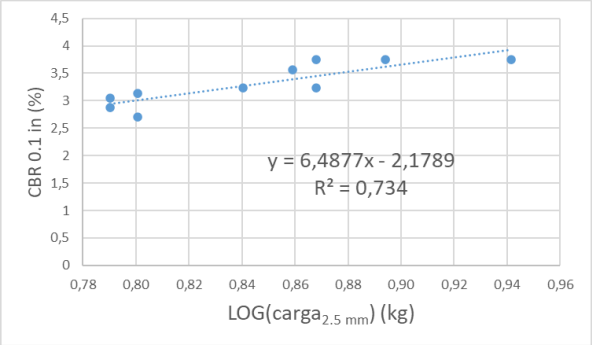

CBR 0.2 in (%)
y = 4,6209x - 0,8108
R² = 0,8837
LOG(carga1.25 mm) (kg)

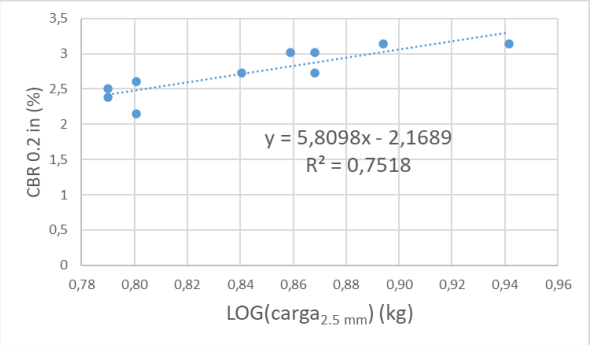

CBR 0.1 in (%)
y = 5,8217x - 1,3102
R² = 0,8129
LOG(carga1.5 mm) (kg)

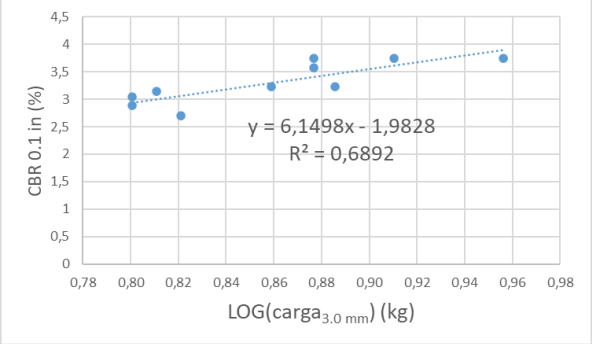

CBR 0.2 in (%)
y = 5,2652x - 1,4321
R² = 0,8493
LOG(carga1.5 mm) (kg)

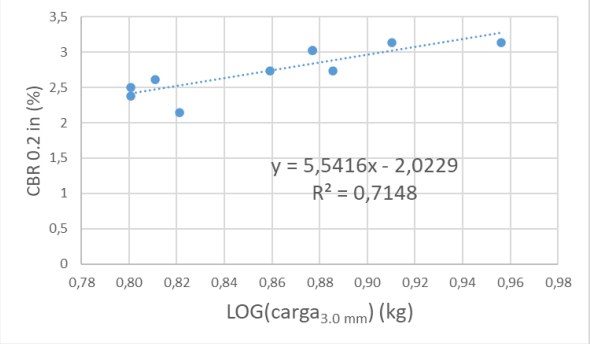

CBR 0.1 in (%)
y = 5,9693x - 1,6061
R² = 0,7447
LOG(carga2.0 mm) (kg)

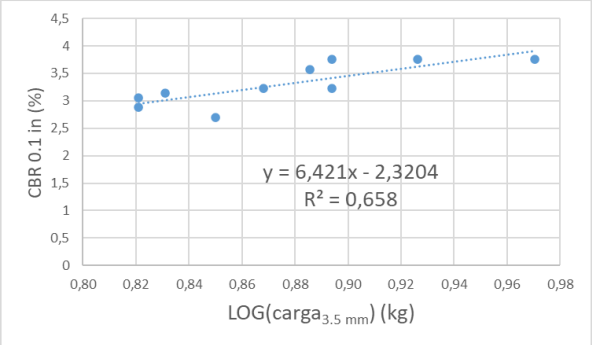

CBR 0.2 in (%)
y = 5,3248x - 1,6388
R² = 0,7568
LOG(carga2.0 mm) (kg)

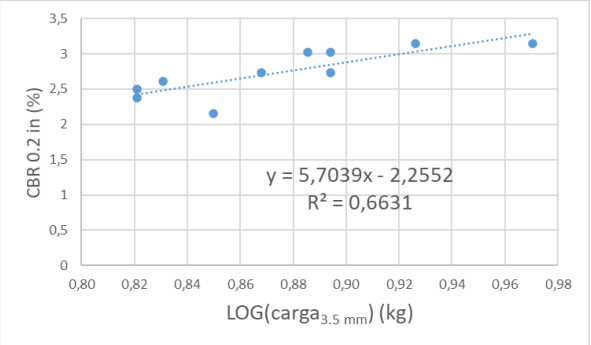

CBR 0.1 in (%)
y = 6,4877x - 2,1789
R² = 0,734
LOG(carga2.5 mm) (kg)

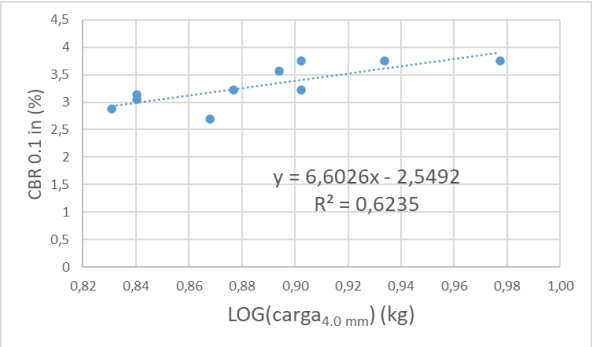

CBR 0.2 in (%)
y = 5,8098x - 2,1689
R² = 0,7518
LOG(carga2.5 mm) (kg)

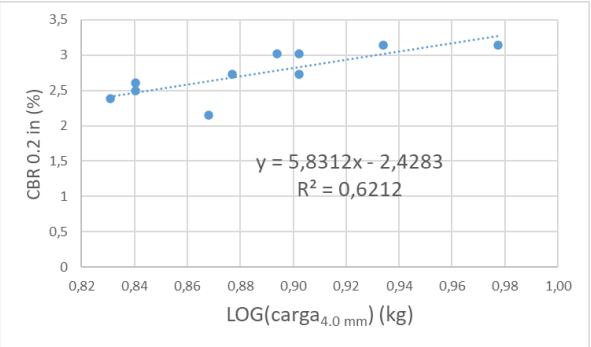

CBR 0.1 in (%)
y = 6,1498x - 1,9828
R² = 0,6892
LOG(carga3.0 mm) (kg)

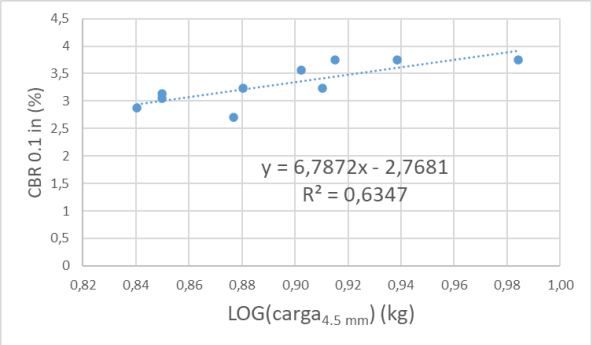

CBR 0.2 in (%)
y = 5,5416x - 2,0229
R² = 0,7148
LOG(carga3.0 mm) (kg)

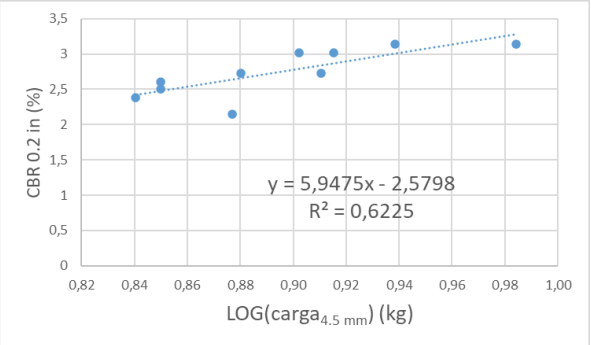

CBR 0.1 in (%)
y = 6,421x - 2,3204
R² = 0,658
LOG(carga3.5 mm) (kg)

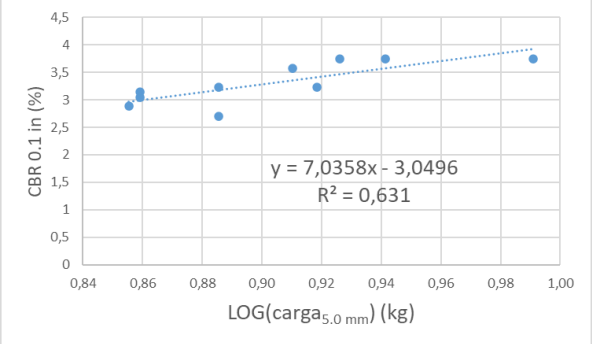

CBR 0.2 in (%)
y = 5,7039x - 2,2552
R² = 0,6631
LOG(carga3.5 mm) (kg)

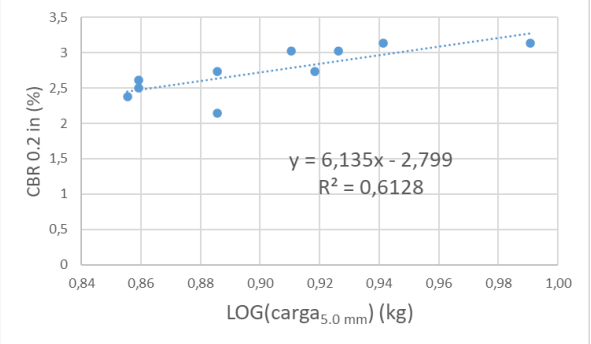




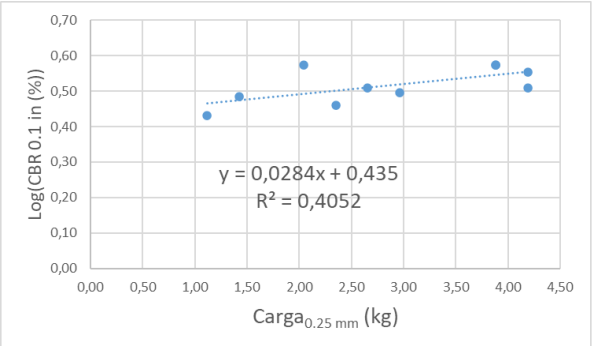


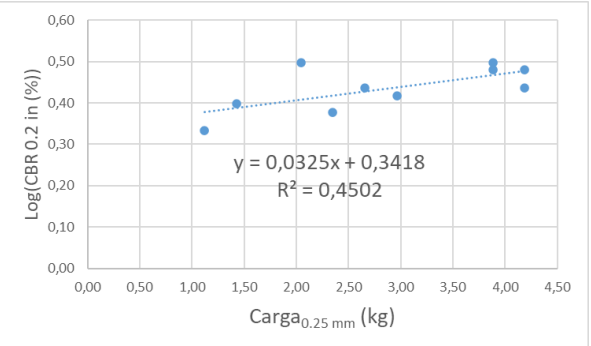


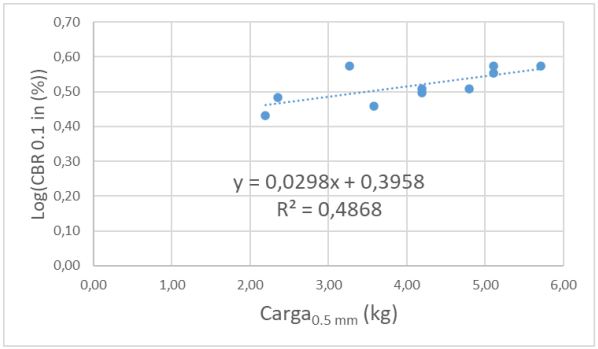


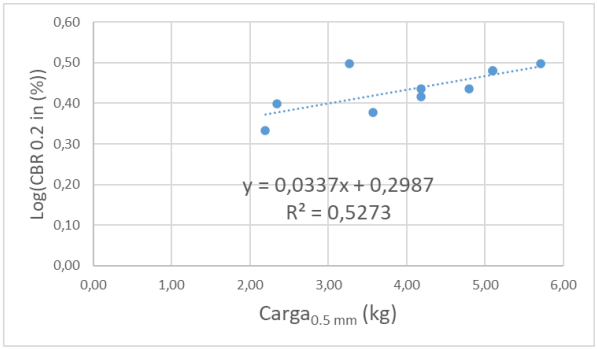


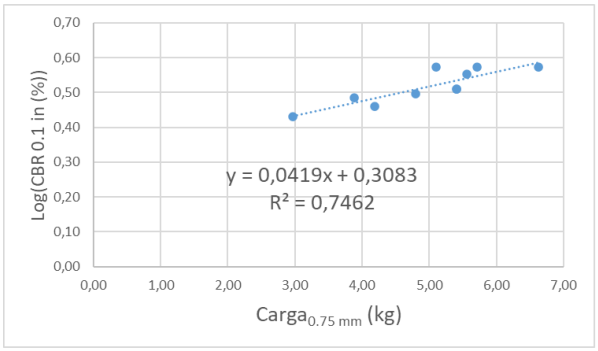
Carga Mini-CBR Vs. LOG (CBR)

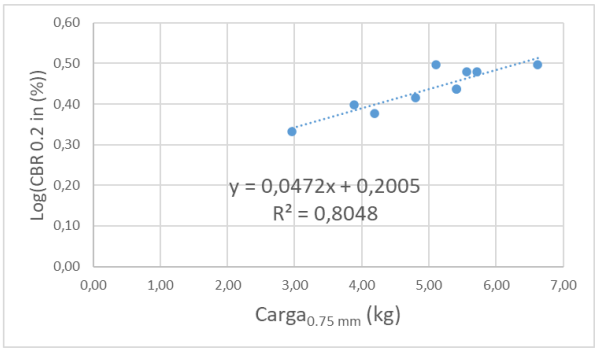


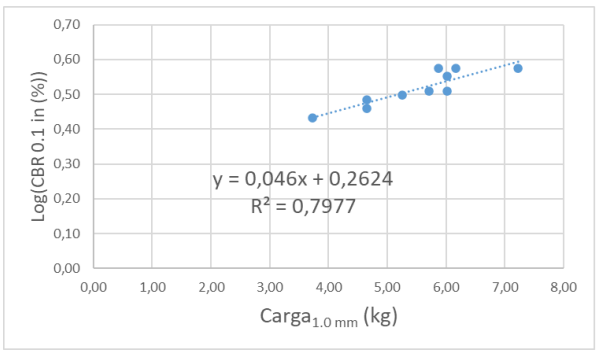


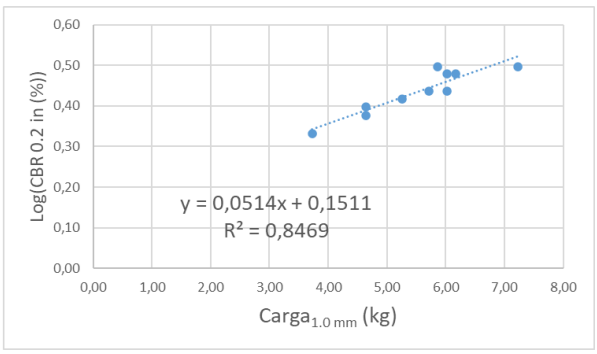

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0298x + 0,3958
R² = 0,4868
Carga0.5 mm (kg)

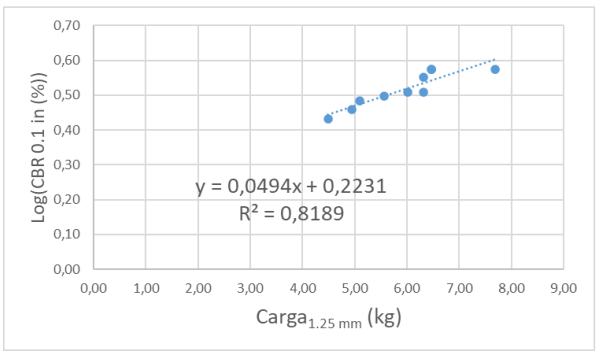

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0337x + 0,2987
R² = 0,5273
Carga0.5 mm (kg)

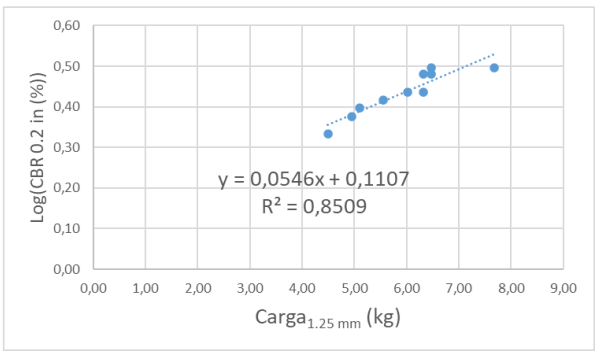

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0419x + 0,3083
R² = 0,7462
Carga0.75 mm (kg)

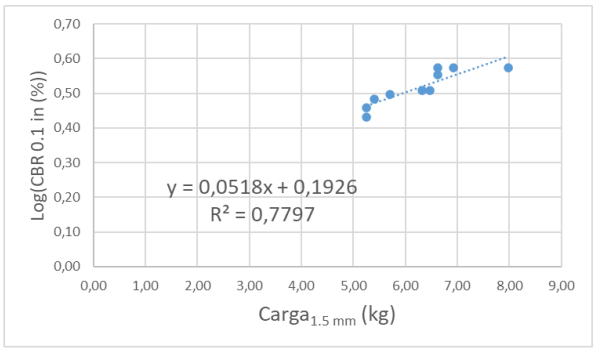

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0472x + 0,2005
R² = 0,8048
Carga0.75 mm (kg)

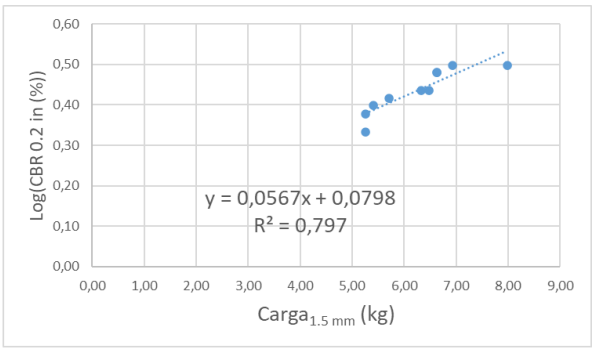

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,046x + 0,2624
R² = 0,7977
Carga1.0 mm (kg)

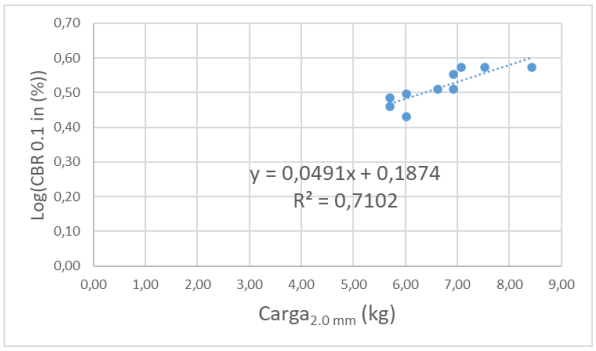

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0514x + 0,1511
R² = 0,8469
Carga1.0 mm (kg)

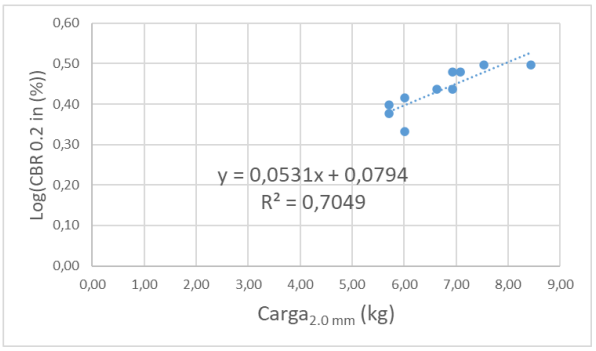

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0494x + 0,2231
R² = 0,8189
Carga1.25 mm (kg)

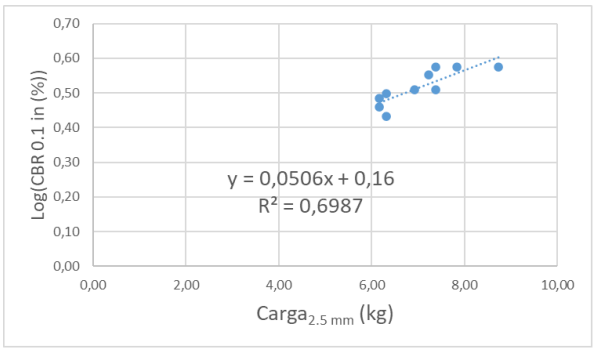

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0546x + 0,1107
R² = 0,8509
Carga1.25 mm (kg)

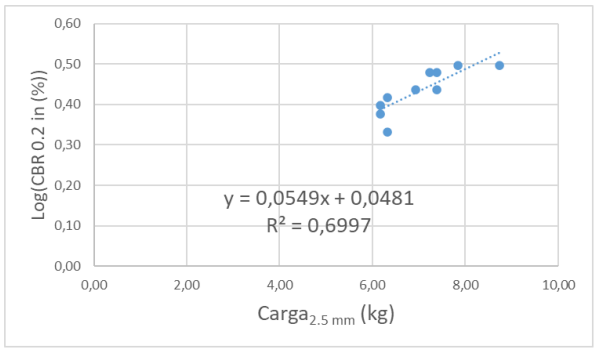

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0518x + 0,1926
R² = 0,7797
Carga1.5 mm (kg)

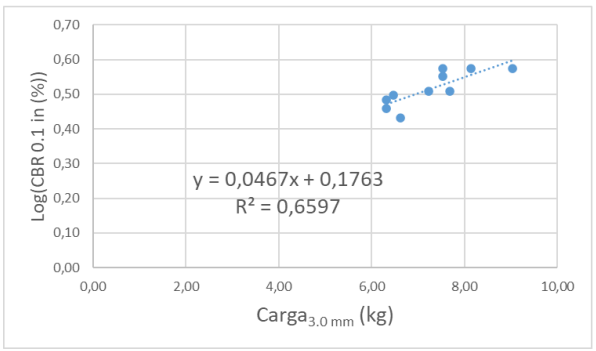

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0567x + 0,0798
R² = 0,797
Carga1.5 mm (kg)

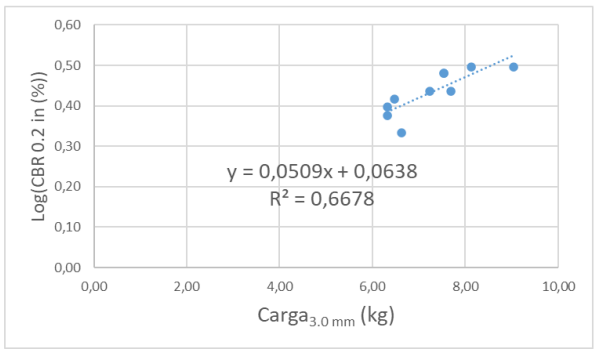

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0491x + 0,1874
R² = 0,7102
Carga2.0 mm (kg)

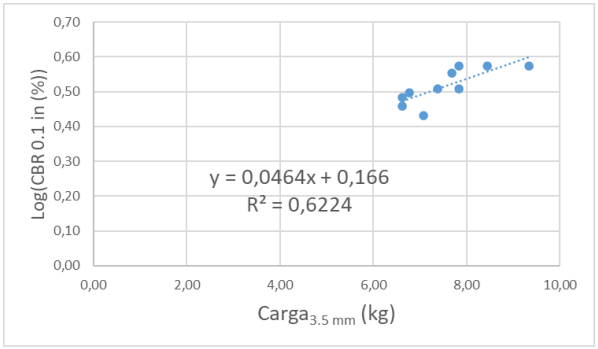

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0531x + 0,0794
R² = 0,7049
Carga2.0 mm (kg)

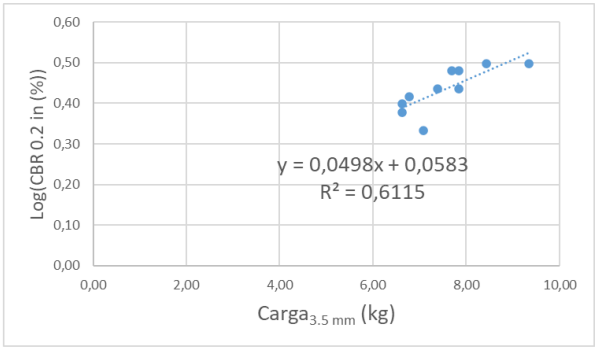

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0506x + 0,16
R² = 0,6987
Carga2.5 mm (kg)

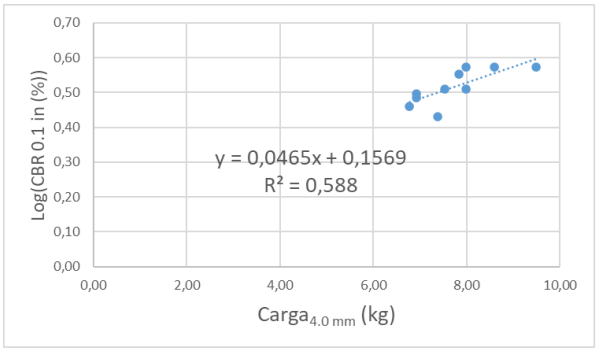

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0549x + 0,0481
R² = 0,6997
Carga2.5 mm (kg)

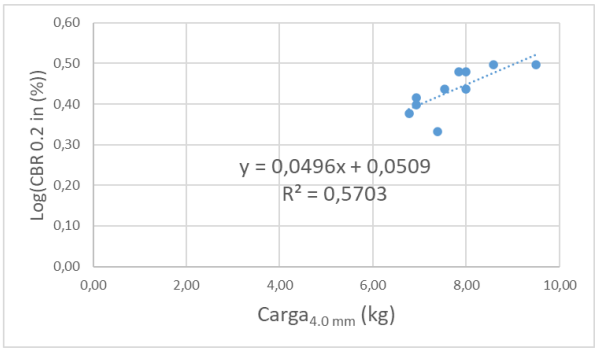

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0467x + 0,1763
R² = 0,6597
Carga3.0 mm (kg)

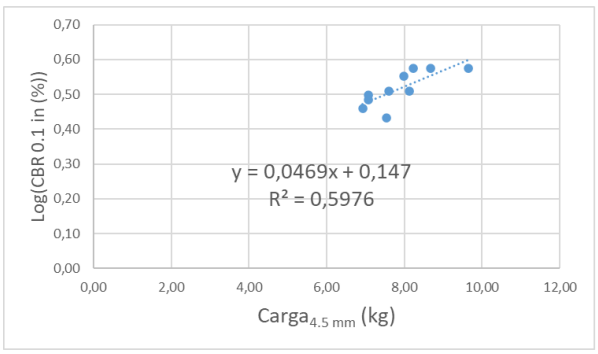

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0509x + 0,0638
R² = 0,6678
Carga3.0 mm (kg)

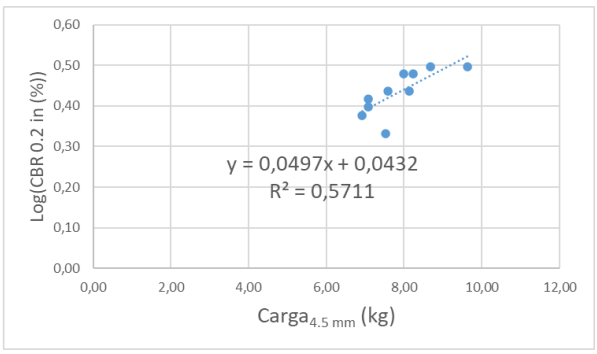

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0464x + 0,166
R² = 0,6224
Carga3.5 mm (kg)

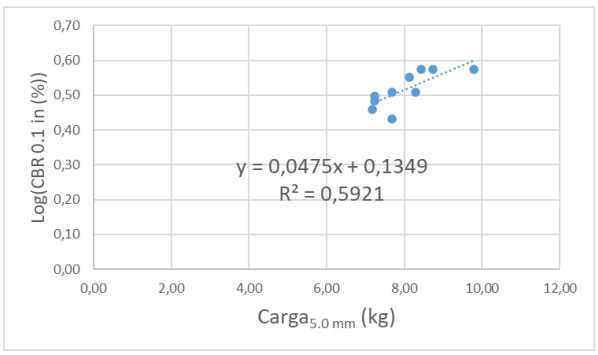

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0498x + 0,0583
R² = 0,6115
Carga3.5 mm (kg)

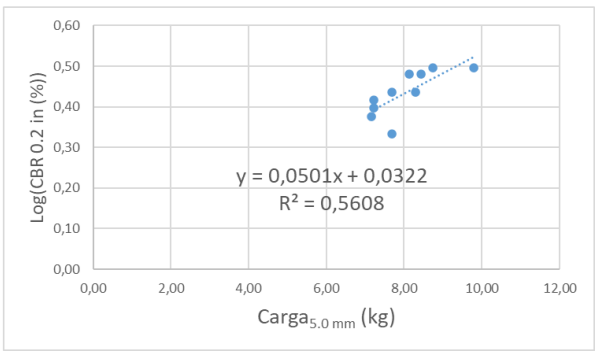

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0465x + 0,1569
R² = 0,588
Carga4.0 mm (kg)


Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0496x + 0,0509
R² = 0,5703
Carga4.0 mm (kg)


Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0469x + 0,147
R² = 0,5976
Carga4.5 mm (kg)

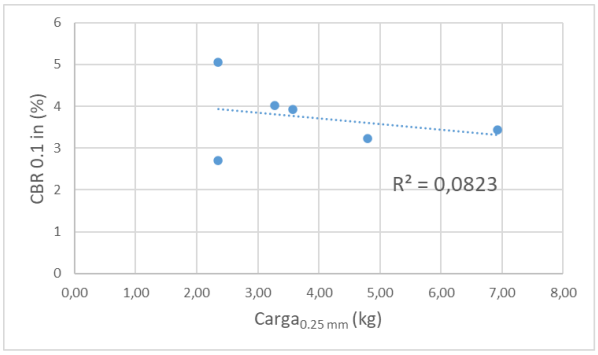

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0497x + 0,0432
R² = 0,5711
Carga4.5 mm (kg)

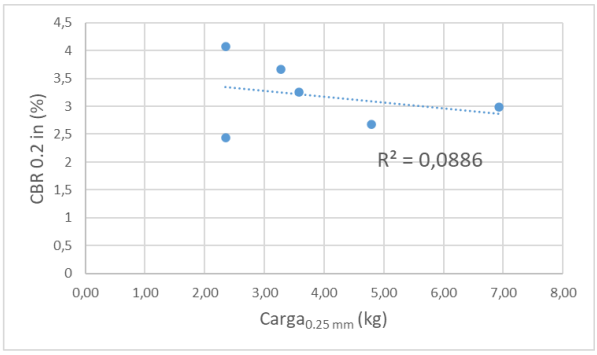

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0475x + 0,1349
R² = 0,5921
Carga5.0 mm (kg)

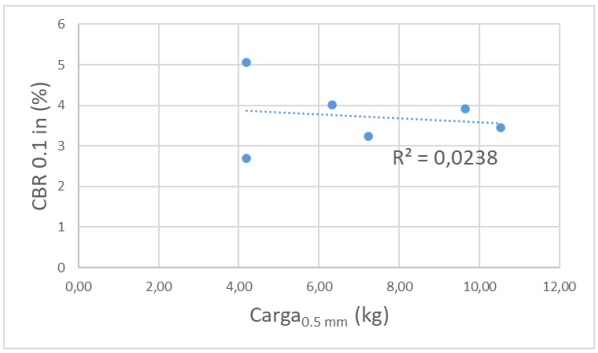

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0501x + 0,0322
R² = 0,5608
Carga5.0 mm (kg)

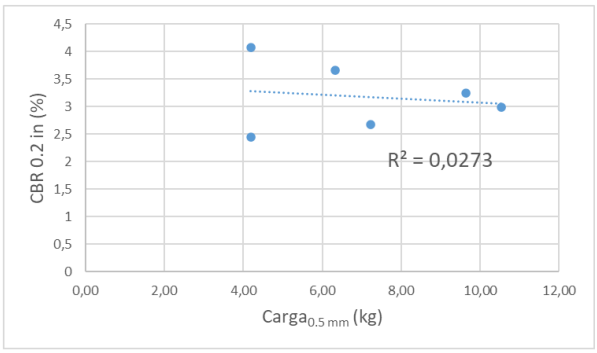
Muestras San José de Bavaria (MH)

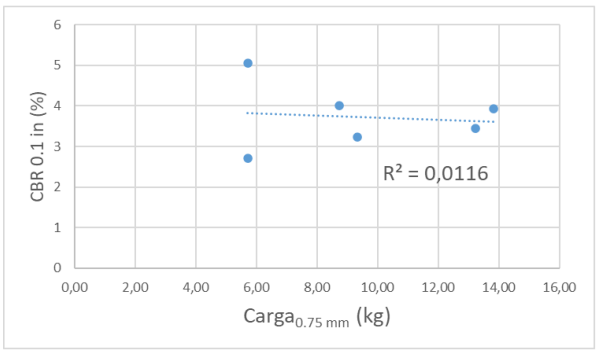
Carga Mini-CBR Vs. CBR

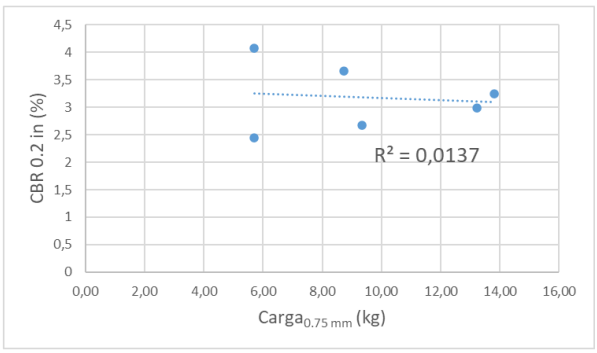


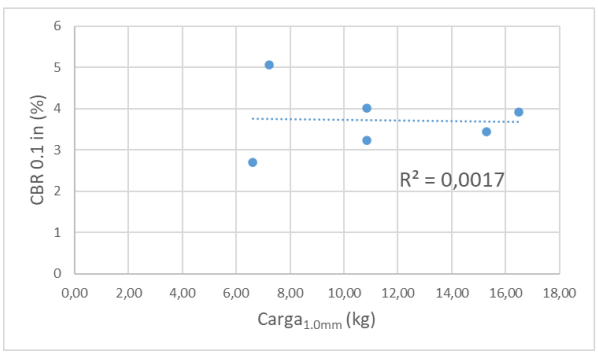


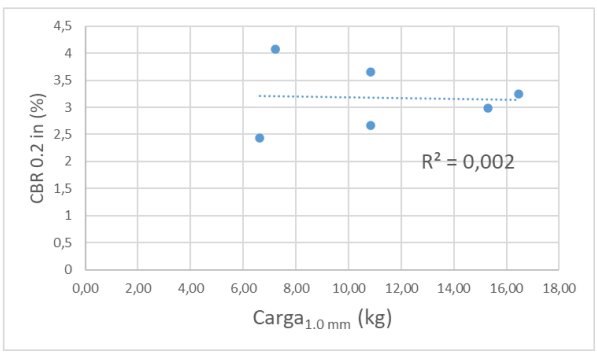


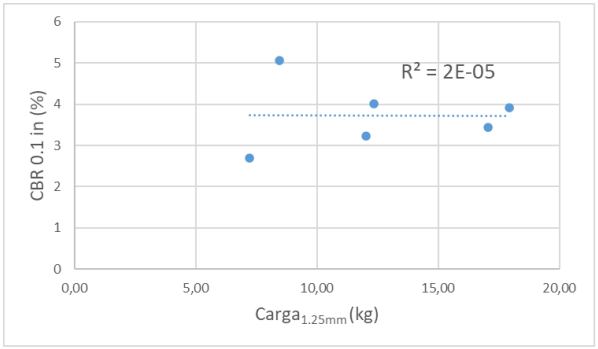


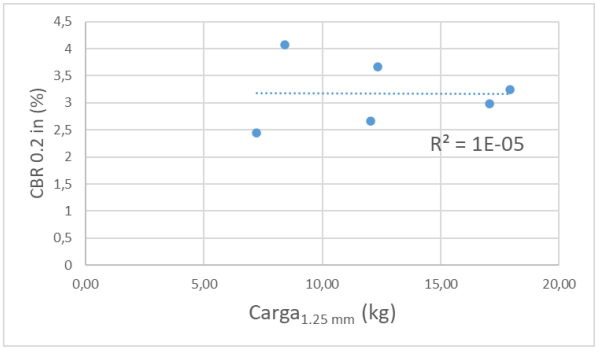


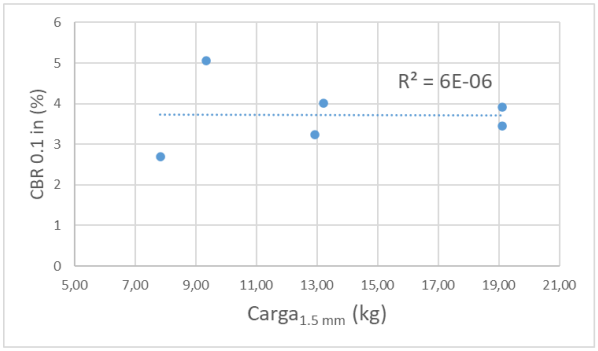


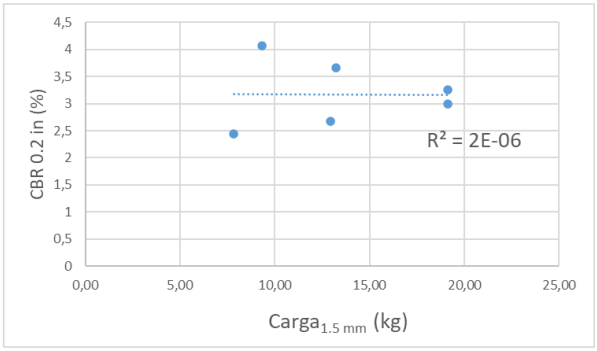


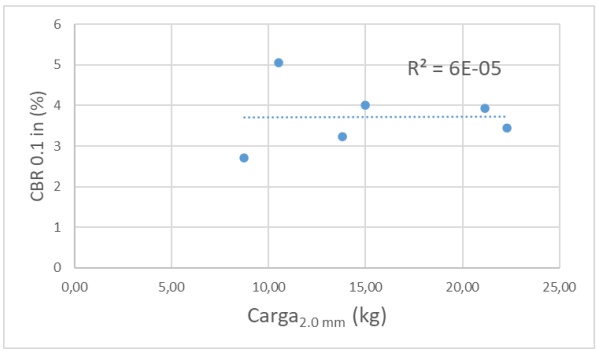


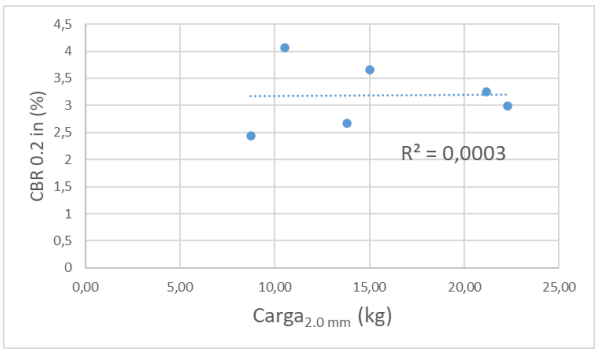

CBR 0.1 in (%)
R² = 2E-05
Carga1.25mm (kg)

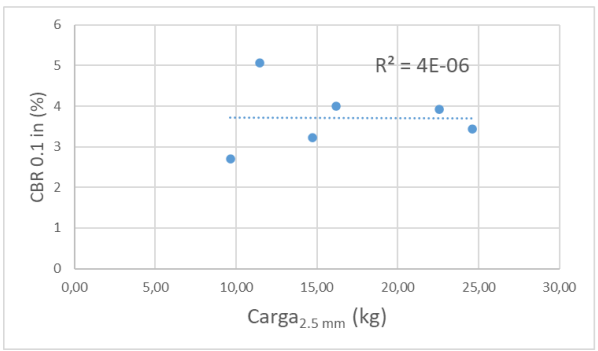

CBR 0.2 in (%)
R² = 1E-05
Carga1.25 mm (kg)

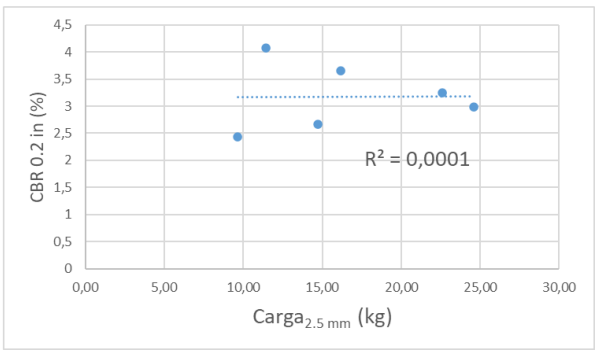

CBR 0.1 in (%)
R² = 6E-06
Carga1.5 mm (kg)

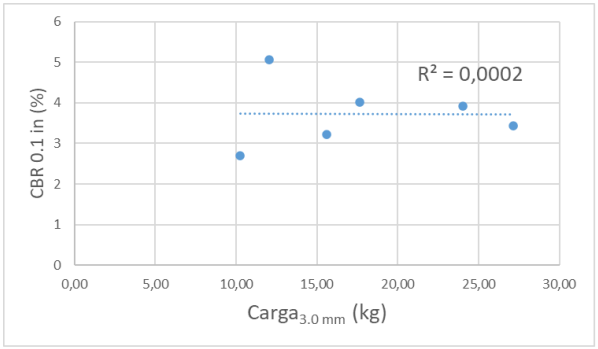

CBR 0.2 in (%)
R² = 2E-06
Carga1.5 mm (kg)

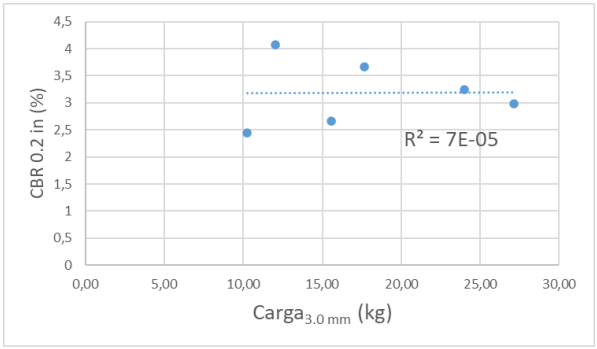

CBR 0.1 in (%)
R² = 6E-05
Carga2.0 mm (kg)

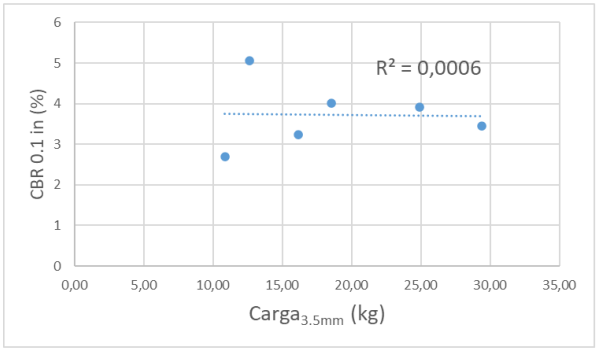

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0003
Carga2.0 mm (kg)

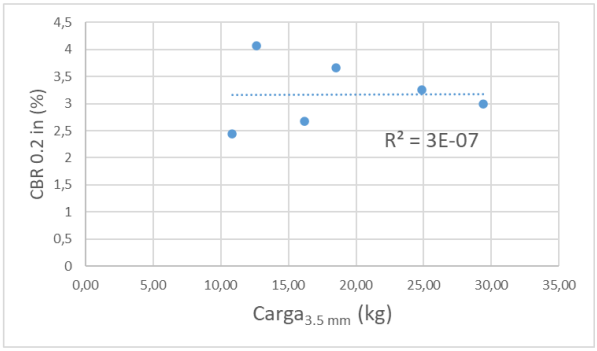

CBR 0.1 in (%)
R² = 4E-06
Carga2.5 mm (kg)

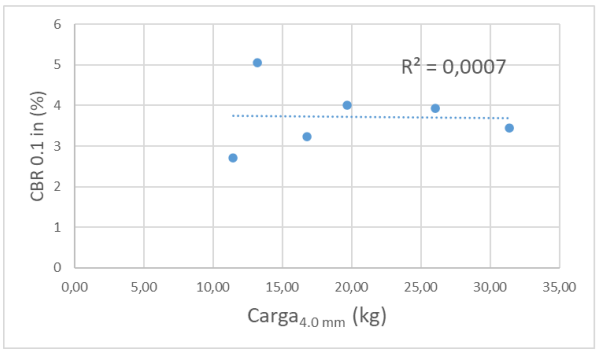

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0001
Carga2.5 mm (kg)

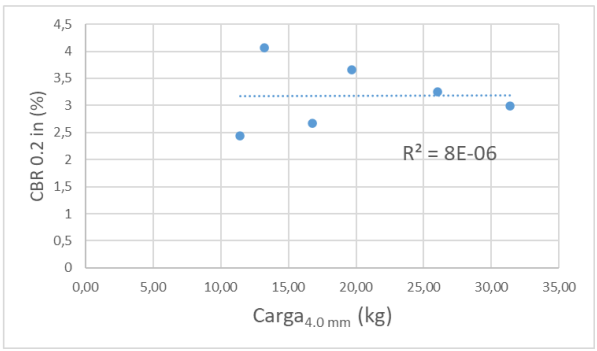

R² = 0,0002
CBR 0.1 in (%)
Carga3.0 mm (kg)

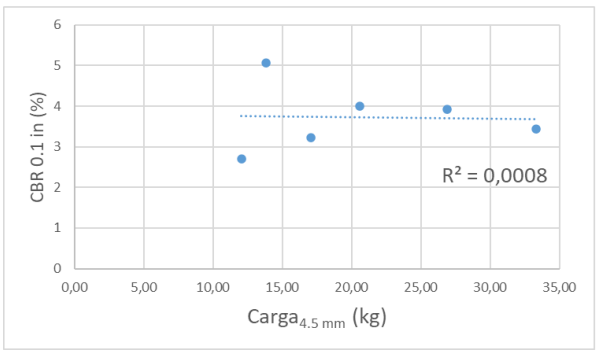

R² = 7E-05
CBR 0.2 in (%)
Carga3.0 mm (kg)

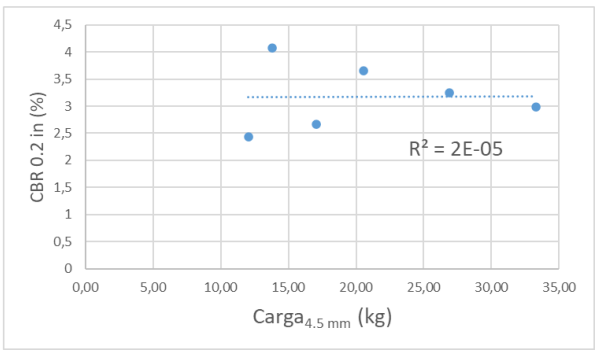

R² = 0,0006
CBR 0.1 in (%)
Carga3.5mm (kg)

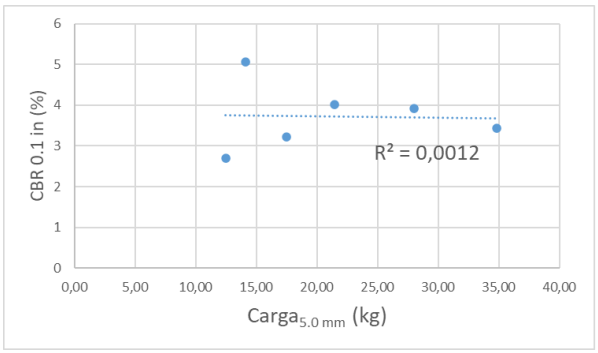

R² = 3E-07
CBR 0.2 in (%)
Carga3.5 mm (kg)

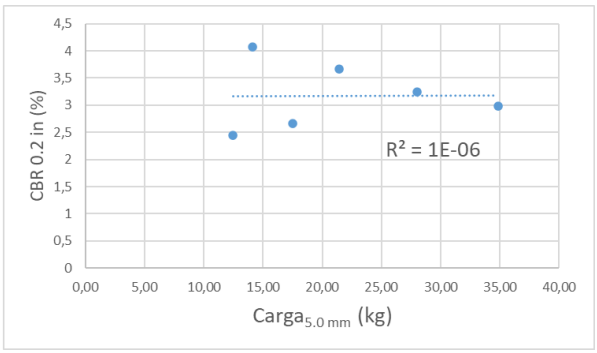

R² = 0,0007
CBR 0.1 in (%)
Carga4.0 mm (kg)


R² = 8E-06
CBR 0.2 in (%)
Carga4.0 mm (kg)

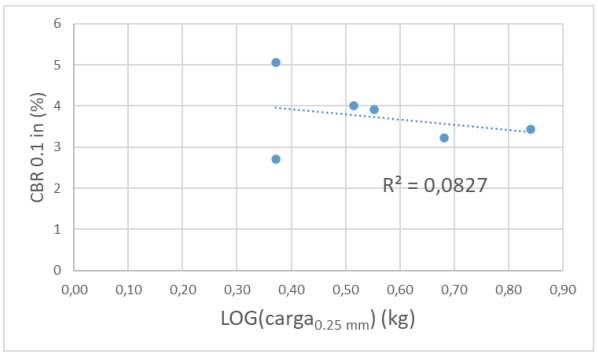

R² = 0,0008
CBR 0.1 in (%)
Carga4.5 mm (kg)

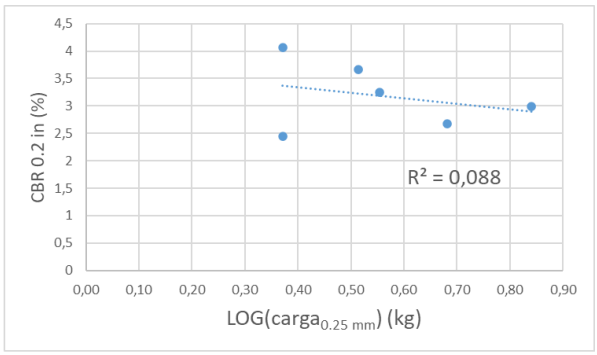

R² = 2E-05
CBR 0.2 in (%)
Carga4.5 mm (kg)

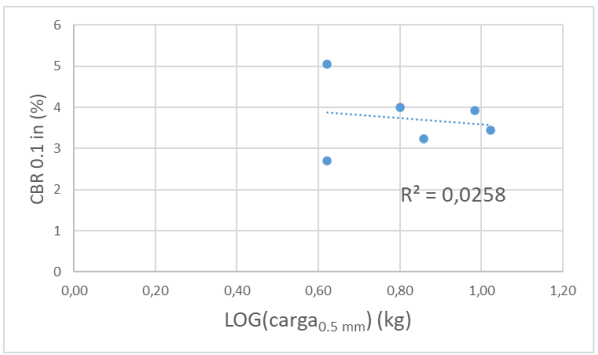


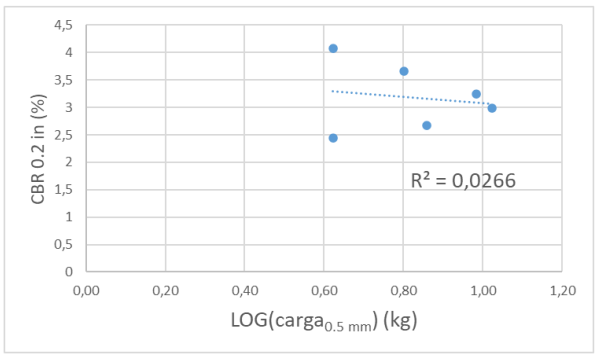


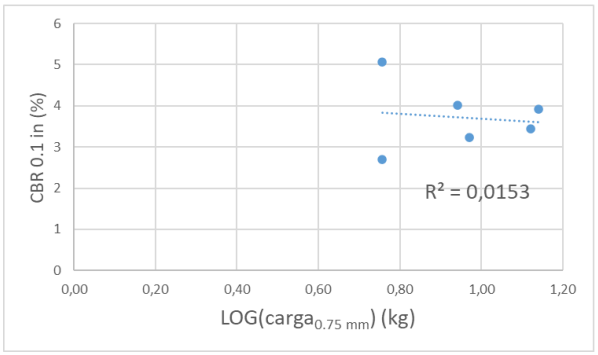
LOG (Carga Mini-CBR) Vs. CBR

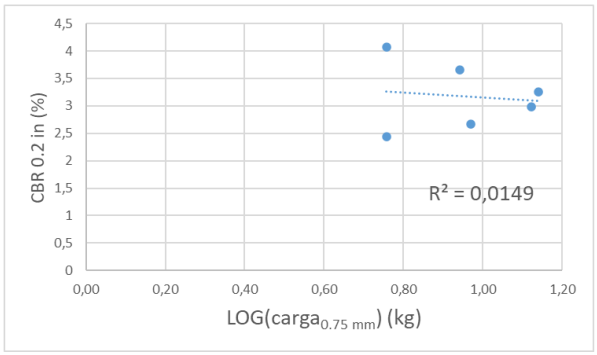


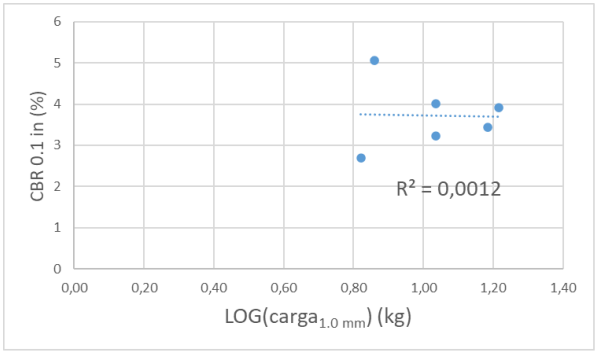


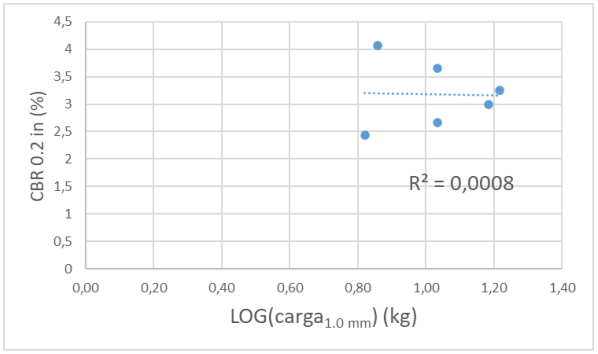


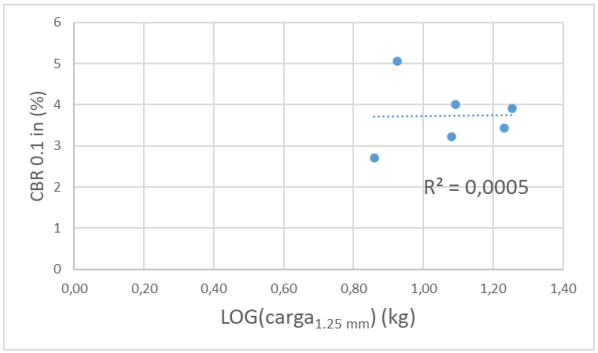


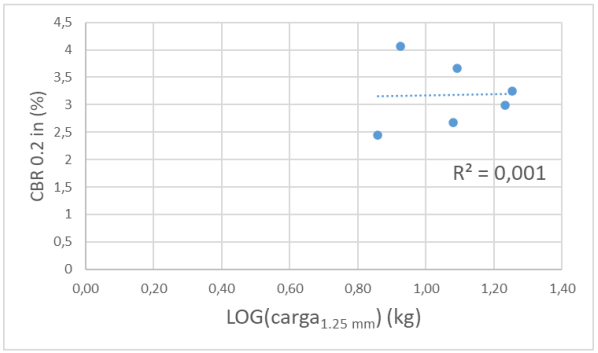


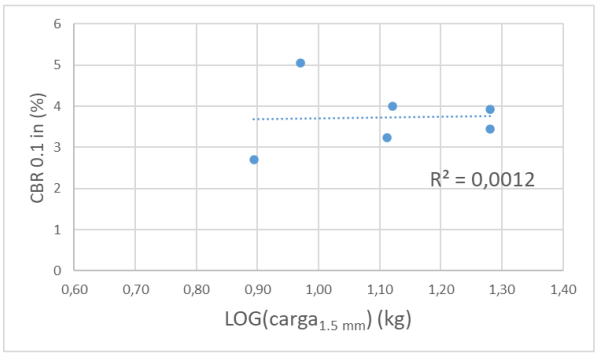


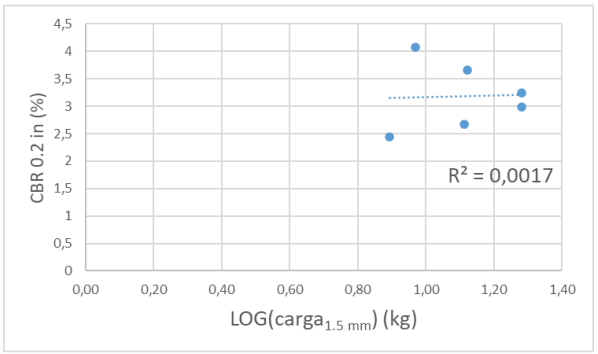

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0012
LOG(carga1.0 mm) (kg)

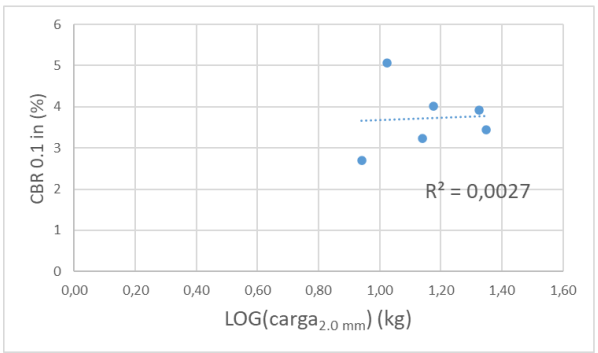

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0008
LOG(carga1.0 mm) (kg)

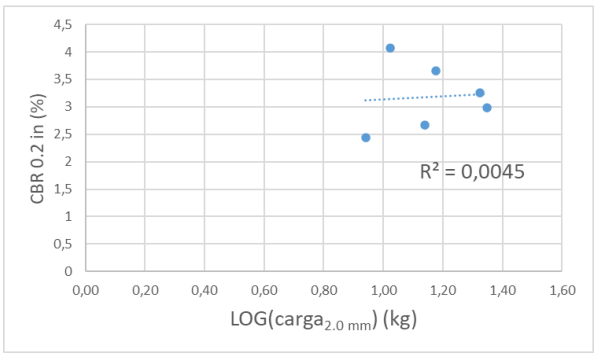

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0005
LOG(carga1.25 mm) (kg)

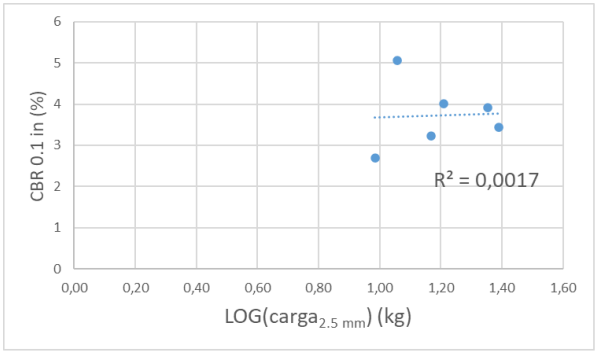

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,001
LOG(carga1.25 mm) (kg)

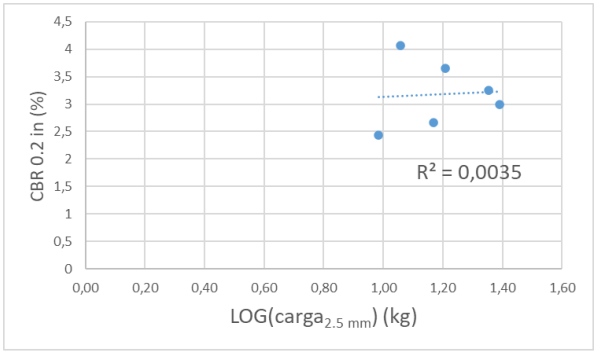

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0012
LOG(carga1.5 mm) (kg)

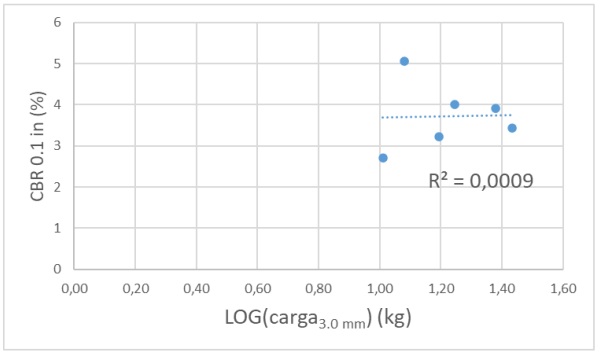

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0017
LOG(carga1.5 mm) (kg)

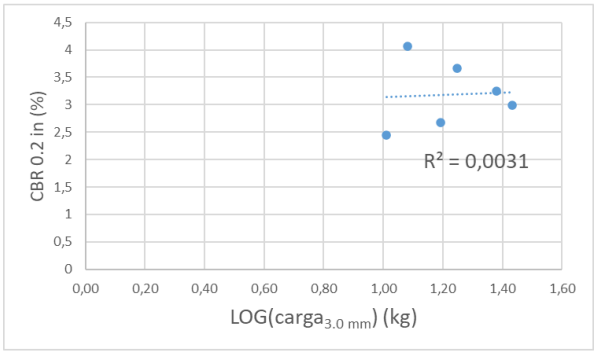

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0027
LOG(carga2.0 mm) (kg)

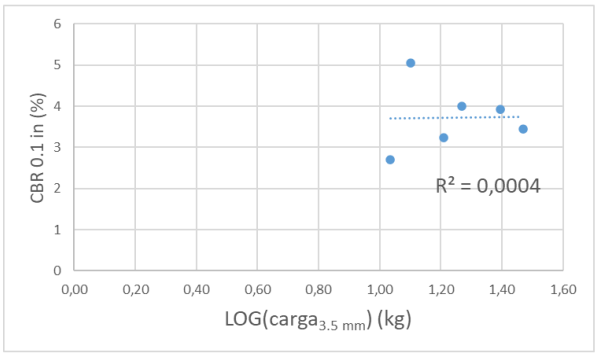

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0045
LOG(carga2.0 mm) (kg)

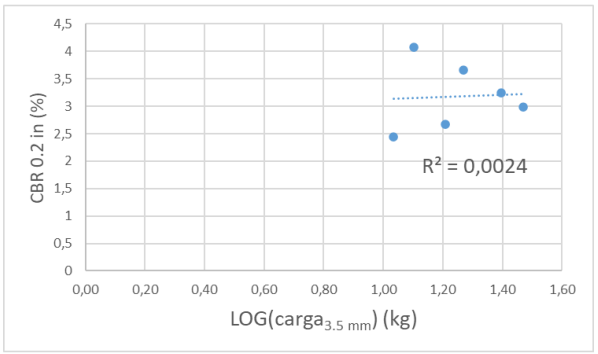

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga2.5 mm) (kg)
R² = 0,0017

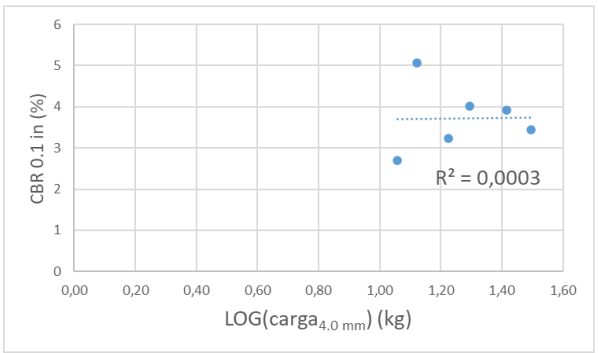

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga2.5 mm) (kg)
R² = 0,0035

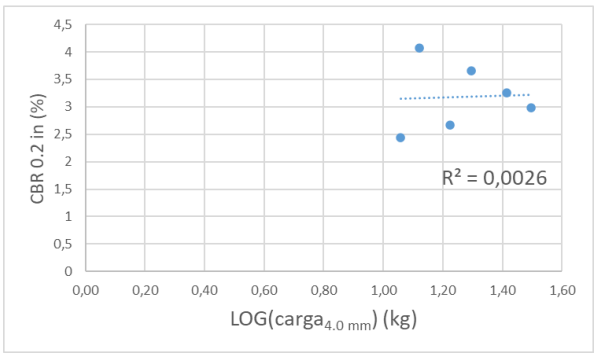

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga3.0 mm) (kg)
R² = 0,0009

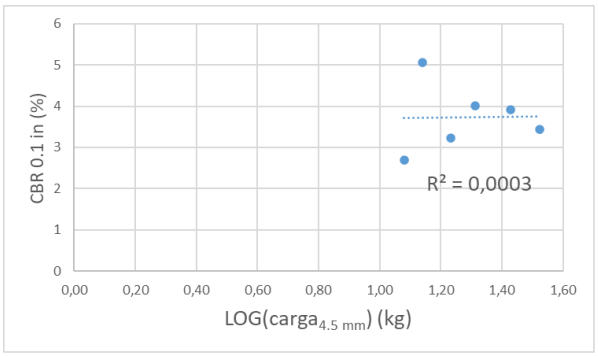

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga3.0 mm) (kg)
R² = 0,0031

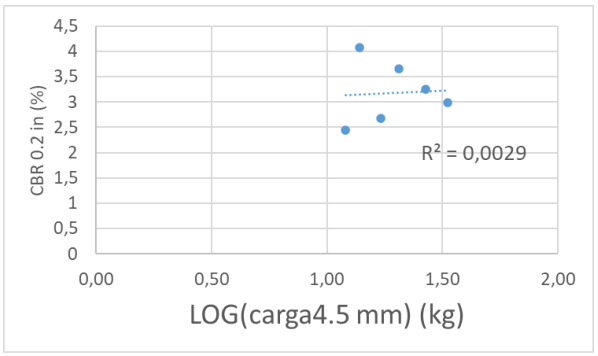

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga3.5 mm) (kg)
R² = 0,0004

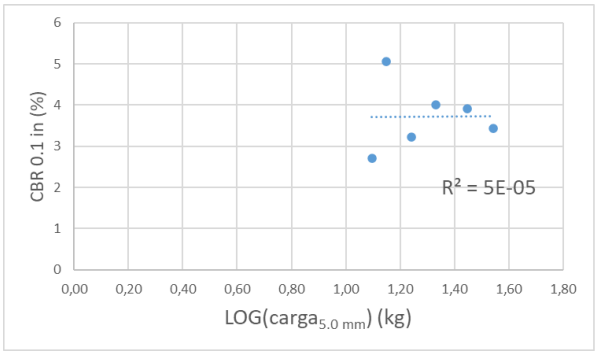

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga3.5 mm) (kg)
R² = 0,0024

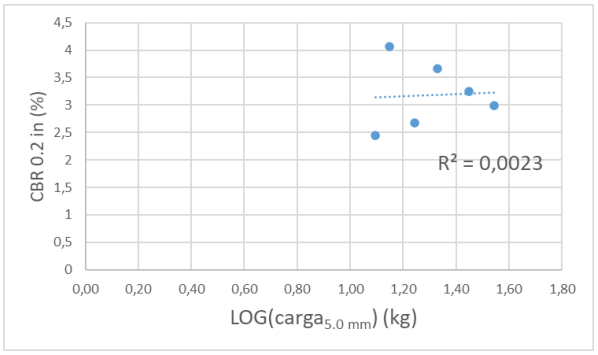

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga4.0 mm) (kg)
R² = 0,0003


CBR 0.2 in (%)
LOG(carga4.0 mm) (kg)
R² = 0,0026

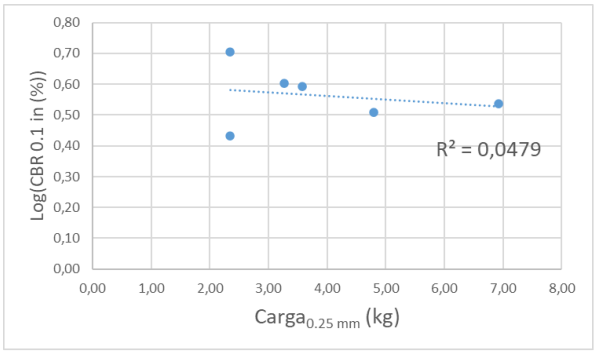


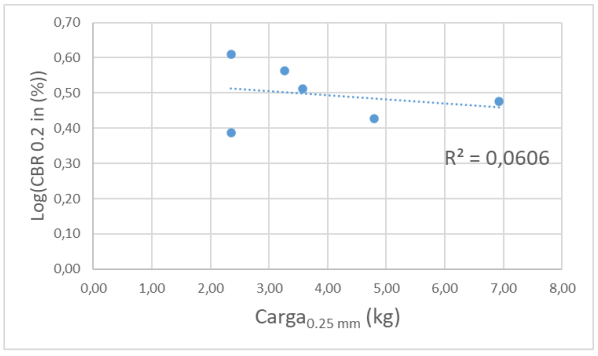


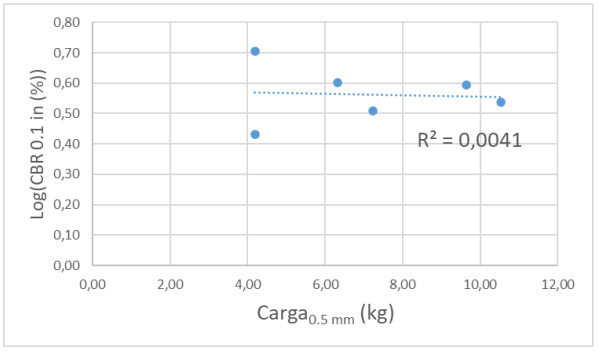


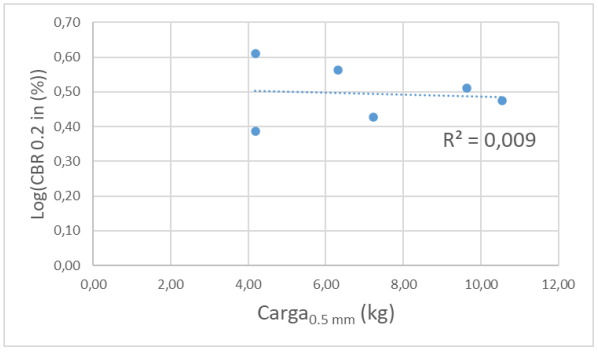


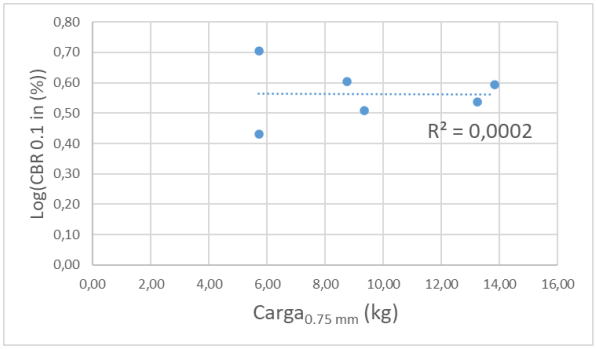
Carga Mini-CBR Vs. LOG (CBR)

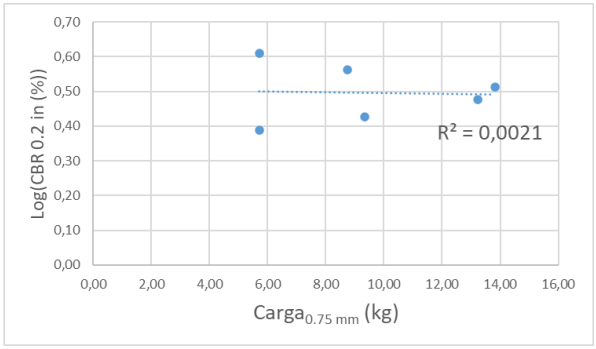


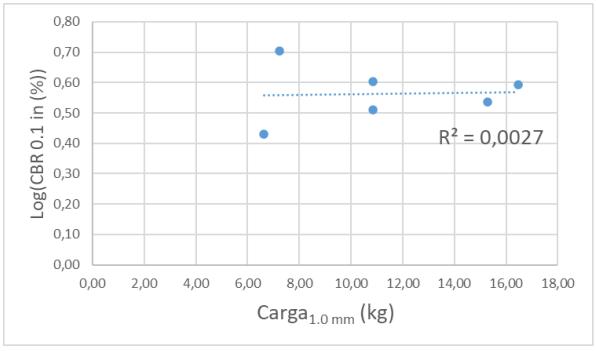


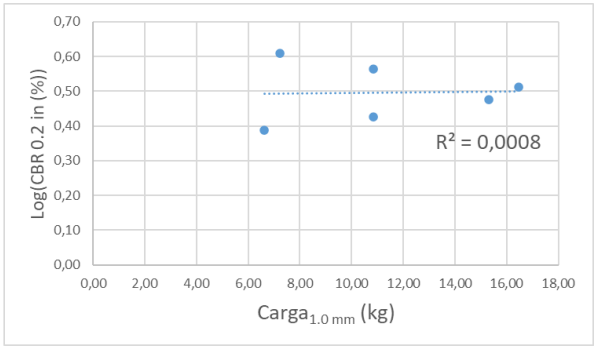


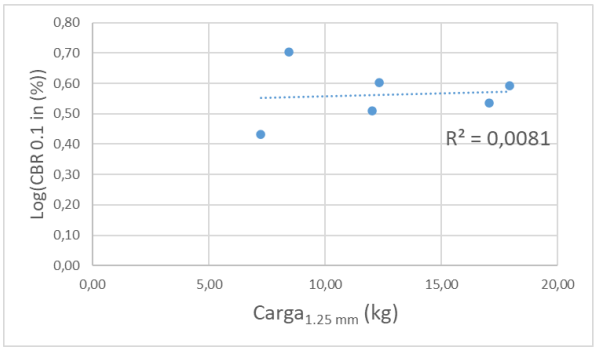


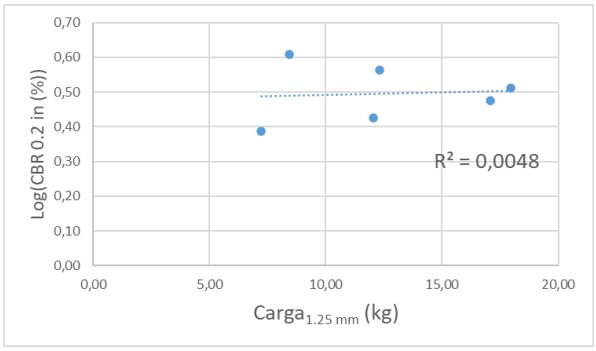

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00
R² = 0,0002
Carga0.75 mm (kg)

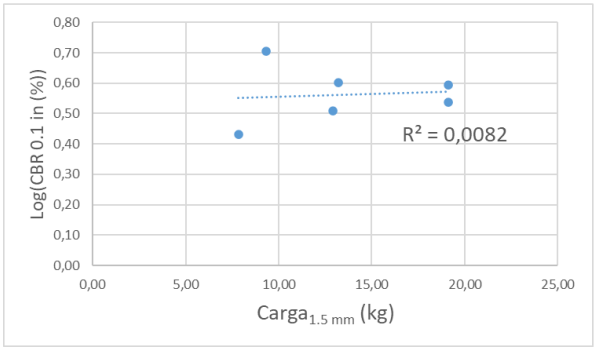

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00
R² = 0,0021
Carga0.75 mm (kg)

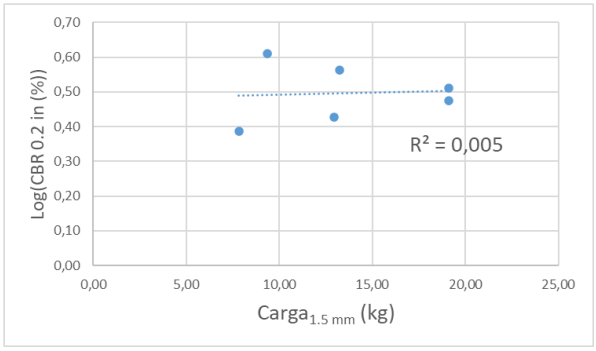

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00 18,00
R² = 0,0027
Carga1.0 mm (kg)

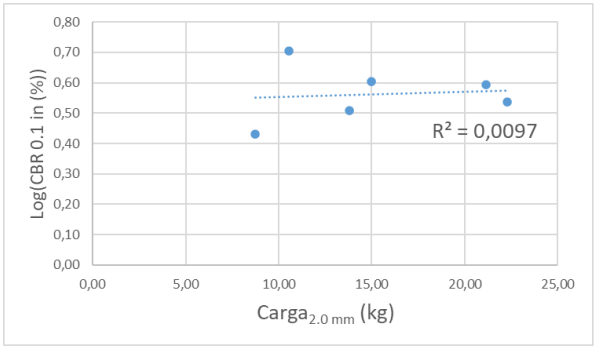

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00 18,00
R² = 0,0008
Carga1.0 mm (kg)

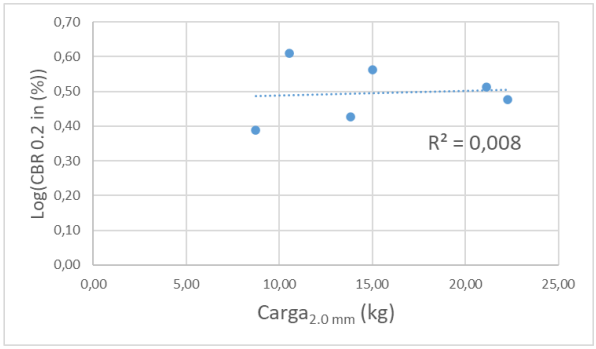

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00
R² = 0,0081
Carga1.25 mm (kg)

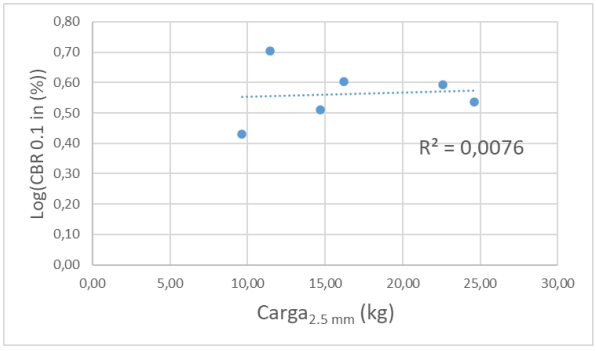

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00
R² = 0,0048
Carga1.25 mm (kg)

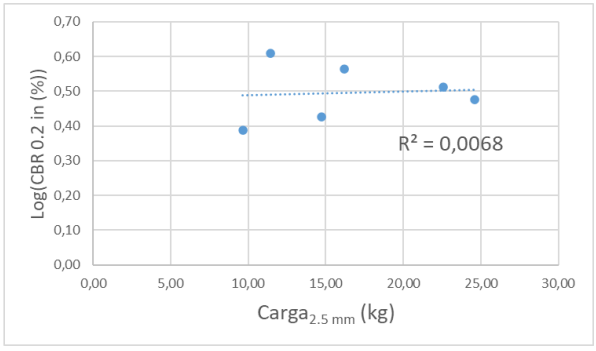

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00
R² = 0,0082
Carga1.5 mm (kg)

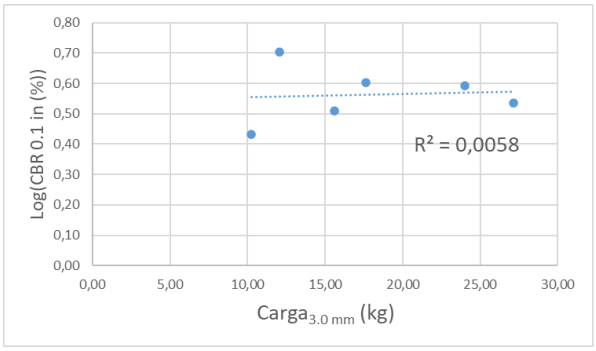

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00
R² = 0,005
Carga1.5 mm (kg)

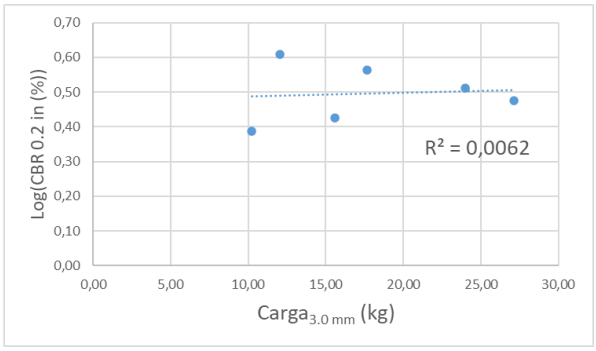

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
R² = 0,0097
Carga2.0 mm (kg)

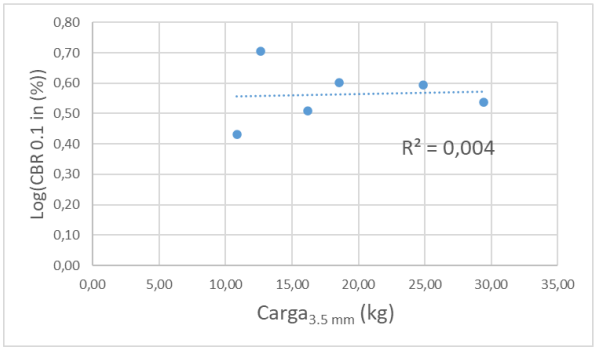

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
R² = 0,008
Carga2.0 mm (kg)

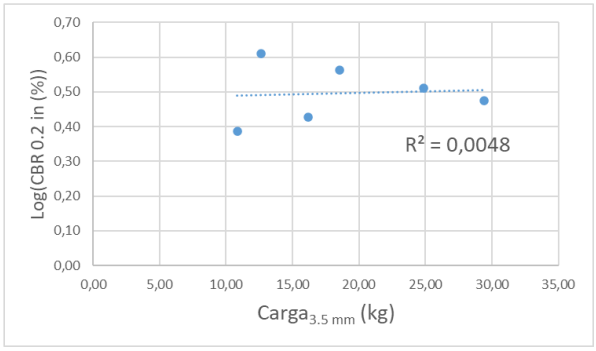

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
R² = 0,0076
Carga2.5 mm (kg)

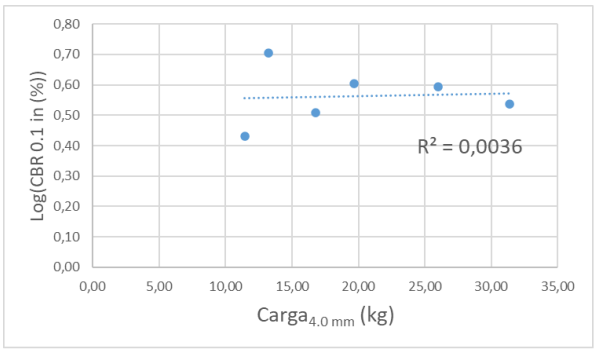

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
R² = 0,0068
Carga2.5 mm (kg)

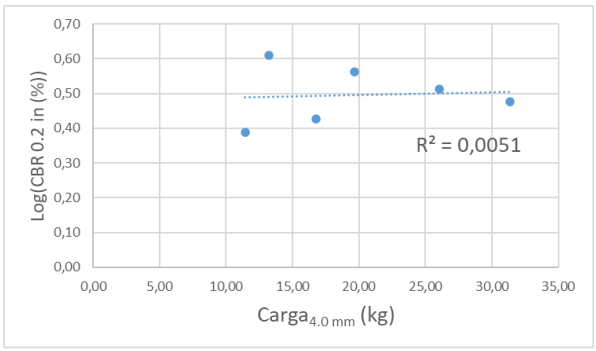

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
R² = 0,0058
Carga3.0 mm (kg)

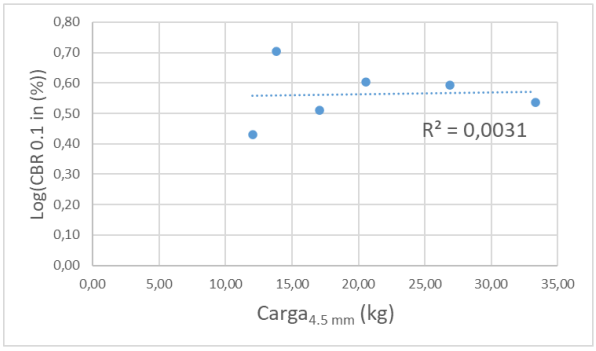

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
R² = 0,0062
Carga3.0 mm (kg)

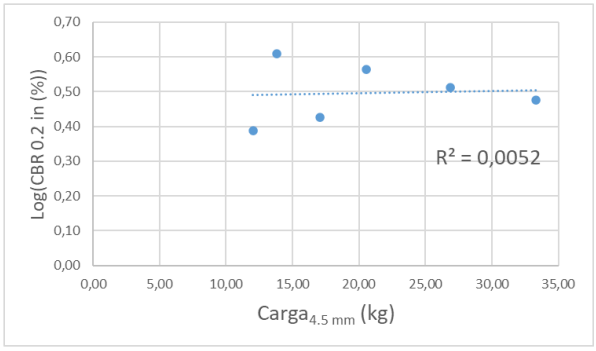

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
R² = 0,004
Carga3.5 mm (kg)

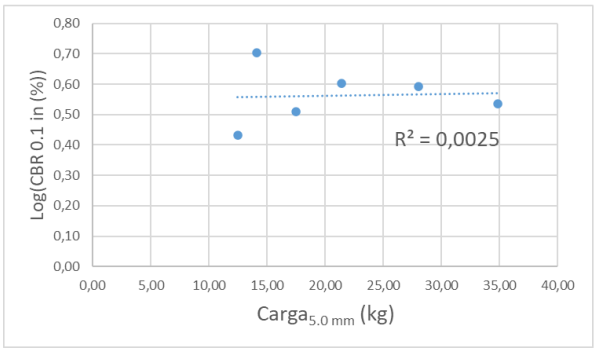

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
R² = 0,0048
Carga3.5 mm (kg)

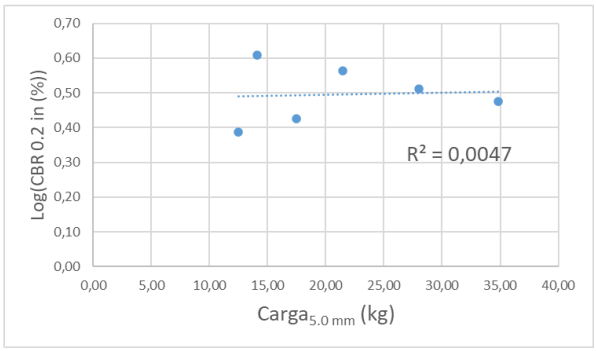






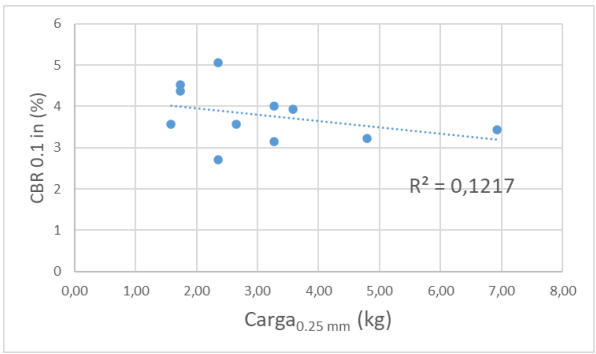


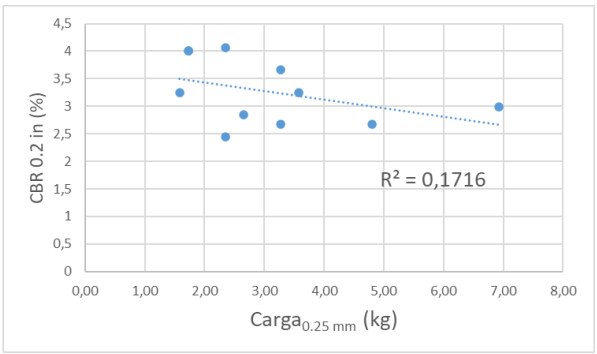


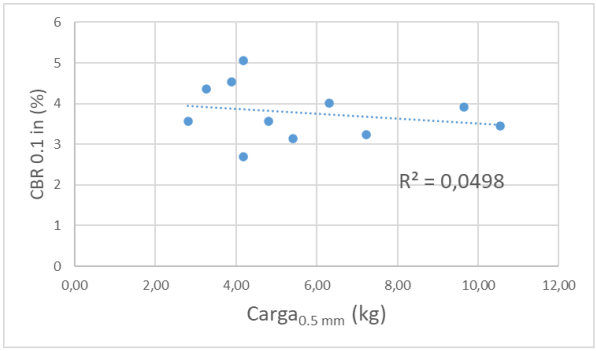


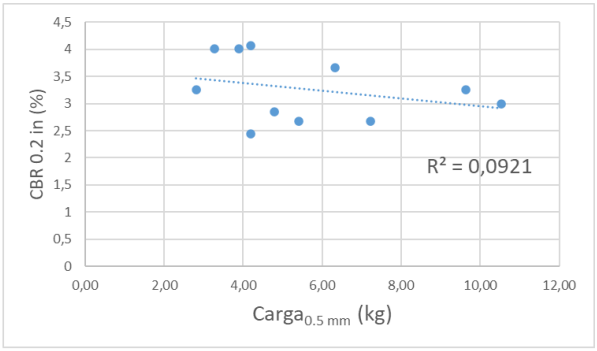
Muestras limos de alta compresibilidad (MH)

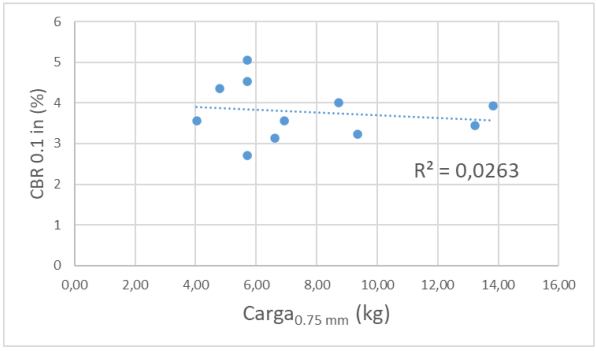
Carga Mini-CBR Vs. CBR

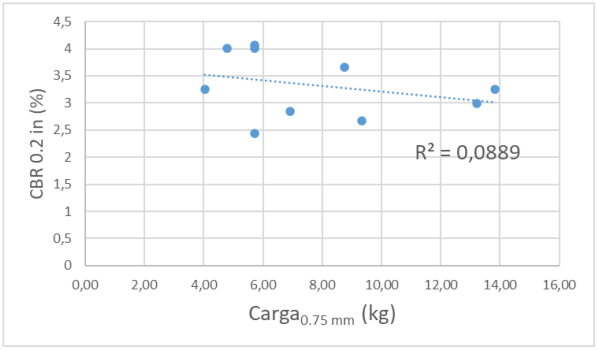


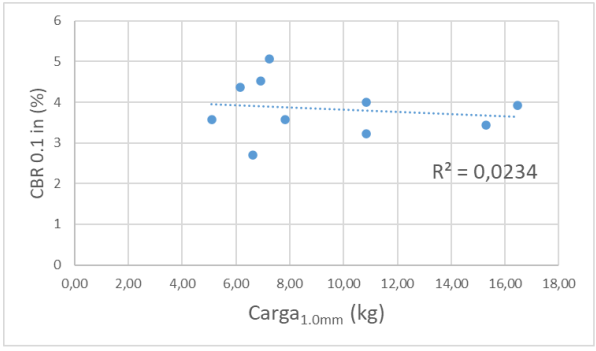


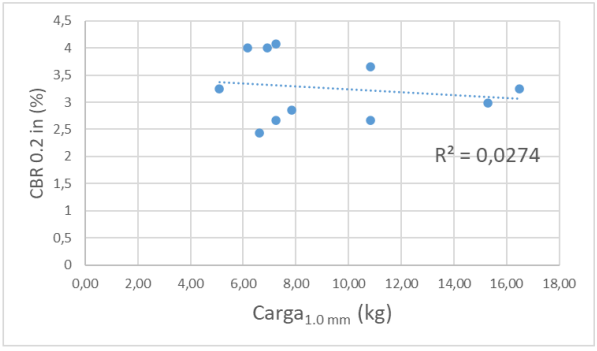

CBR 0.1 in (%)
Carga0.5 mm (kg)
R² = 0,0498

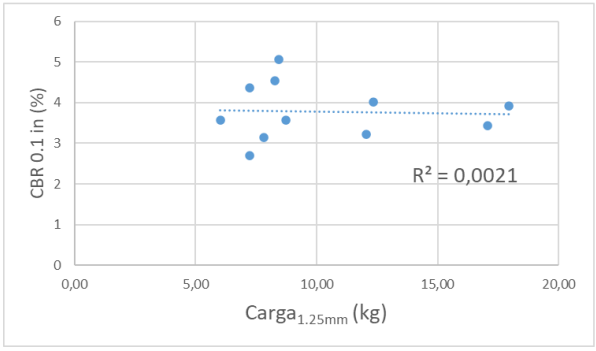

CBR 0.2 in (%)
Carga0.5 mm (kg)
R² = 0,0921

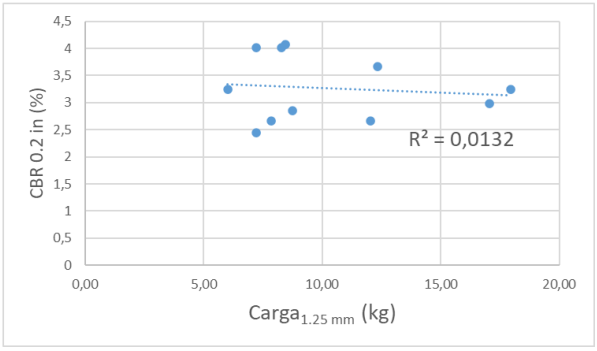

CBR 0.1 in (%)
Carga0.75 mm (kg)
R² = 0,0263

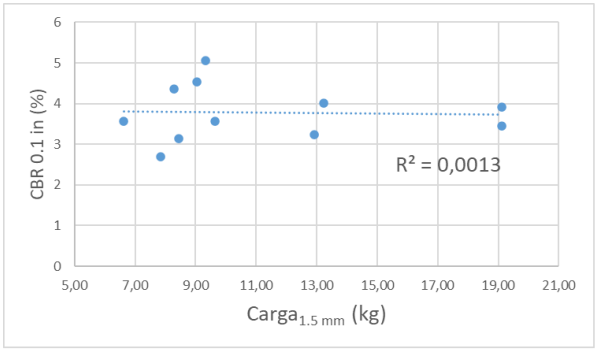

CBR 0.2 in (%)
Carga0.75 mm (kg)
R² = 0,0889

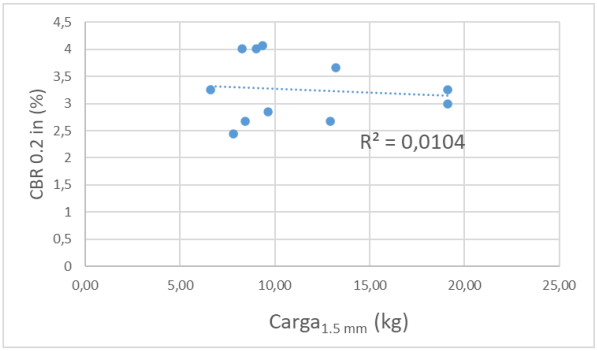

CBR 0.1 in (%)
Carga1.0mm (kg)
R² = 0,0234

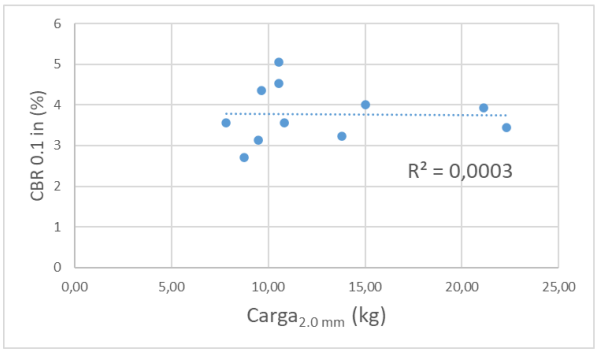

CBR 0.2 in (%)
Carga1.0 mm (kg)
R² = 0,0274

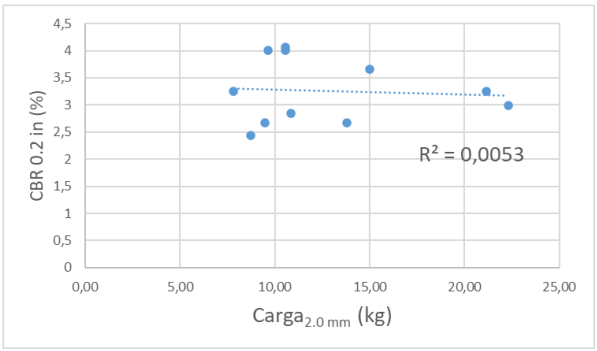

CBR 0.1 in (%)
Carga1.25mm (kg)
R² = 0,0021

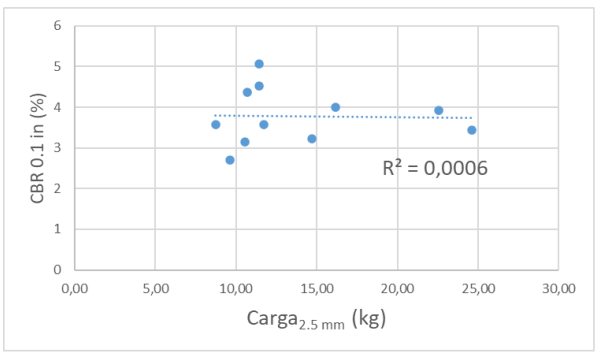

CBR 0.2 in (%)
Carga1.25 mm (kg)
R² = 0,0132

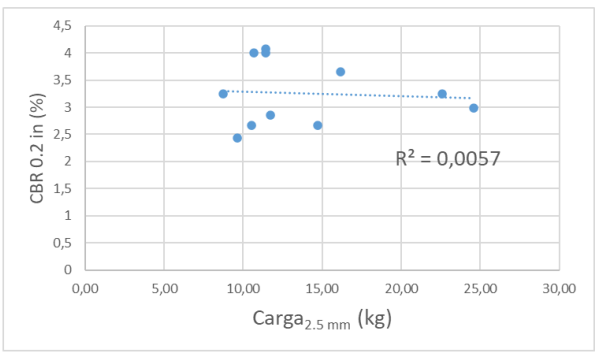

CBR 0.1 in (%)
Carga1.5 mm (kg)
R² = 0,0013

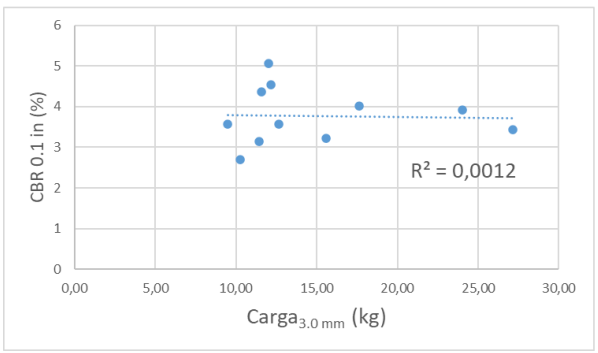

CBR 0.2 in (%)
Carga1.5 mm (kg)
R² = 0,0104

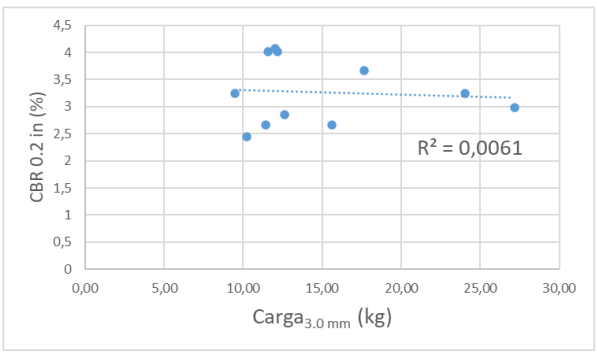

CBR 0.1 in (%)
Carga2.0 mm (kg)
R² = 0,0003

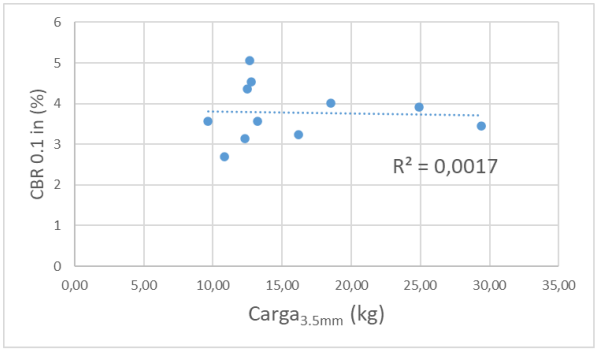

CBR 0.2 in (%)
Carga2.0 mm (kg)
R² = 0,0053

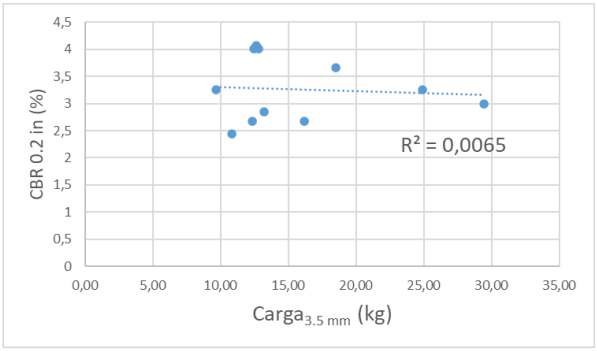

CBR 0.1 in (%)
Carga2.5 mm (kg)
R² = 0,0006

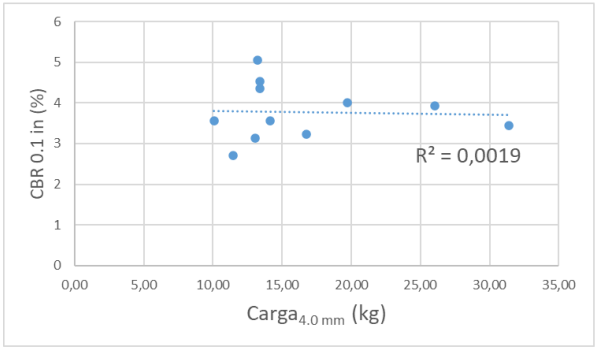

CBR 0.2 in (%)
Carga2.5 mm (kg)
R² = 0,0057

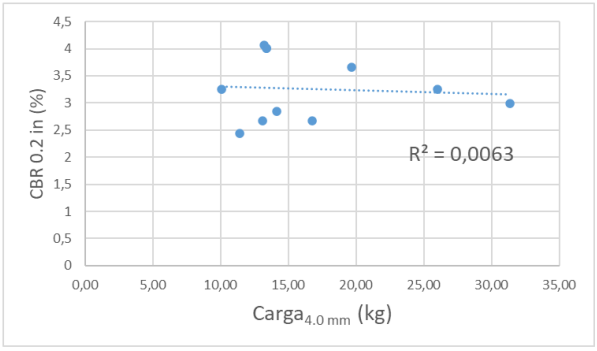

CBR 0.1 in (%)
Carga3.0 mm (kg)
R² = 0,0012

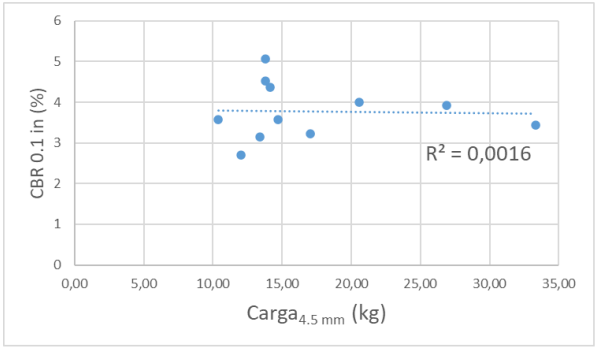

CBR 0.2 in (%)
Carga3.0 mm (kg)
R² = 0,0061

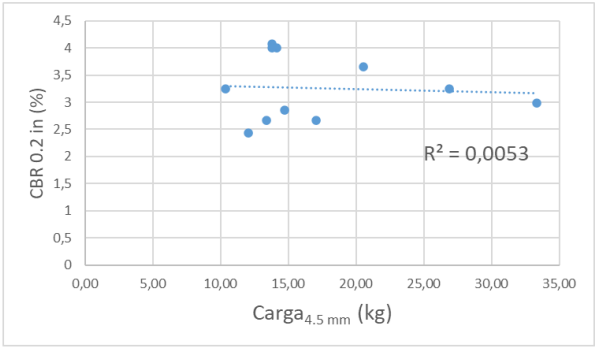

CBR 0.1 in (%)
Carga3.5mm (kg)
R² = 0,0017

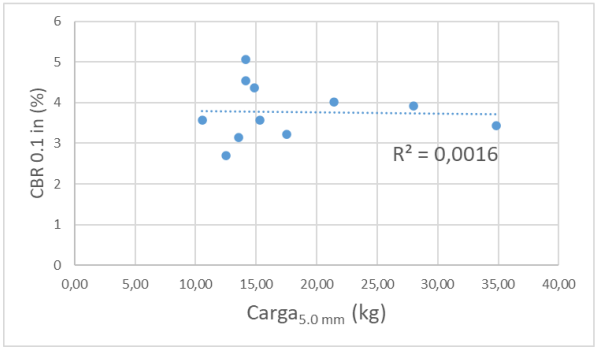

CBR 0.2 in (%)
Carga3.5 mm (kg)
R² = 0,0065

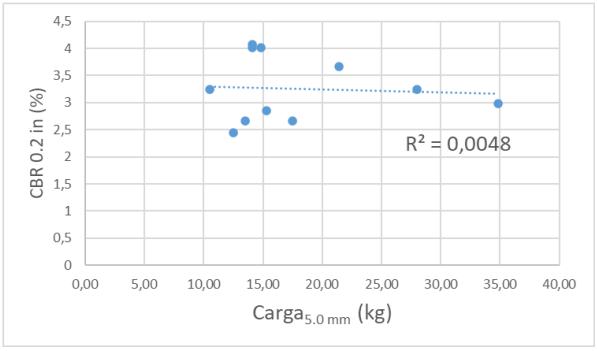

CBR 0.1 in (%)
Carga4.0 mm (kg)
R² = 0,0019


CBR 0.2 in (%)
Carga4.0 mm (kg)
R² = 0,0063

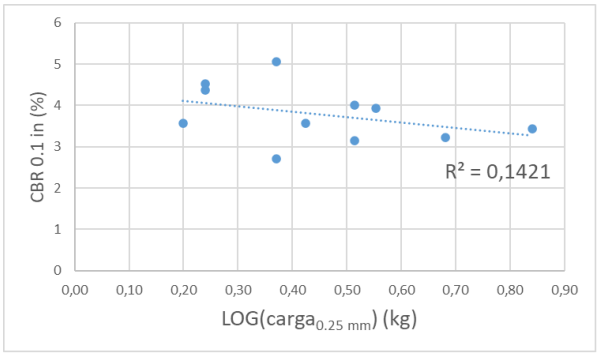

CBR 0.1 in (%)
Carga4.5 mm (kg)
R² = 0,0016

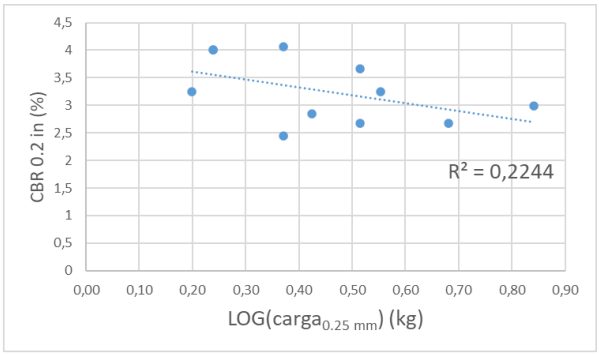

CBR 0.2 in (%)
Carga4.5 mm (kg)
R² = 0,0053

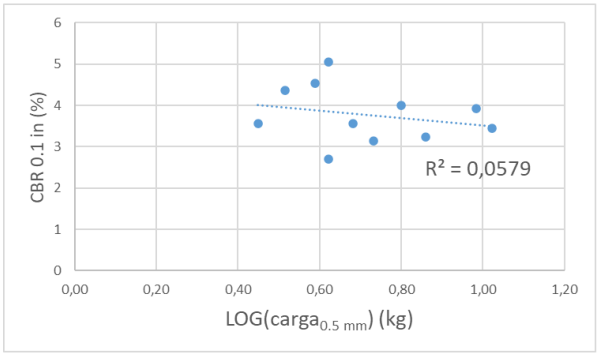

CBR 0.1 in (%)
Carga5.0 mm (kg)
R² = 0,0016

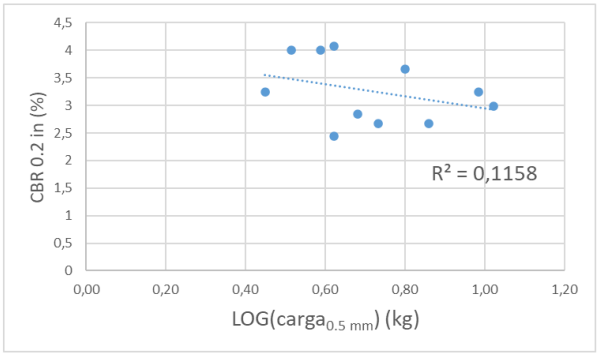

CBR 0.2 in (%)
Carga5.0 mm (kg)
R² = 0,0048

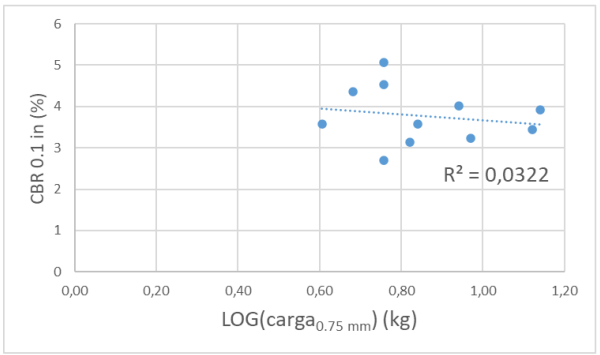
LOG (Carga Mini-CBR) Vs. CBR

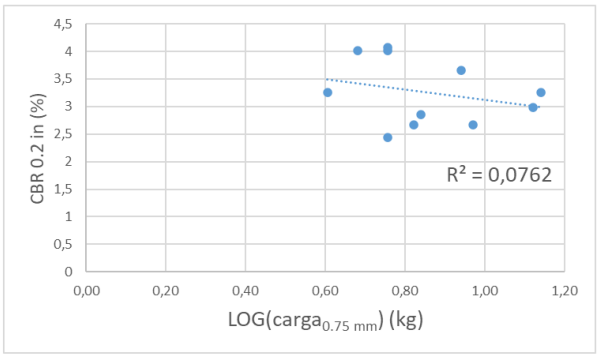


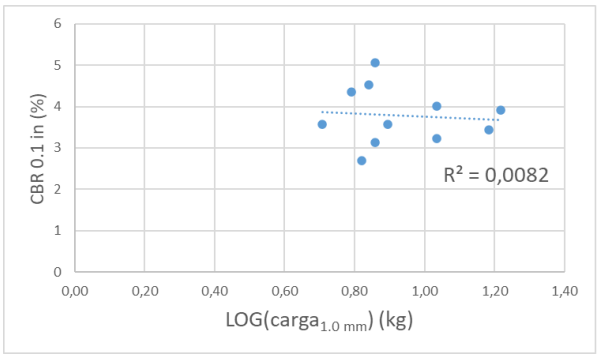


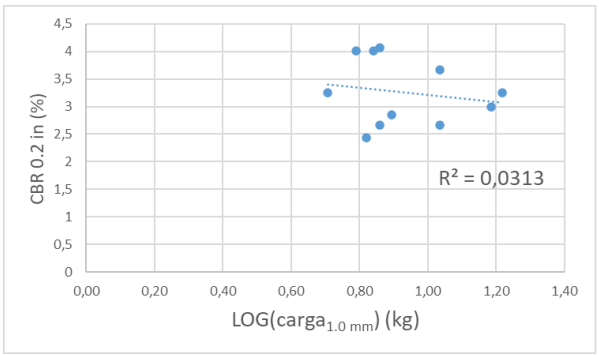


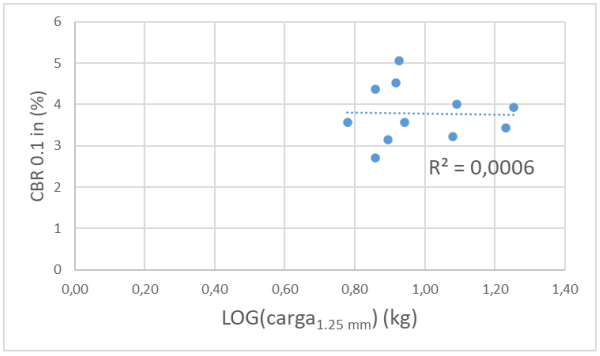


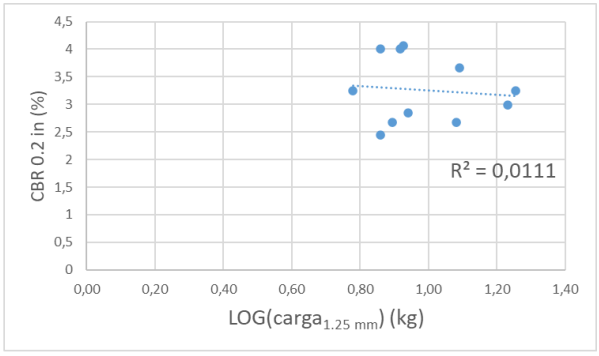


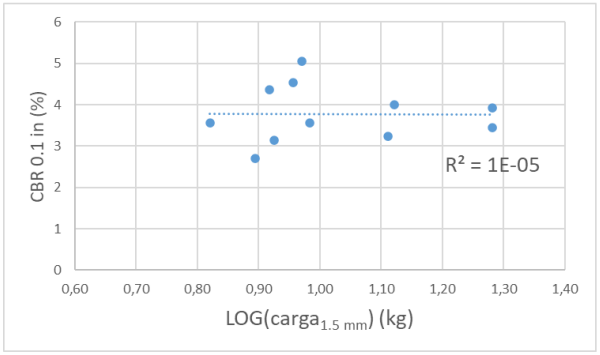


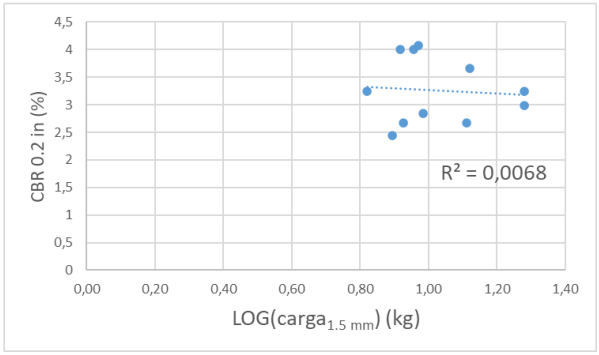


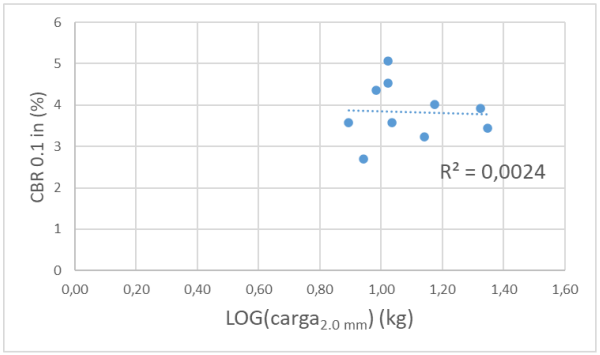


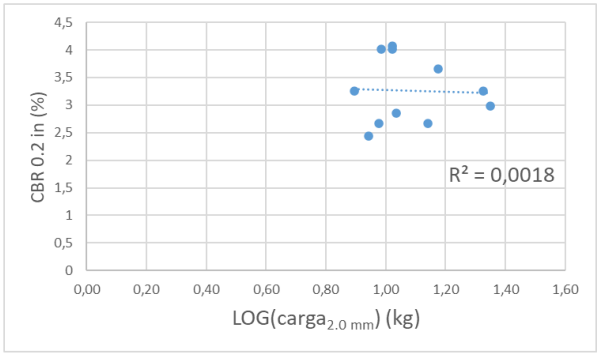

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga1.25 mm) (kg)
R² = 0,0006

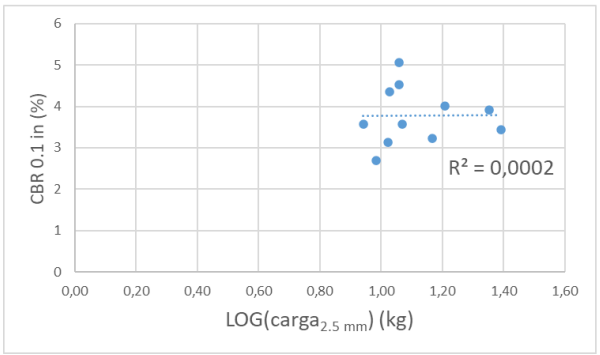

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga1.25 mm) (kg)
R² = 0,0111

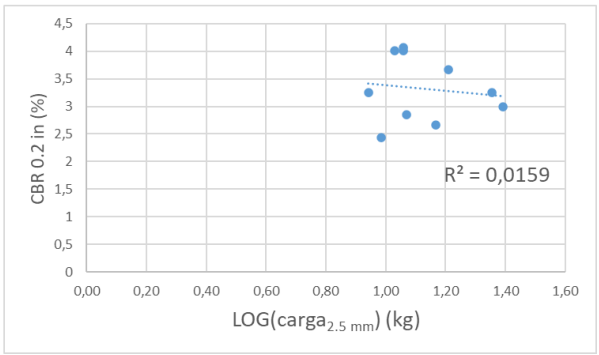

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga1.5 mm) (kg)
R² = 1E-05

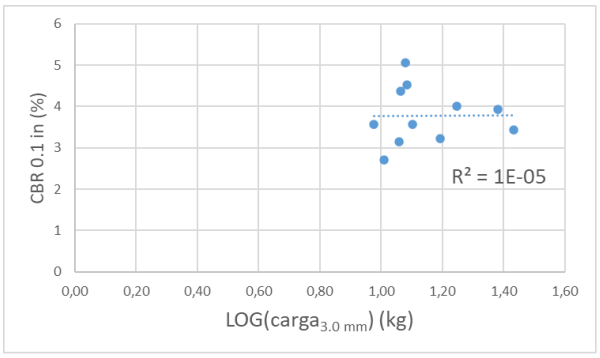

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga1.5 mm) (kg)
R² = 0,0068

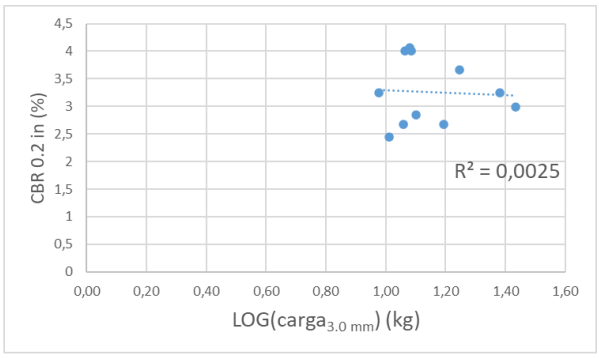

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga2.0 mm) (kg)
R² = 0,0024

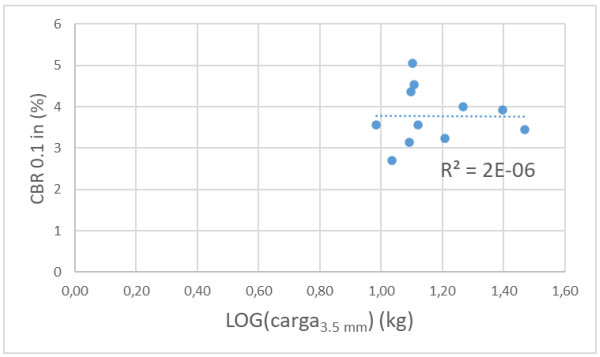

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga2.0 mm) (kg)
R² = 0,0018

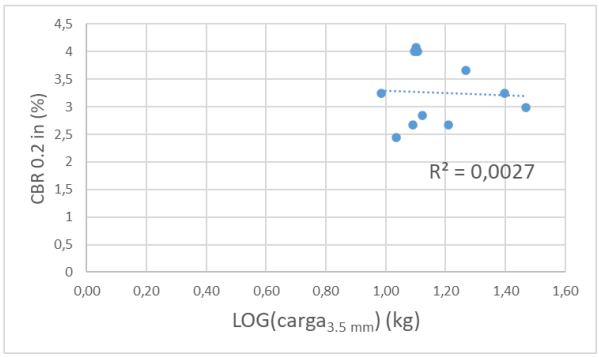

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga2.5 mm) (kg)
R² = 0,0002

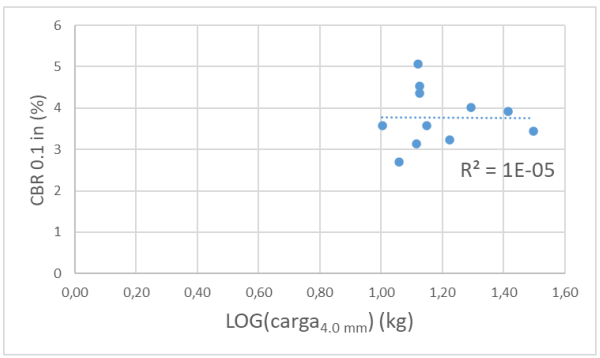

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga2.5 mm) (kg)
R² = 0,0159

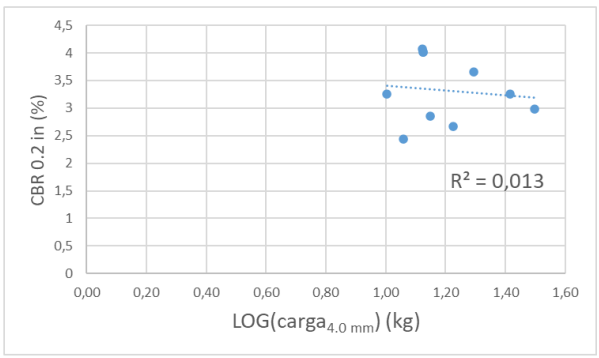

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga3.0 mm) (kg)
R² = 1E-05

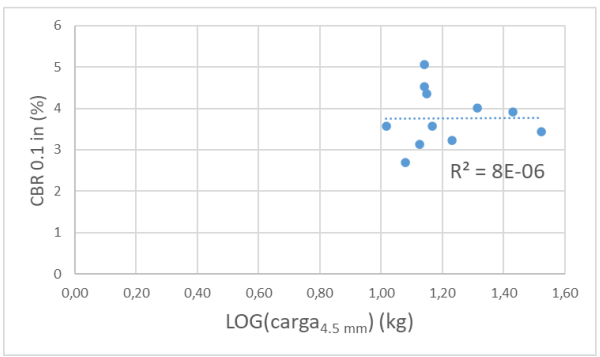

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga3.0 mm) (kg)
R² = 0,0025

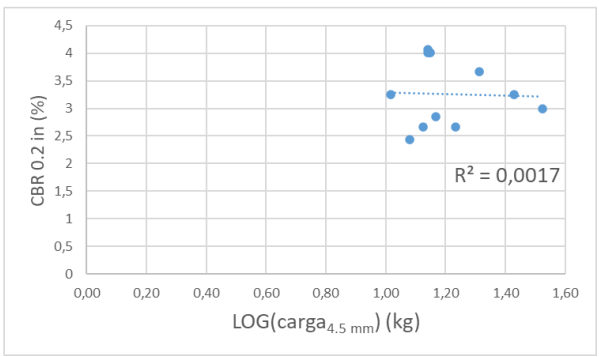

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga3.5 mm) (kg)
R² = 2E-06

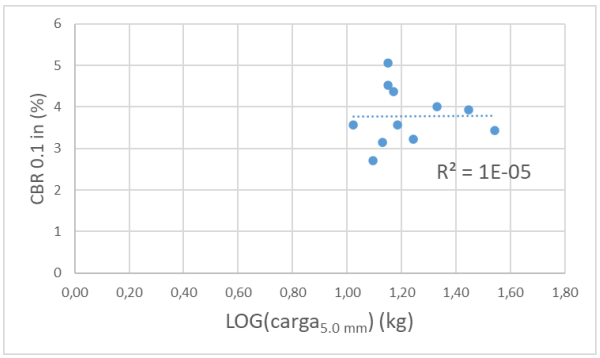

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga3.5 mm) (kg)
R² = 0,0027

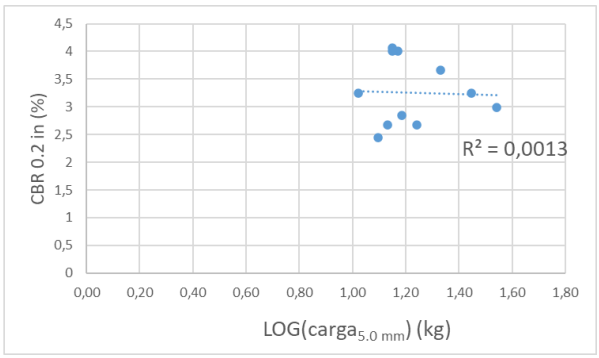

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga4.0 mm) (kg)
R² = 1E-05


CBR 0.2 in (%)
LOG(carga4.0 mm) (kg)
R² = 0,013

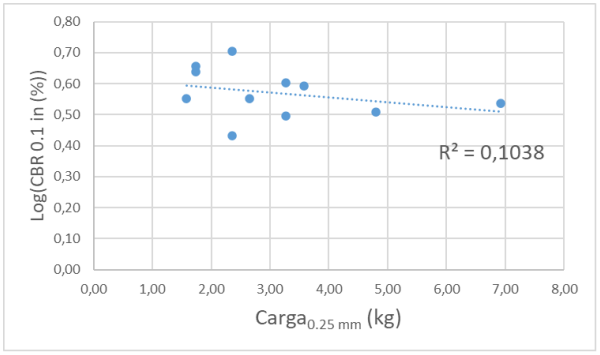

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga4.5 mm) (kg)
R² = 8E-06

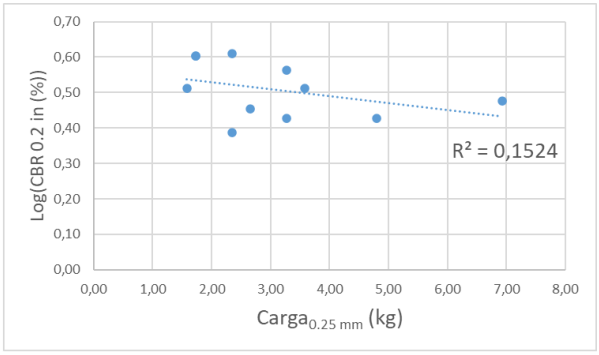

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga4.5 mm) (kg)
R² = 0,0017

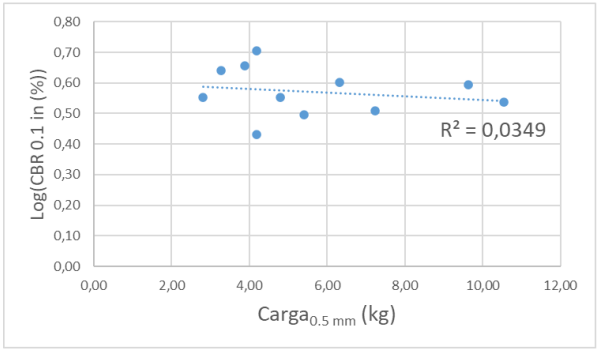


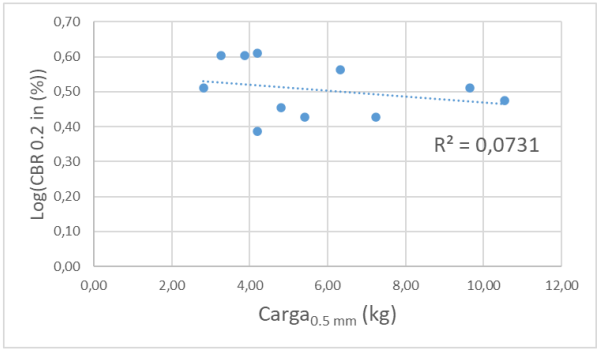


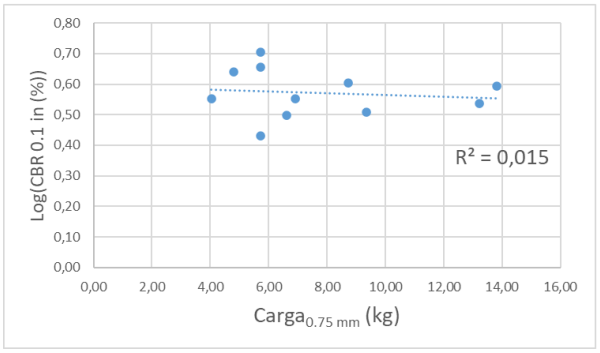
Carga Mini-CBR Vs. LOG (CBR)

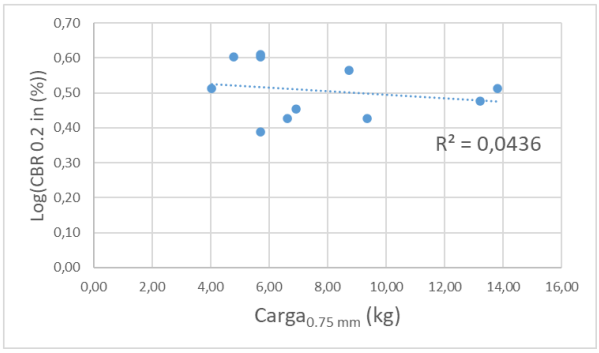


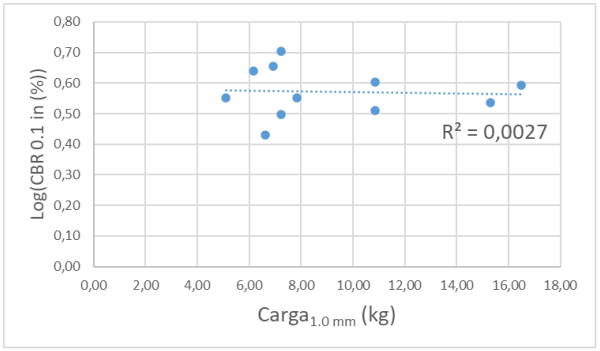


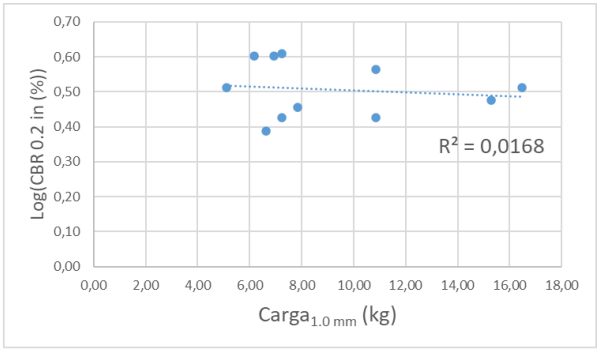


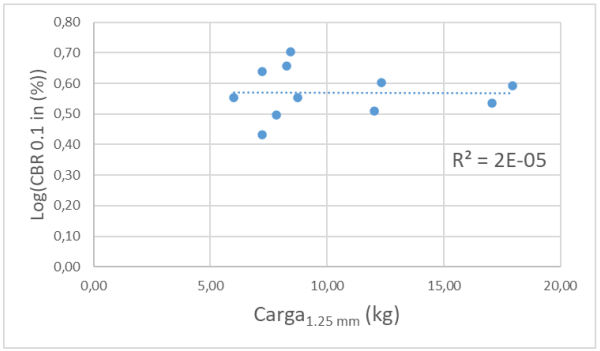


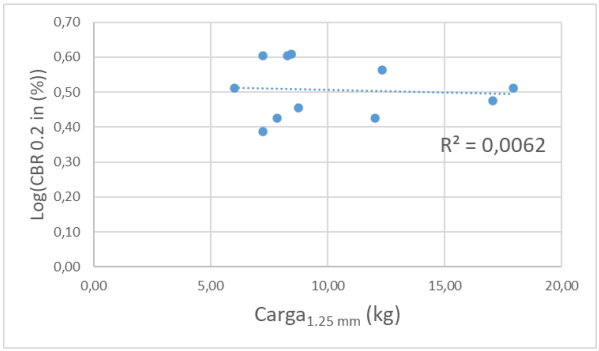


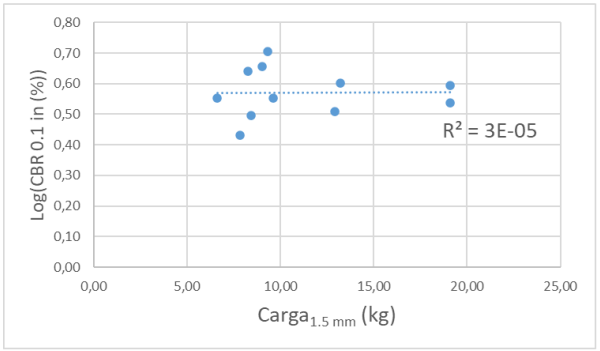


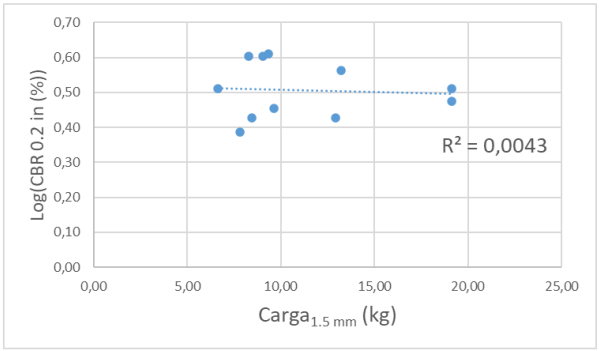

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00 18,00
Carga1.0 mm (kg)
R² = 0,0027

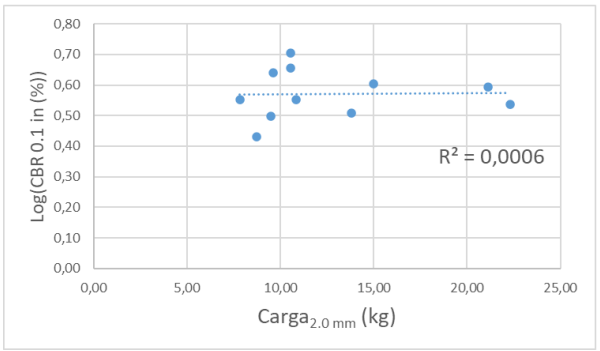

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00 18,00
Carga1.0 mm (kg)
R² = 0,0168

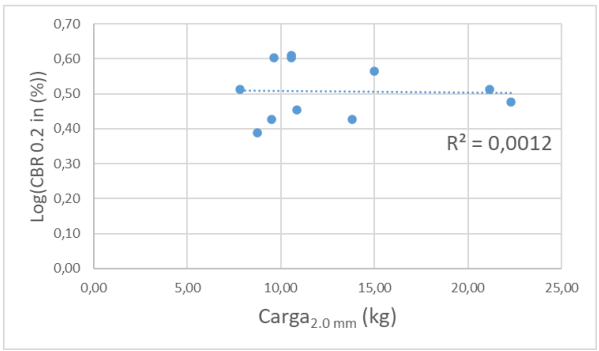

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00
Carga1.25 mm (kg)
R² = 2E-05

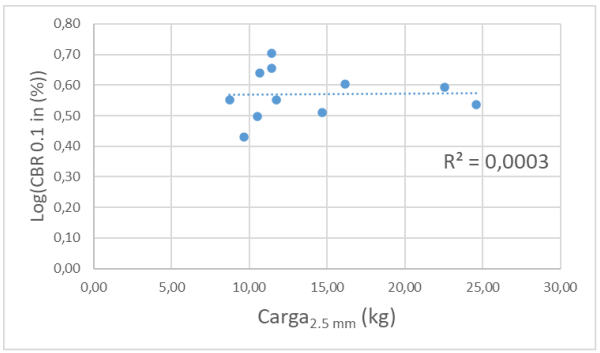

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00
Carga1.25 mm (kg)
R² = 0,0062

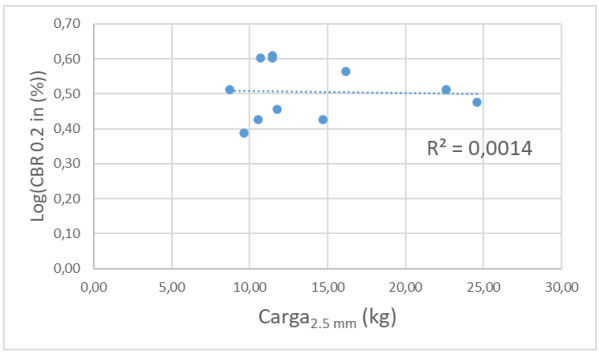

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00
Carga1.5 mm (kg)
R² = 3E-05

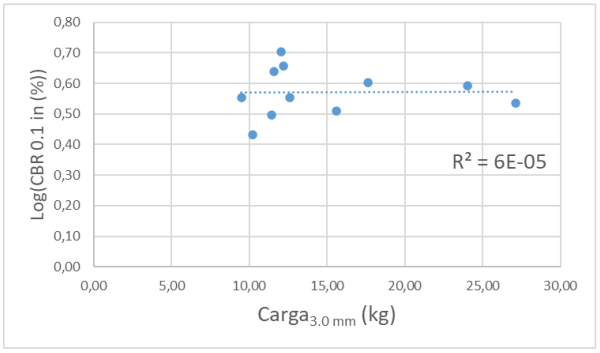

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00
Carga1.5 mm (kg)
R² = 0,0043

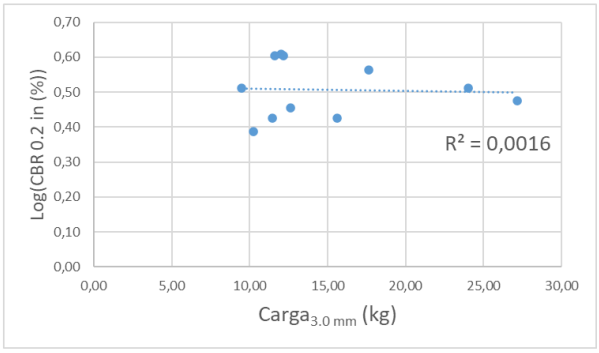

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00
Carga2.0 mm (kg)
R² = 0,0006

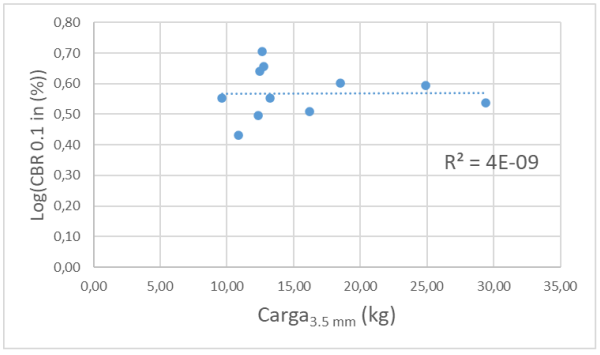

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00
Carga2.0 mm (kg)
R² = 0,0012

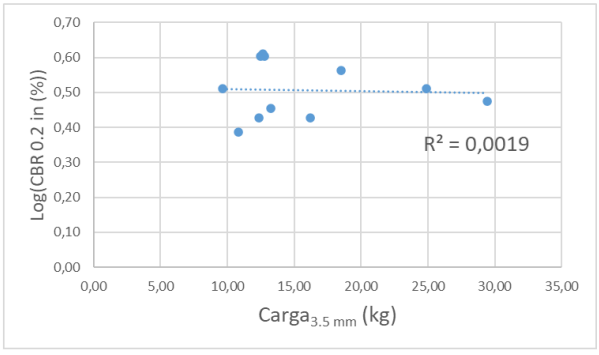

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00
Carga2.5 mm (kg)
R² = 0,0003

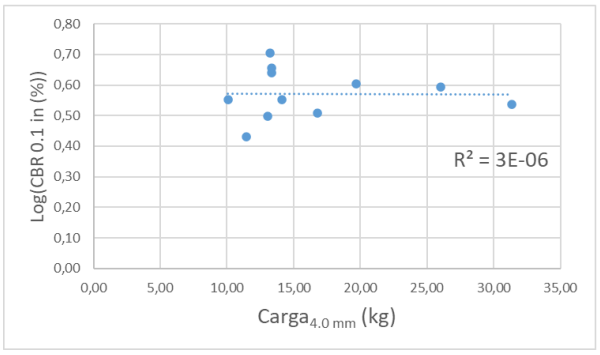

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00
Carga2.5 mm (kg)
R² = 0,0014

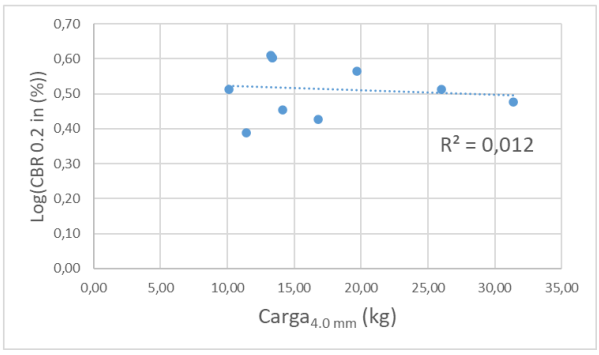

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00
Carga3.0 mm (kg)
R² = 6E-05

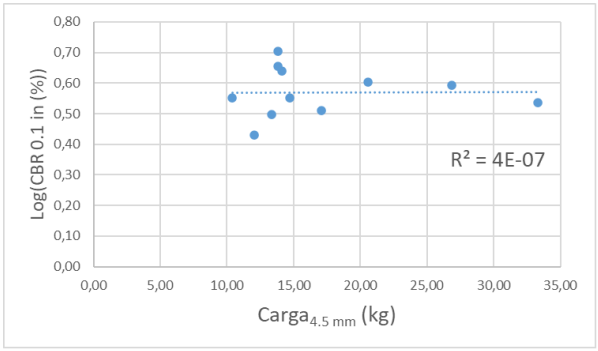

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00
Carga3.0 mm (kg)
R² = 0,0016

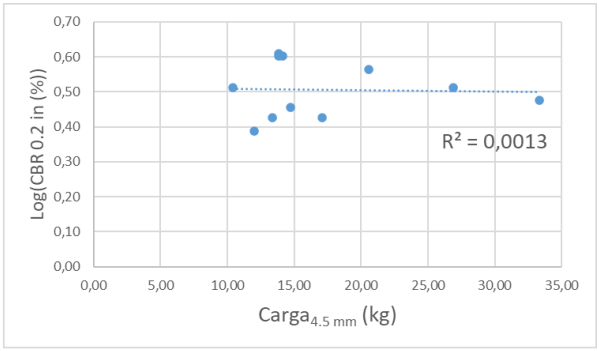

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00 35,00
Carga3.5 mm (kg)
R² = 4E-09

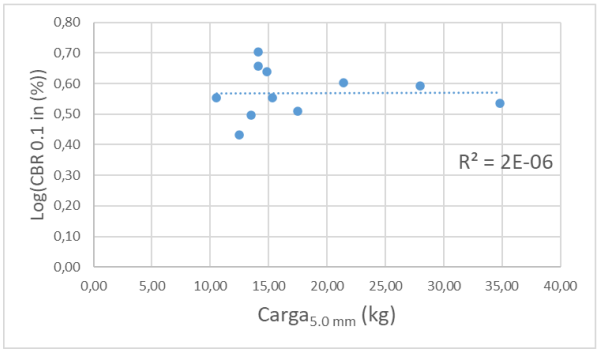

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00 35,00
Carga3.5 mm (kg)
R² = 0,0019

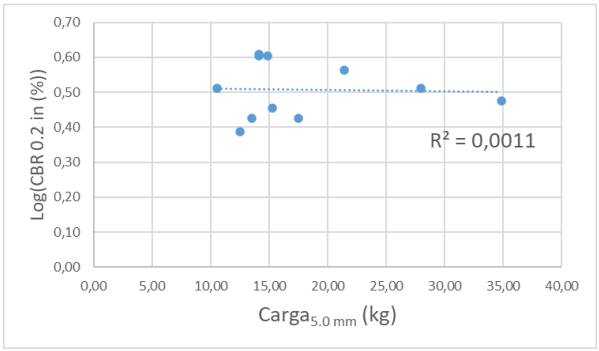

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00 35,00
Carga4.0 mm (kg)
R² = 3E-06


Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00 35,00
Carga4.0 mm (kg)
R² = 0,012



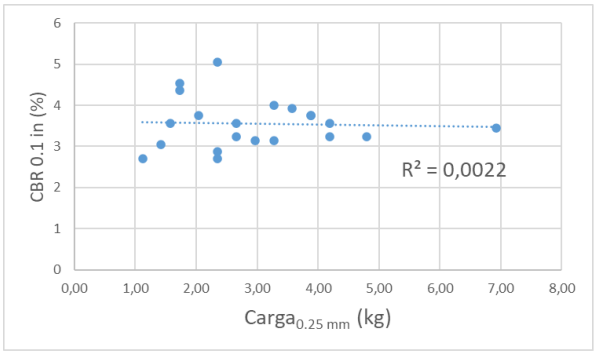


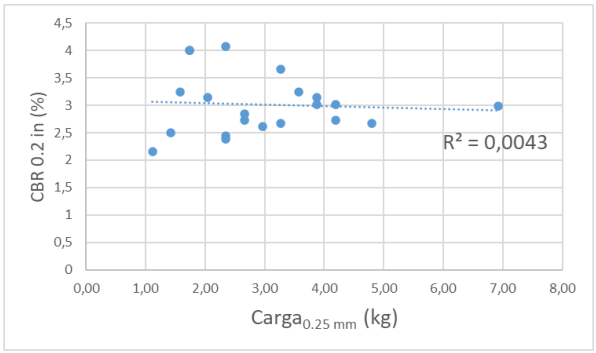


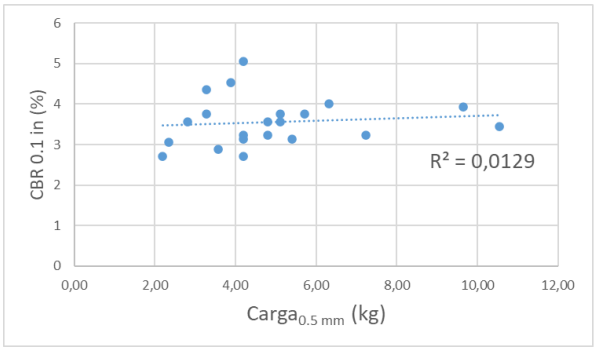


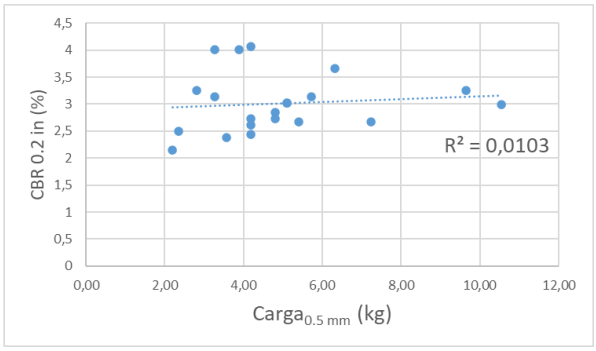
Todas las muestras

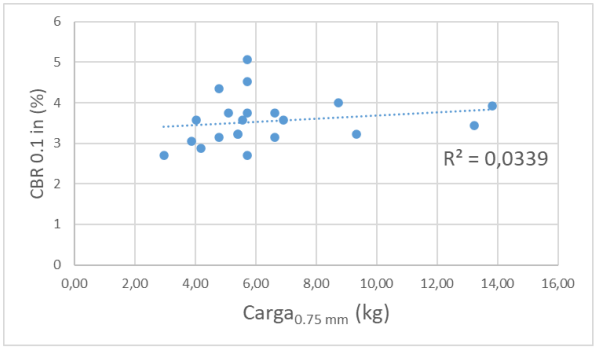
Carga Mini-CBR Vs. CBR

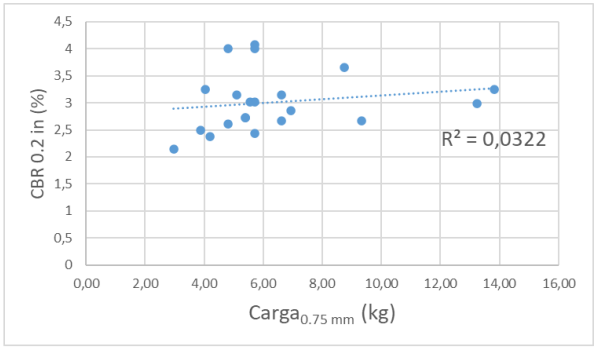


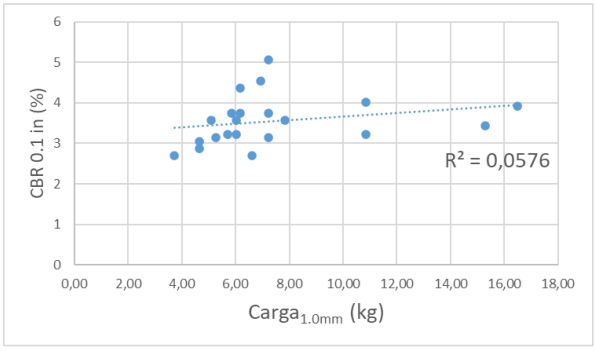


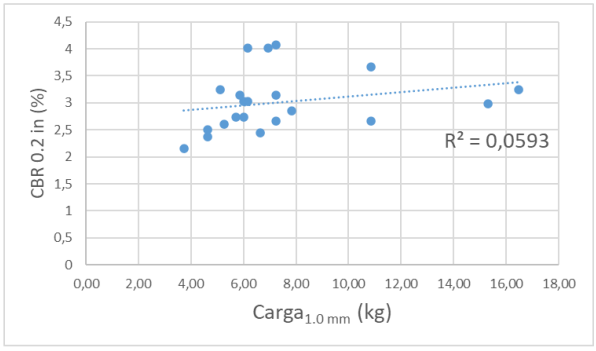


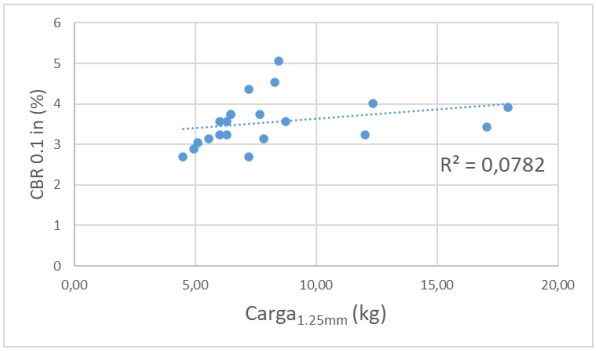


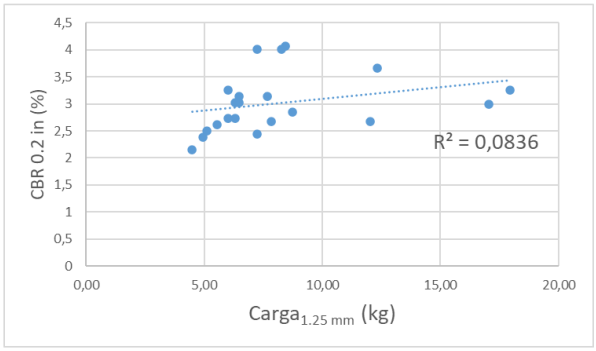

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0339
Carga0.75 mm (kg)

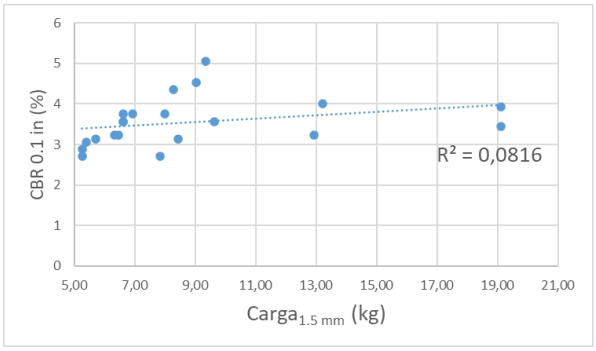

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0322
Carga0.75 mm (kg)

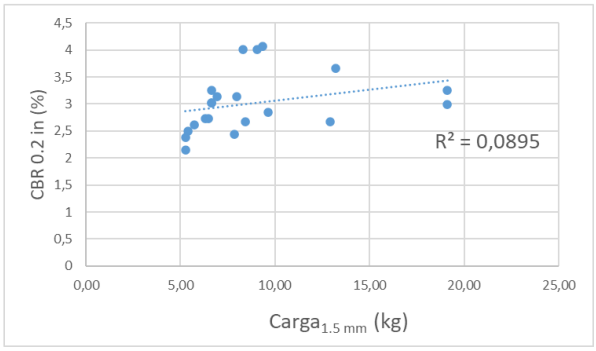

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0576
Carga1.0mm (kg)

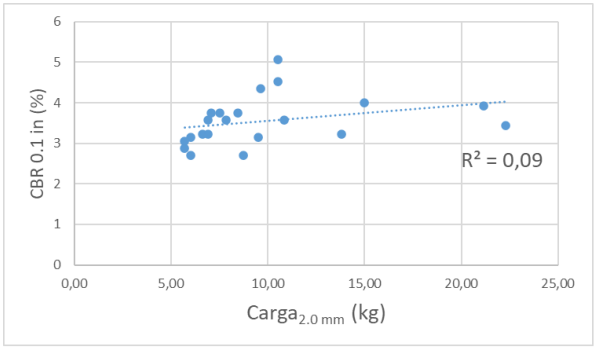

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0593
Carga1.0 mm (kg)

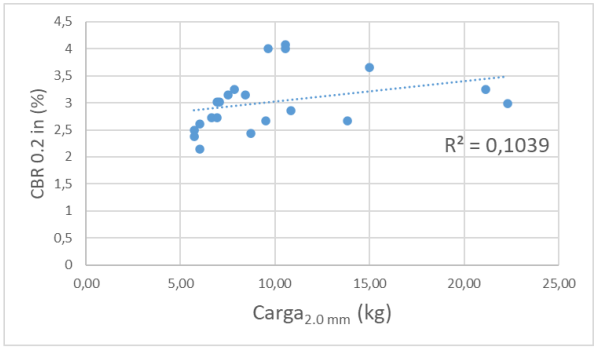

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0782
Carga1.25mm (kg)

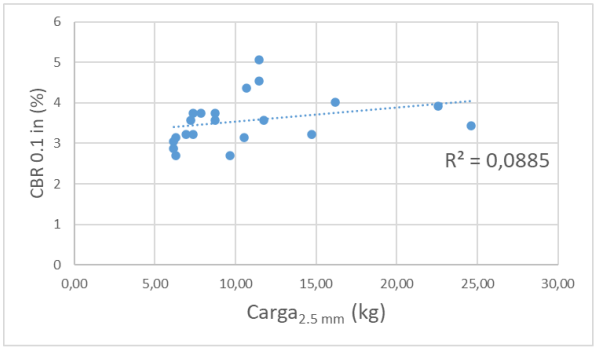

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0836
Carga1.25 mm (kg)

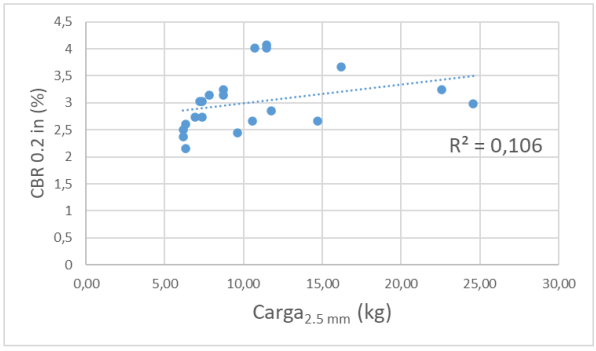

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0816
Carga1.5 mm (kg)

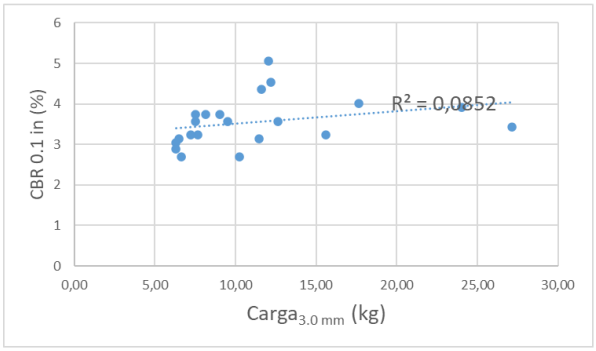

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0895
Carga1.5 mm (kg)

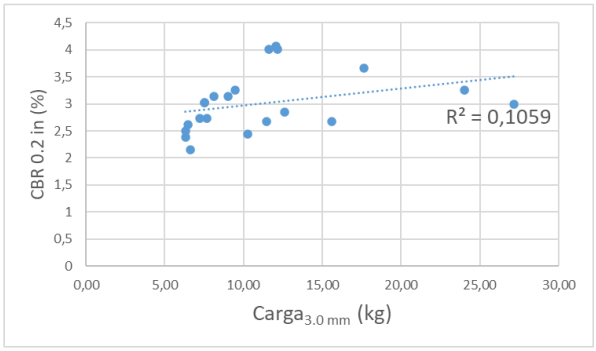

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,09
Carga2.0 mm (kg)

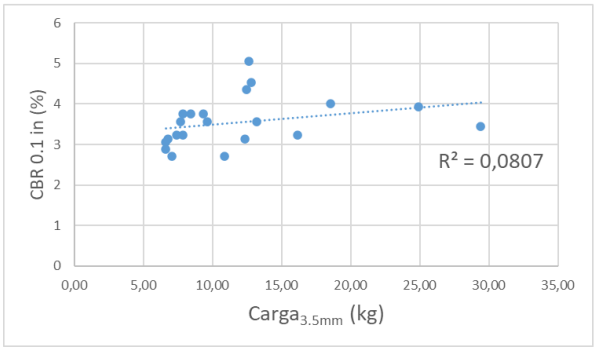

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,1039
Carga2.0 mm (kg)

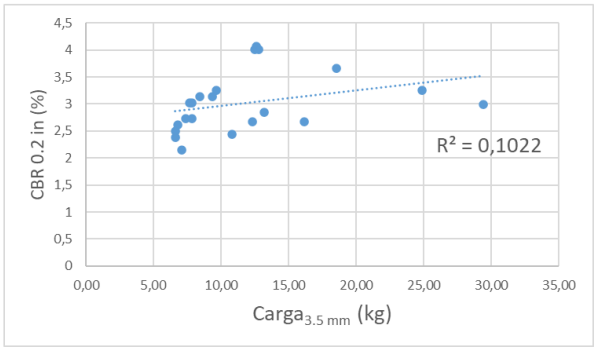

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0885
Carga2.5 mm (kg)

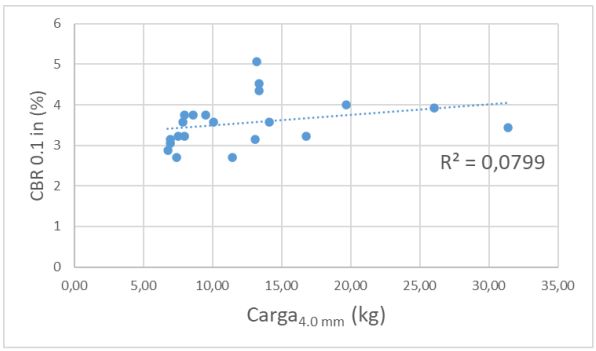

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,106
Carga2.5 mm (kg)

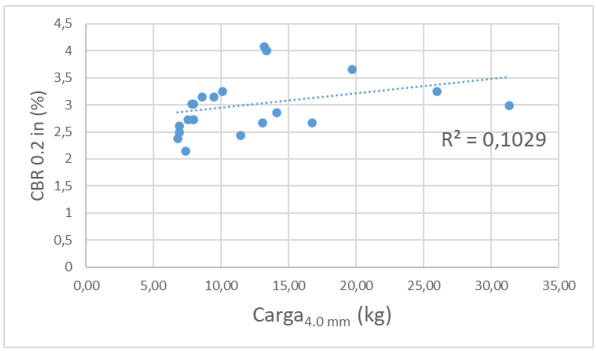

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0852
Carga3.0 mm (kg)

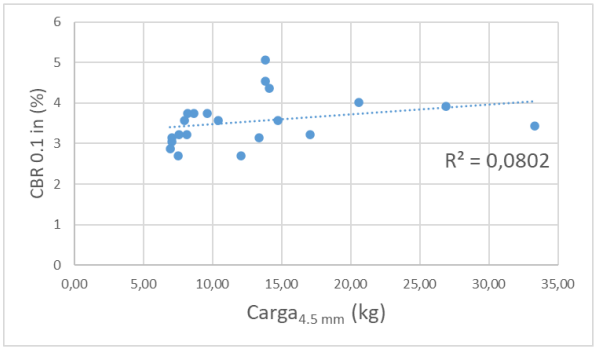

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,1059
Carga3.0 mm (kg)

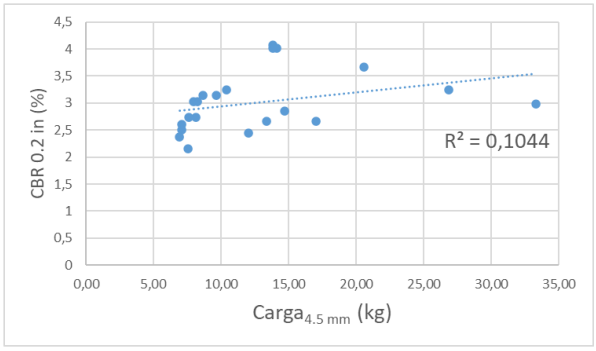

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0807
Carga3.5mm (kg)

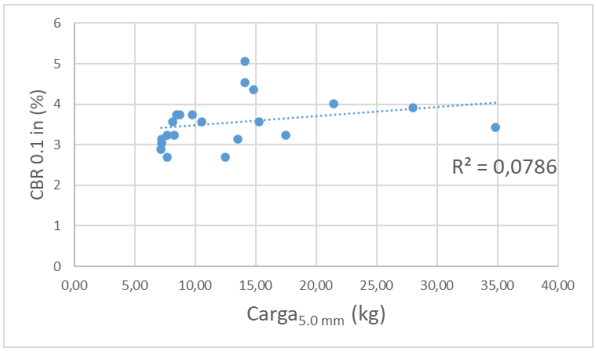

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,1022
Carga3.5 mm (kg)

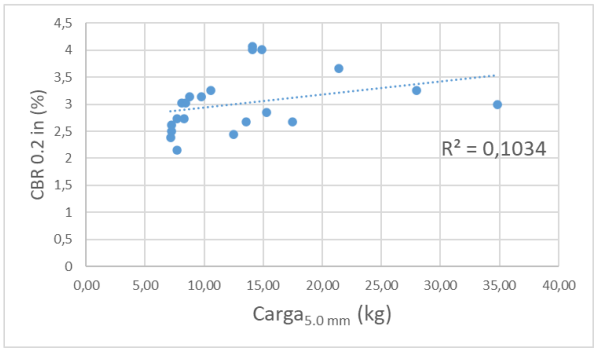




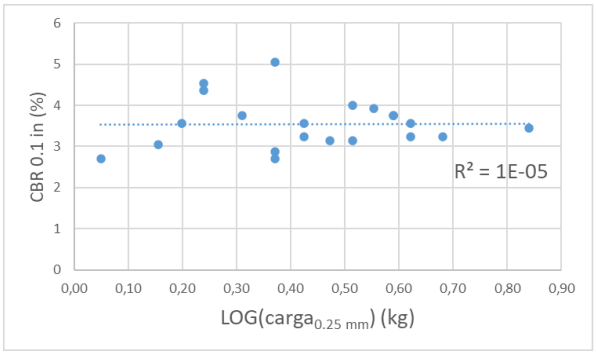


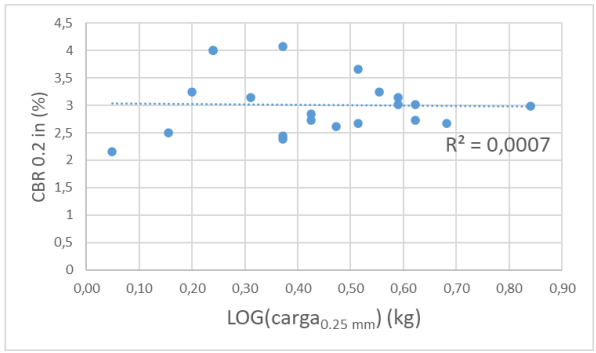


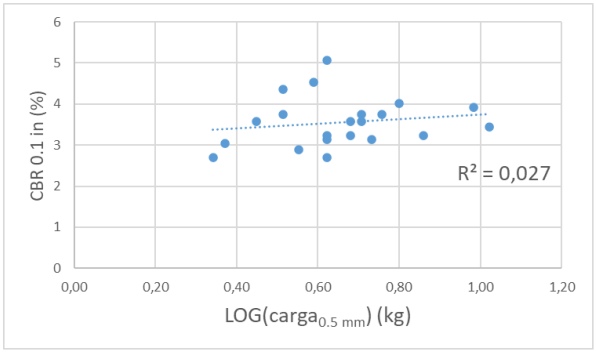


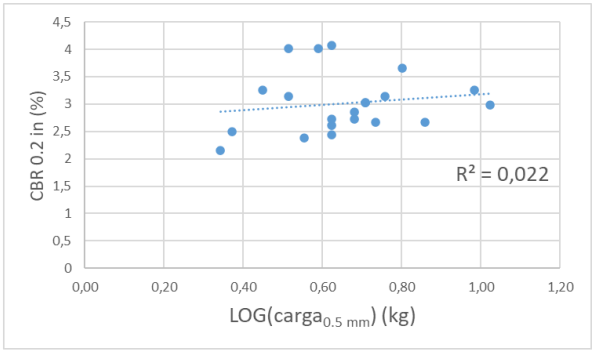


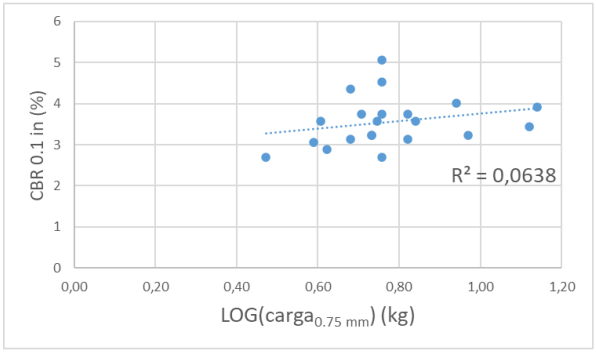
LOG (Carga Mini-CBR) Vs. CBR

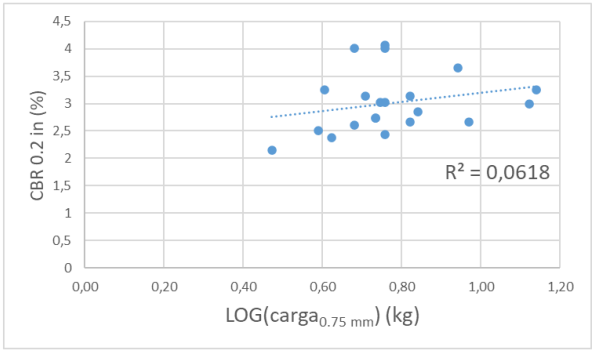


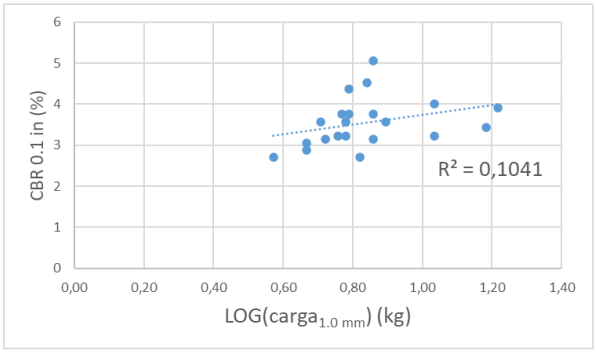


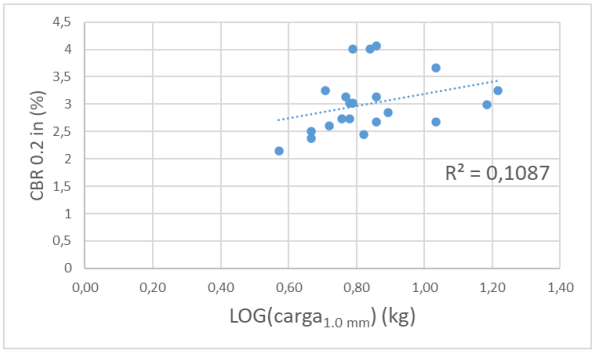

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga0.5 mm) (kg)
R² = 0,027

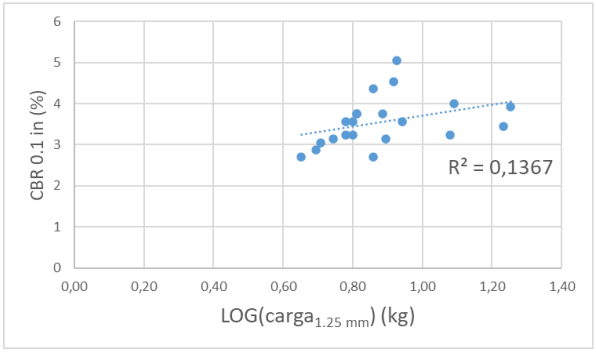

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga0.5 mm) (kg)
R² = 0,022

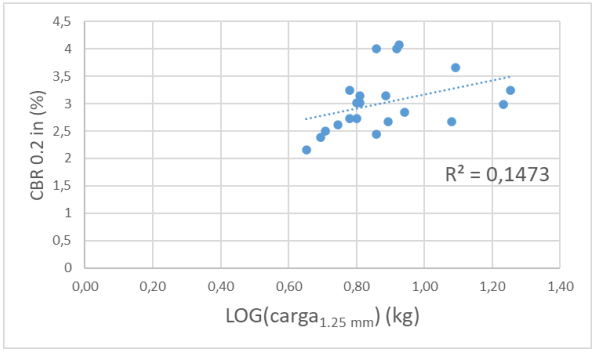

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga0.75 mm) (kg)
R² = 0,0638

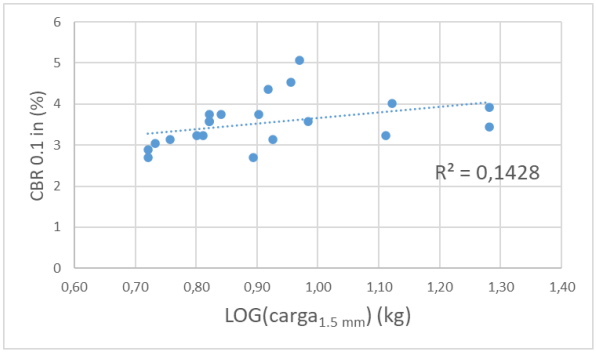

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga0.75 mm) (kg)
R² = 0,0618

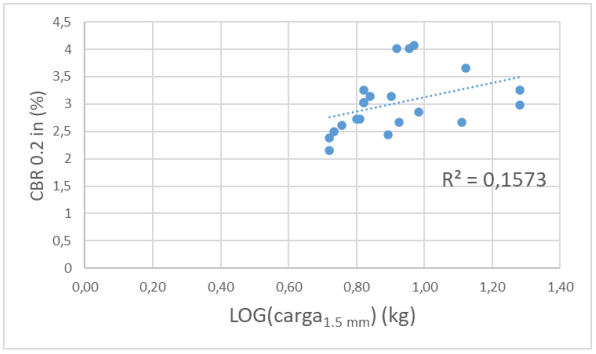

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga1.0 mm) (kg)
R² = 0,1041

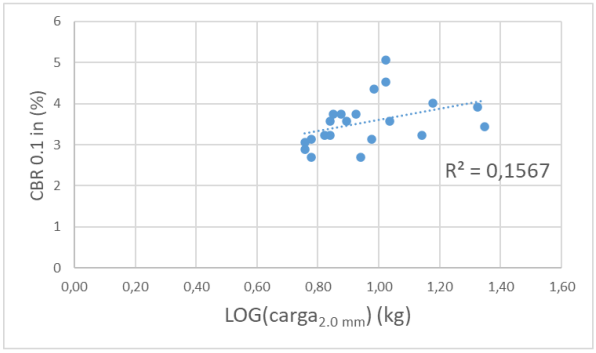

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga1.0 mm) (kg)
R² = 0,1087

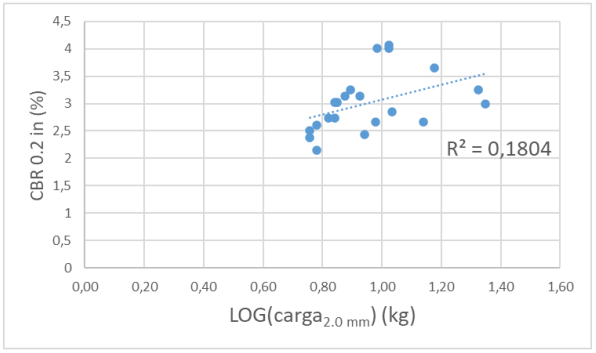

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga1.25 mm) (kg)
R² = 0,1367

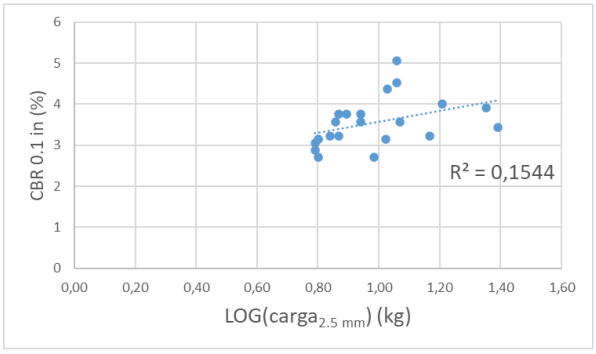

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga1.25 mm) (kg)
R² = 0,1473

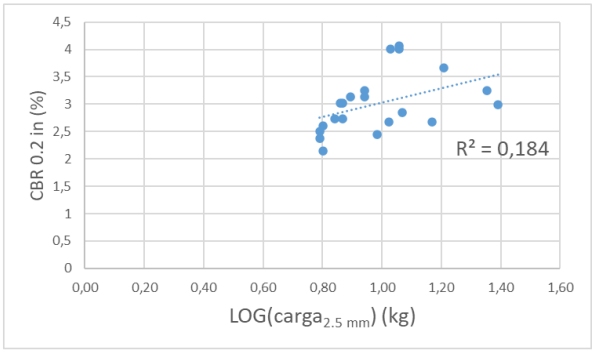

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,1428
LOG(carga1.5 mm) (kg)

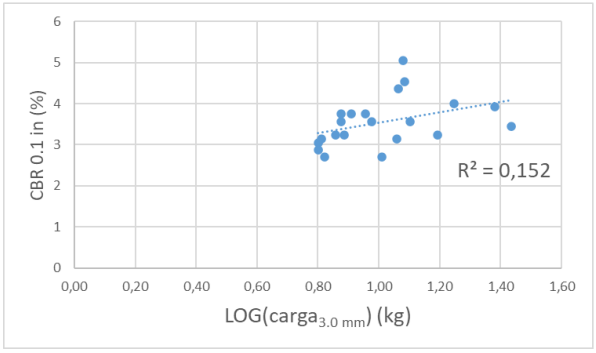

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,1573
LOG(carga1.5 mm) (kg)

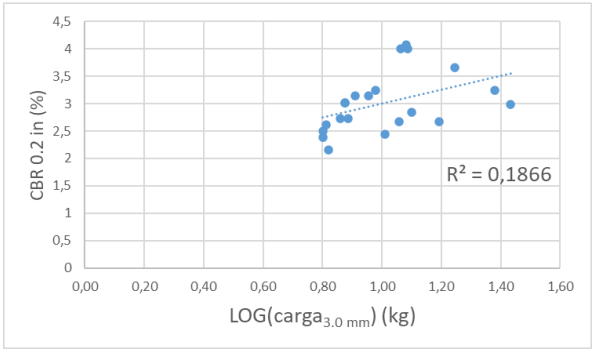

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,1567
LOG(carga2.0 mm) (kg)

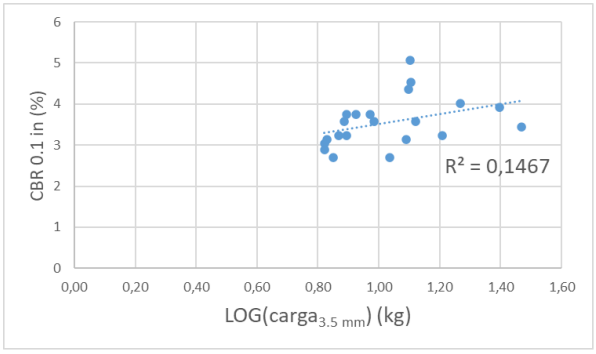

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,1804
LOG(carga2.0 mm) (kg)

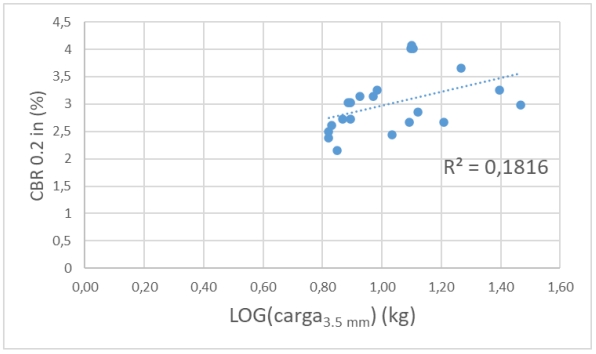

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,1544
LOG(carga2.5 mm) (kg)

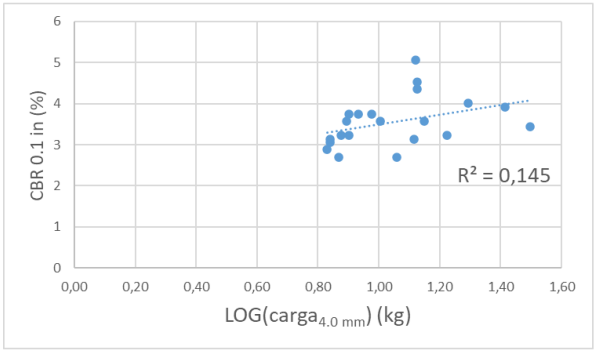

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,184
LOG(carga2.5 mm) (kg)

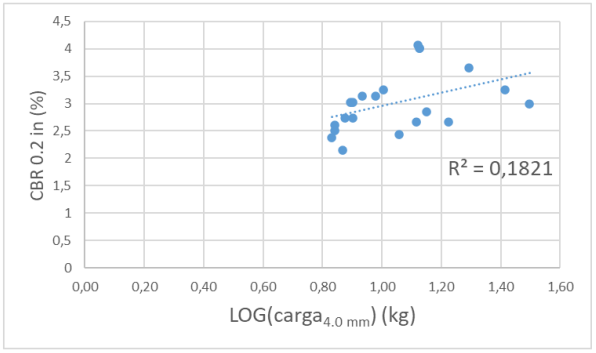

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,152
LOG(carga3.0 mm) (kg)

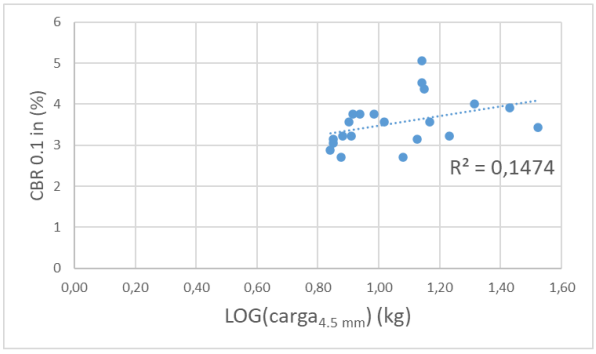

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,1866
LOG(carga3.0 mm) (kg)

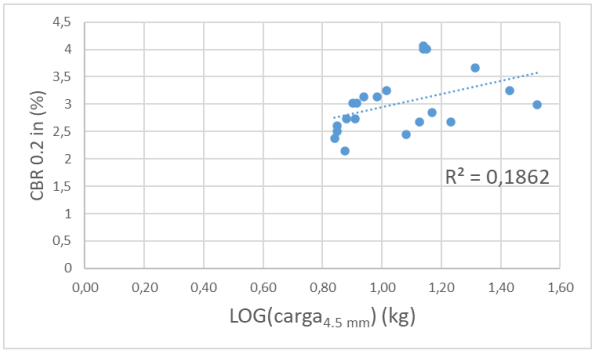

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga3.5 mm) (kg)
R² = 0,1467

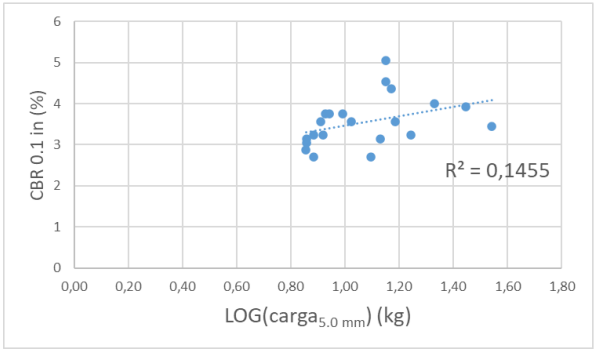

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga3.5 mm) (kg)
R² = 0,1816

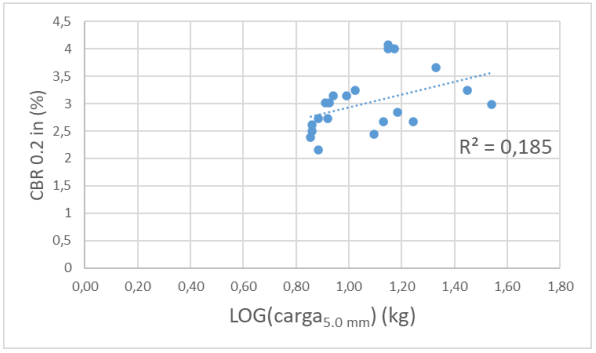

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga4.0 mm) (kg)
R² = 0,145


CBR 0.2 in (%)
LOG(carga4.0 mm) (kg)
R² = 0,1821

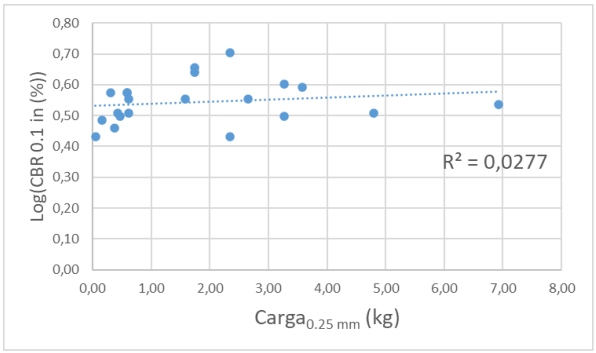

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga4.5 mm) (kg)
R² = 0,1474

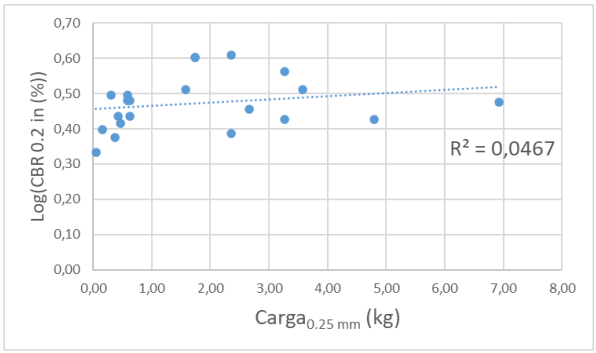

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga4.5 mm) (kg)
R² = 0,1862

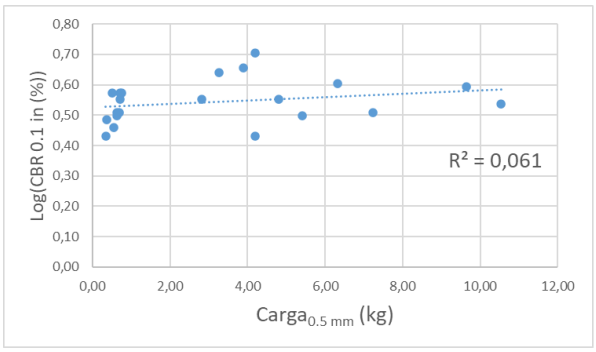

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga5.0 mm) (kg)
R² = 0,1455

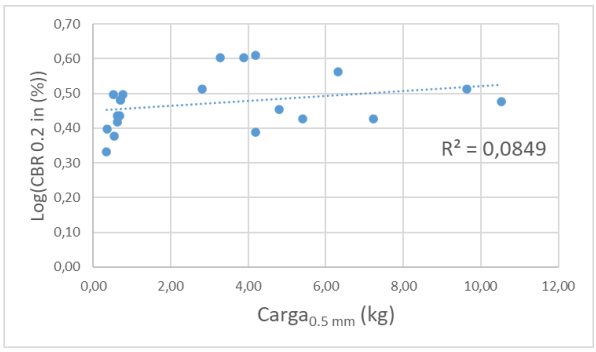

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga5.0 mm) (kg)
R² = 0,185

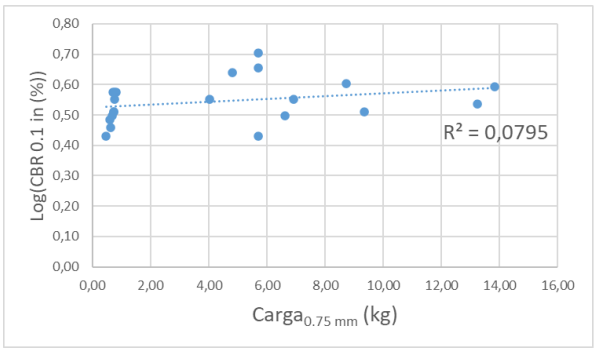
Carga Mini-CBR Vs. LOG (CBR)

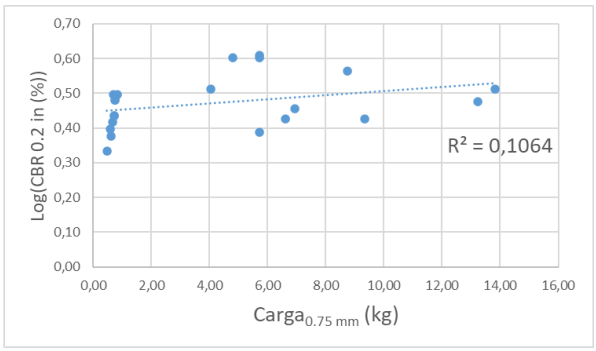


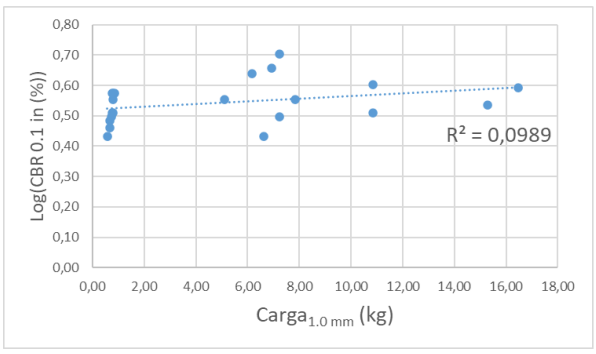


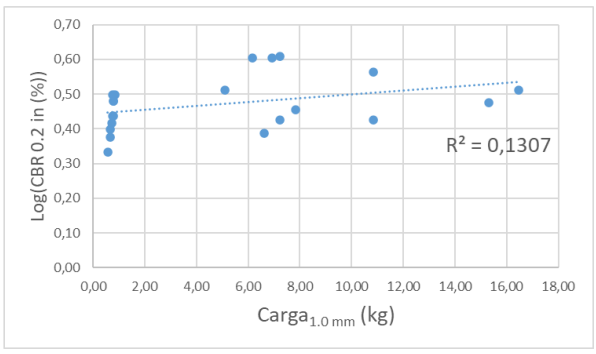


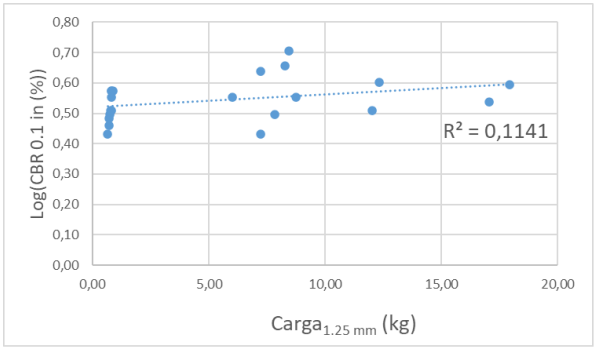


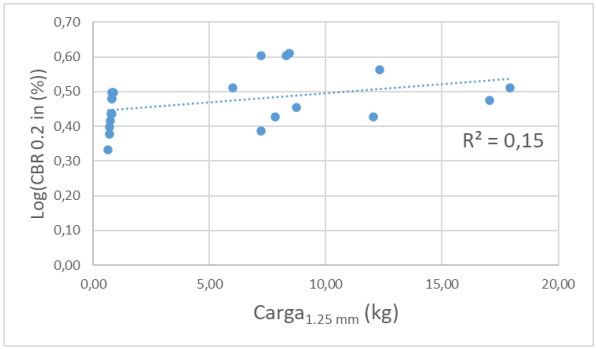


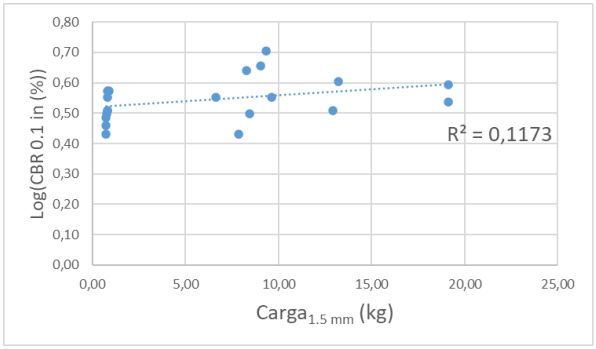


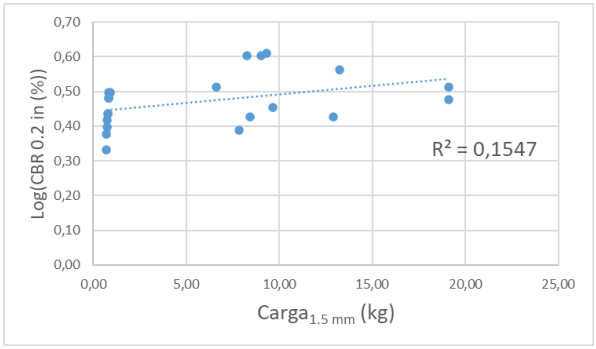


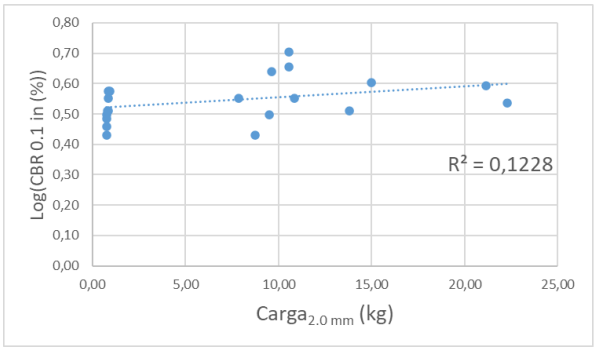


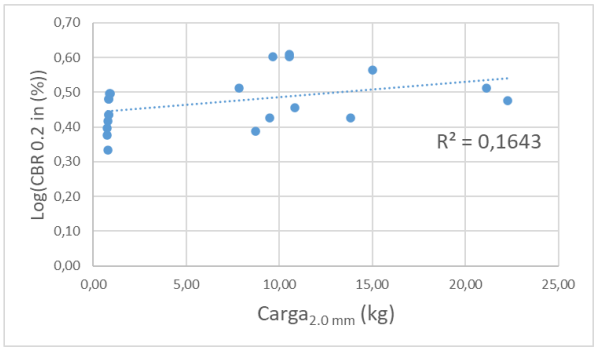

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
R² = 0,1141
Carga1.25 mm (kg)

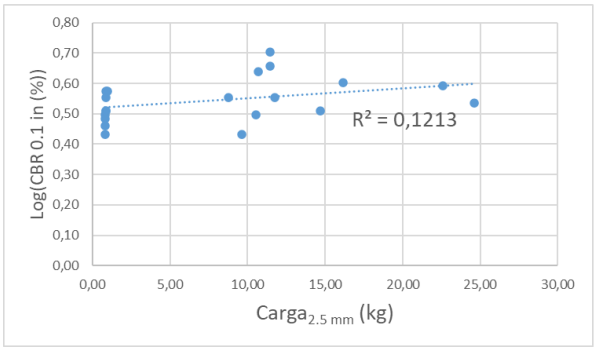

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
R² = 0,15
Carga1.25 mm (kg)

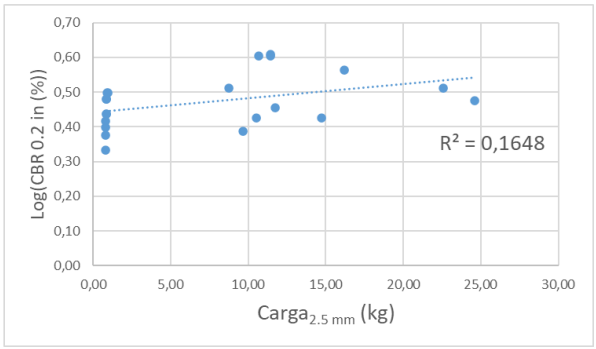

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
R² = 0,1173
Carga1.5 mm (kg)

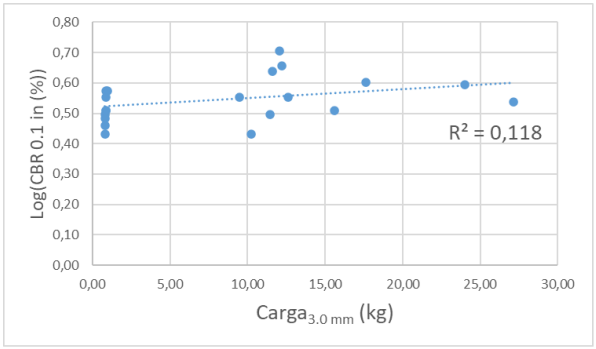

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
R² = 0,1547
Carga1.5 mm (kg)

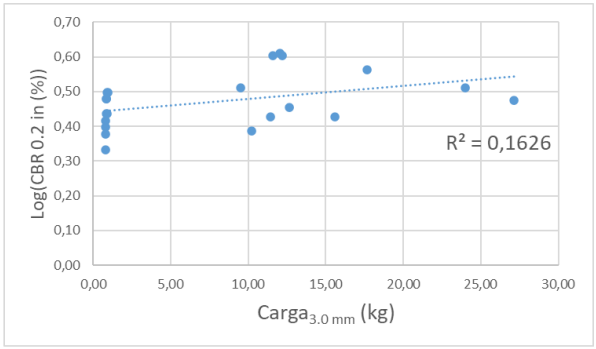

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
R² = 0,1228
Carga2.0 mm (kg)

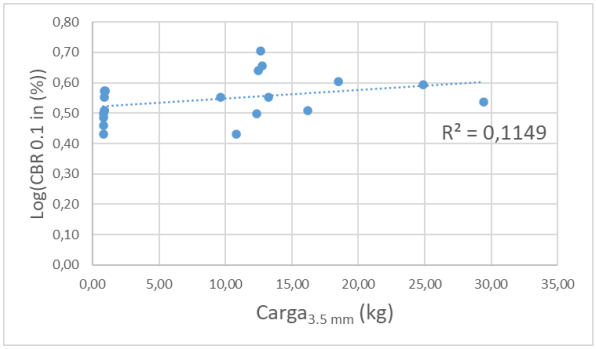

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
R² = 0,1643
Carga2.0 mm (kg)

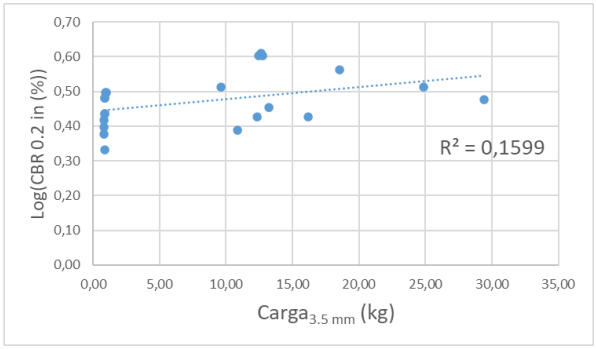

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
R² = 0,1213
Carga2.5 mm (kg)

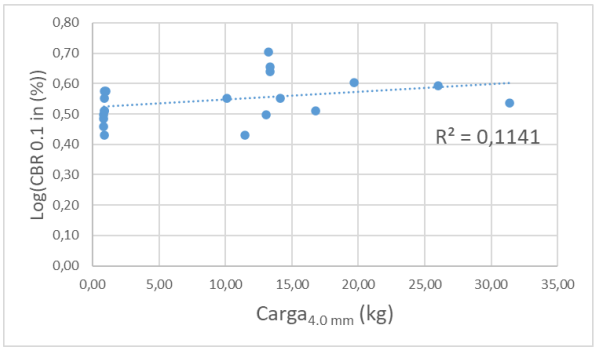

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
R² = 0,1648
Carga2.5 mm (kg)

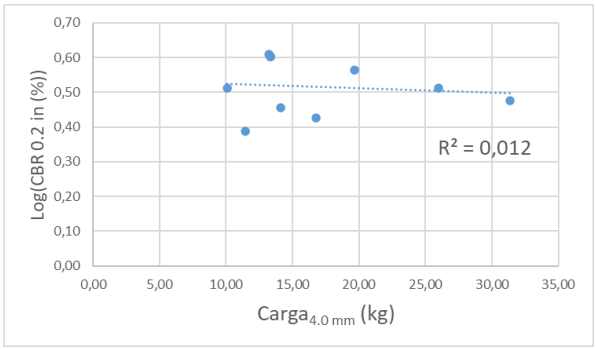

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00
Carga3.0 mm (kg)
R² = 0,118

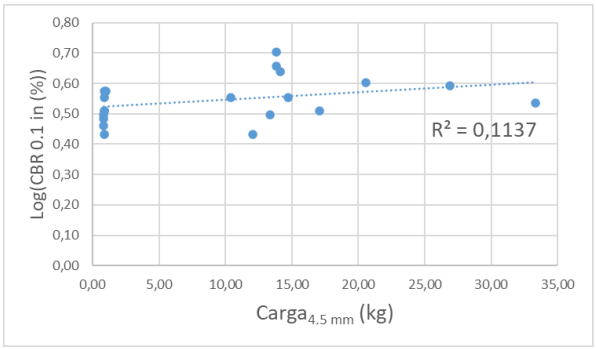

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00
Carga3.0 mm (kg)
R² = 0,1626

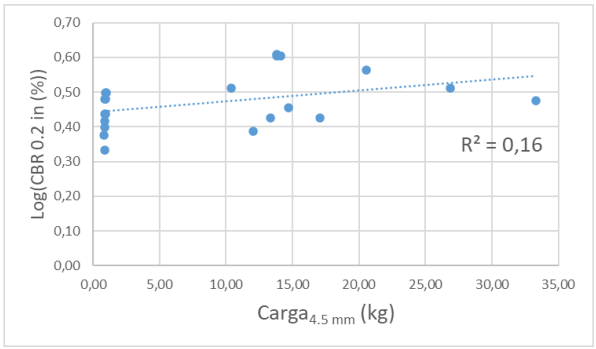

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00 35,00
Carga3.5 mm (kg)
R² = 0,1149

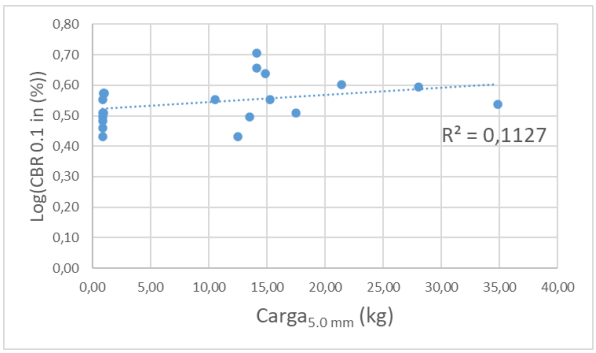

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00 35,00
Carga3.5 mm (kg)
R² = 0,1599

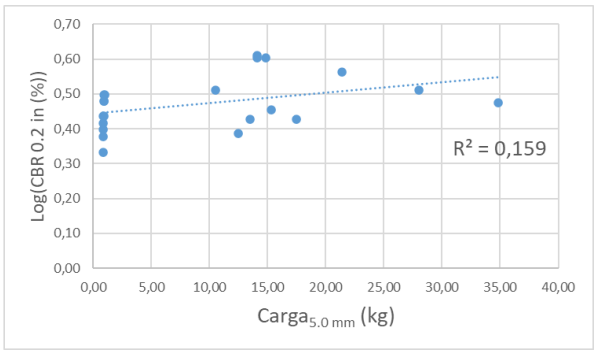

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00 35,00
Carga4.0 mm (kg)
R² = 0,1141


Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00 35,00
Carga4.0 mm (kg)
R² = 0,012


Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00 35,00
Carga4.5 mm (kg)
R² = 0,1137


Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00 25,00 30,00 35,00
Carga4.5 mm (kg)
R² = 0,16

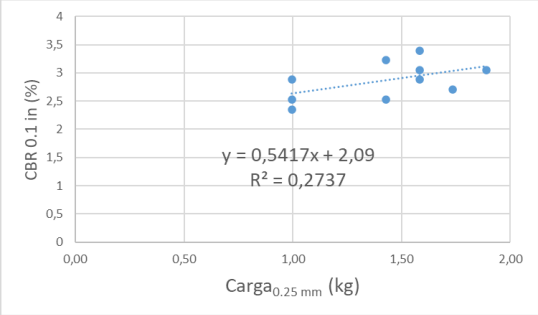

0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
Log(CBR 0.1 in (%))
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
Carga5.0 mm (kg)
R² = 0,1127

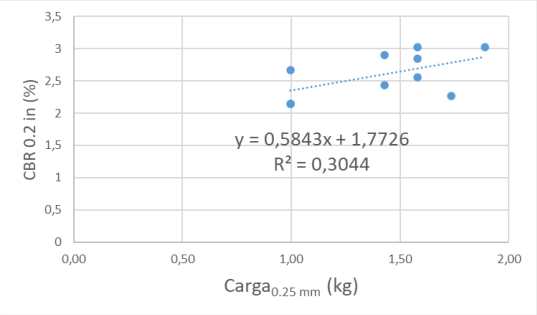

0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
Log(CBR 0.2 in (%))
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
Carga5.0 mm (kg)
R² = 0,159

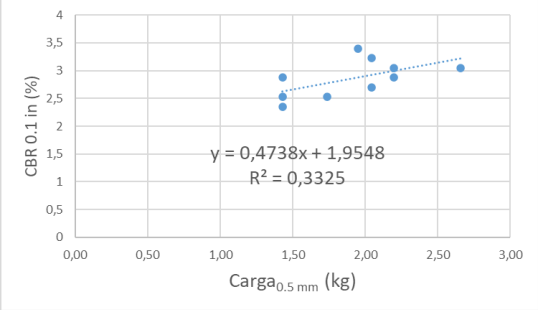
Comparación cargas Mini-CBR Vs. CBR, condición saturada.

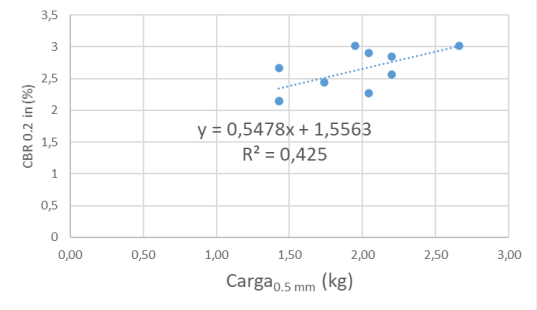
Muestras Escuela Colombiana de Ingeniería (CH)

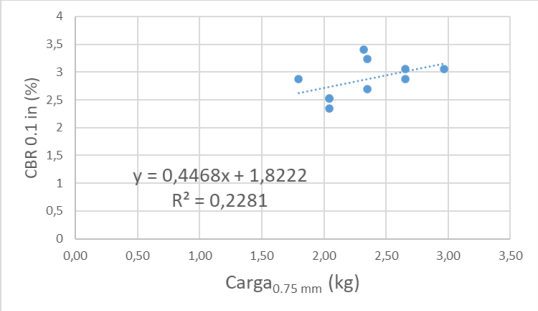
Carga Mini-CBR Vs. CBR

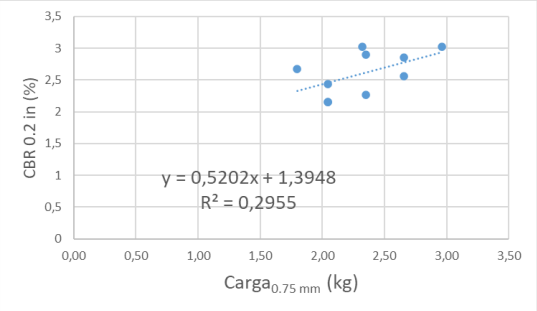


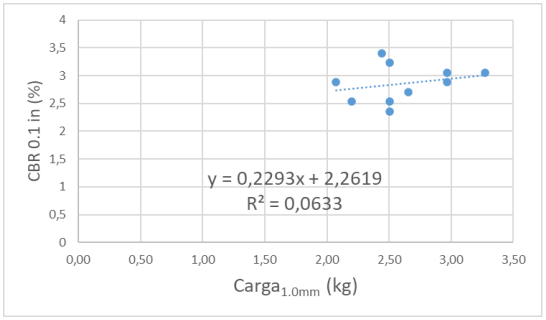


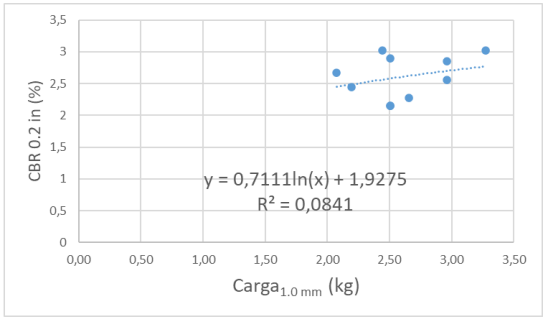


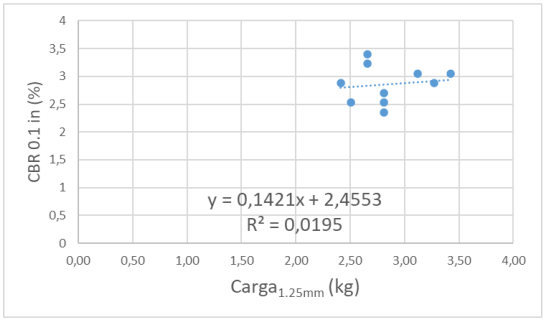


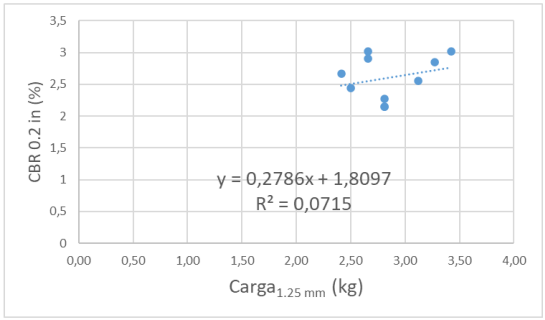


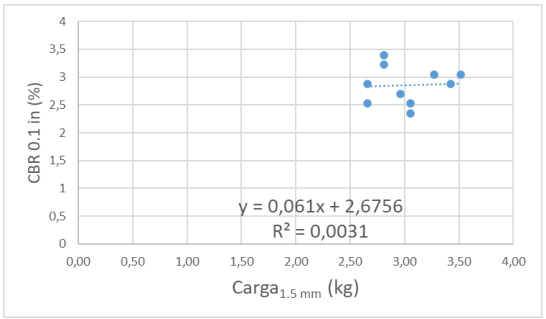


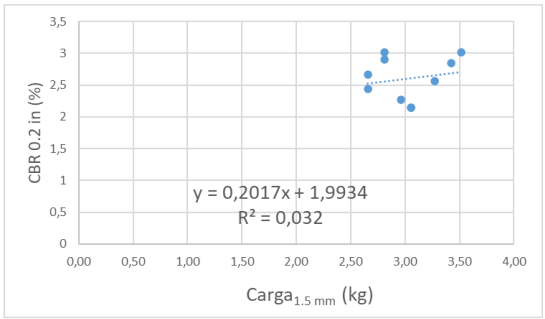

CBR 0.1 in (%)
y = 0,2293x + 2,2619
R² = 0,0633
Carga1.0mm (kg)

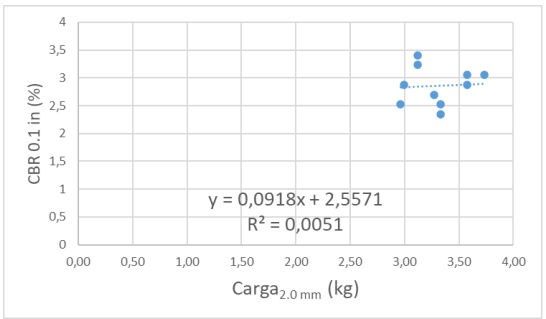

CBR 0.2 in (%)
y = 0,7111ln(x) + 1,9275
R² = 0,0841
Carga1.0 mm (kg)

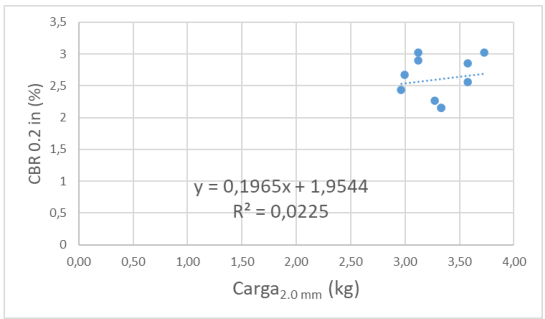

CBR 0.1 in (%)
y = 0,1421x + 2,4553
R² = 0,0195
Carga1.25mm (kg)

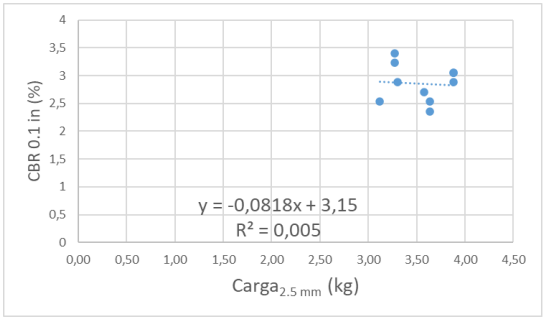

CBR 0.2 in (%)
y = 0,2786x + 1,8097
R² = 0,0715
Carga1.25 mm (kg)

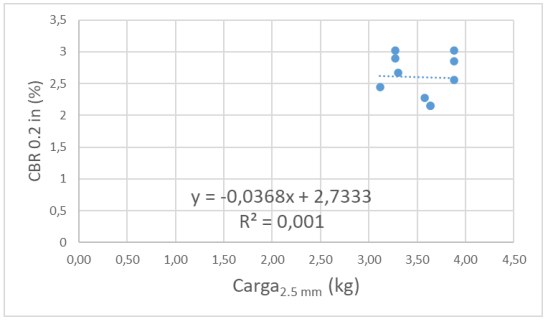

CBR 0.1 in (%)
y = 0,061x + 2,6756
R² = 0,0031
Carga1.5 mm (kg)

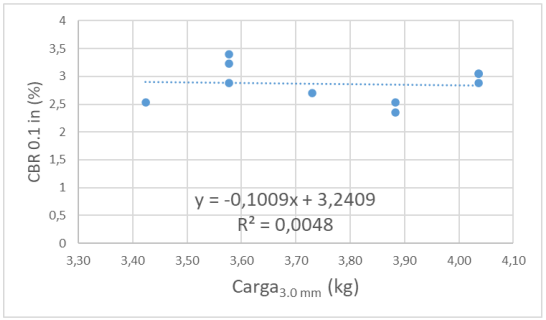

CBR 0.2 in (%)
y = 0,2017x + 1,9934
R² = 0,032
Carga1.5 mm (kg)

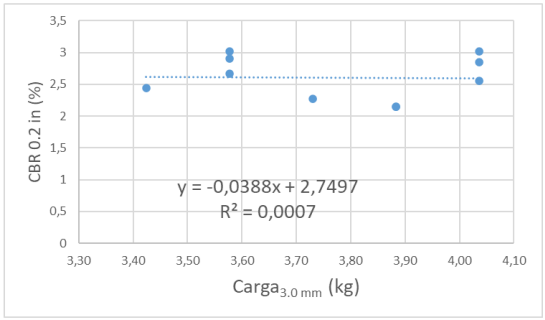

CBR 0.1 in (%)
y = 0,0918x + 2,5571
R² = 0,0051
Carga2.0 mm (kg)

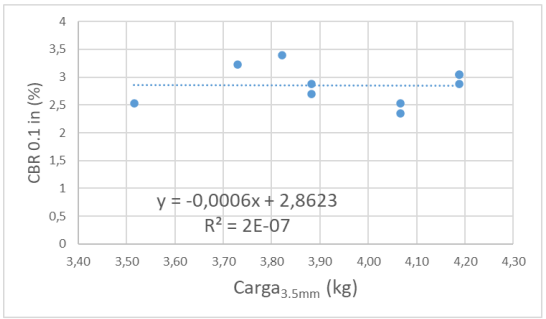

CBR 0.2 in (%)
y = 0,1965x + 1,9544
R² = 0,0225
Carga2.0 mm (kg)

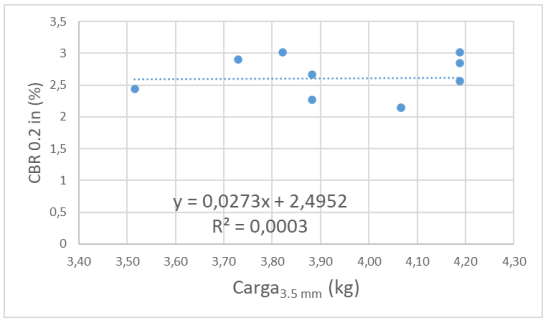

CBR 0.1 in (%)
y = -0,0818x + 3,15
R² = 0,005
Carga2.5 mm (kg)

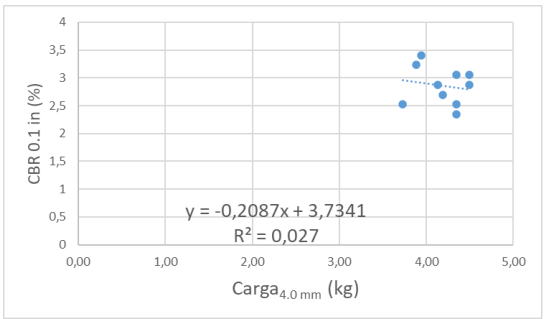

CBR 0.2 in (%)
y = -0,0368x + 2,7333
R² = 0,001
Carga2.5 mm (kg)

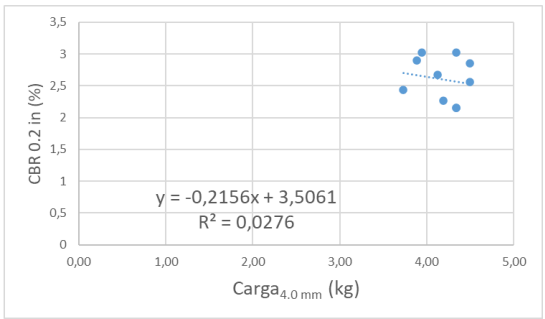

CBR 0.1 in (%)
y = -0,1009x + 3,2409
R² = 0,0048
Carga3.0 mm (kg)

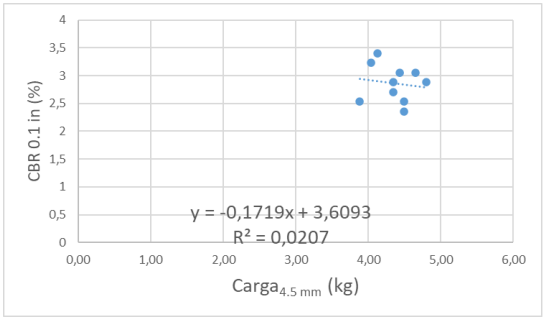

CBR 0.2 in (%)
y = -0,0388x + 2,7497
R² = 0,0007
Carga3.0 mm (kg)

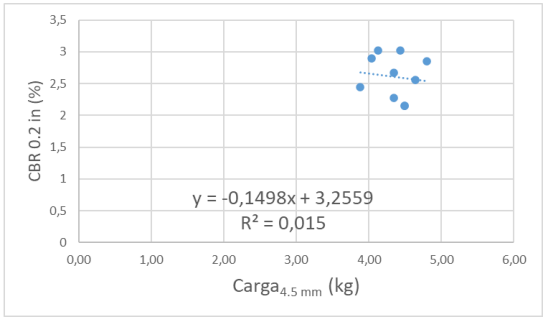

CBR 0.1 in (%)
y = -0,0006x + 2,8623
R² = 2E-07
Carga3.5mm (kg)

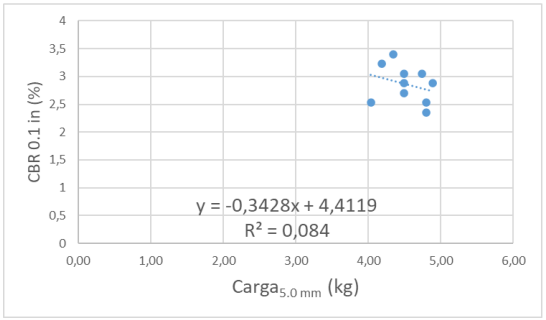

CBR 0.2 in (%)
y = 0,0273x + 2,4952
R² = 0,0003
Carga3.5 mm (kg)

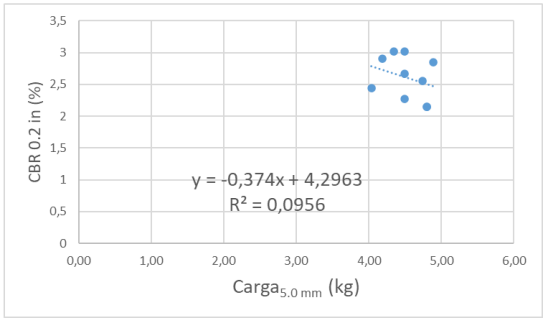

CBR 0.1 in (%)
y = -0,2087x + 3,7341
R² = 0,027
Carga4.0 mm (kg)


CBR 0.2 in (%)
y = -0,2156x + 3,5061
R² = 0,0276
Carga4.0 mm (kg)

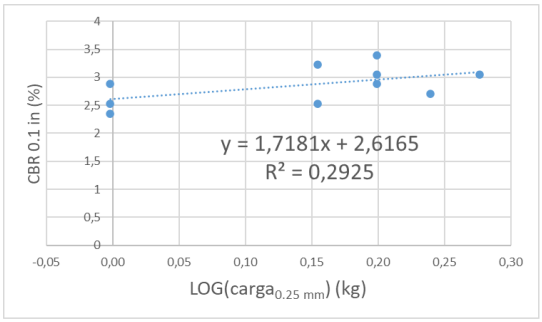


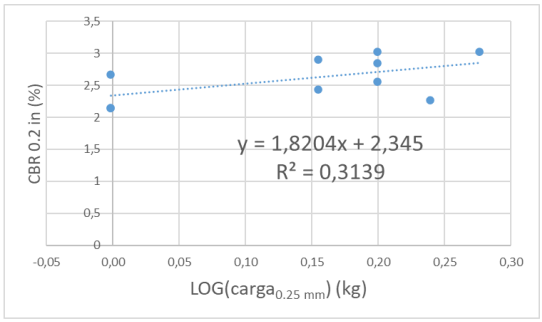


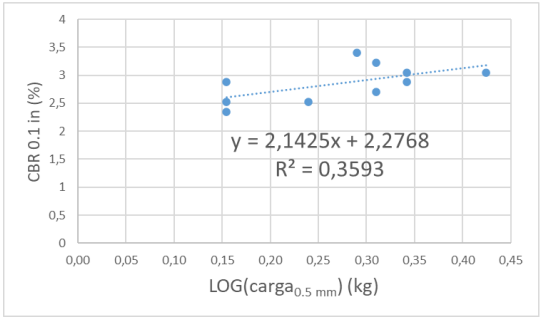


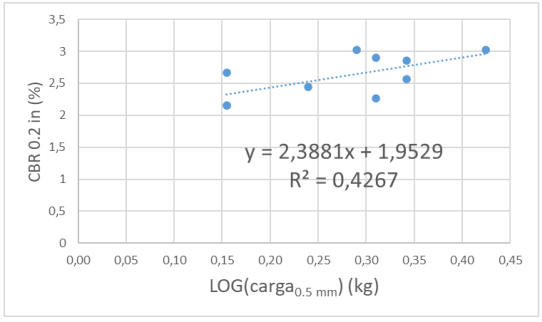


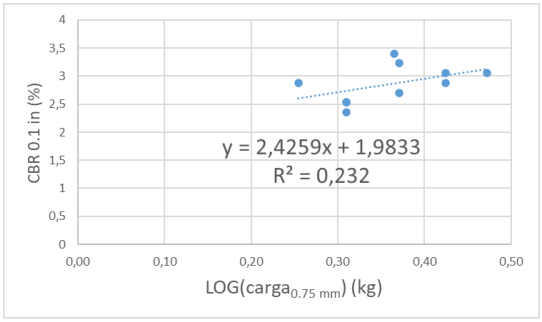
LOG (Carga Mini-CBR) Vs. CBR

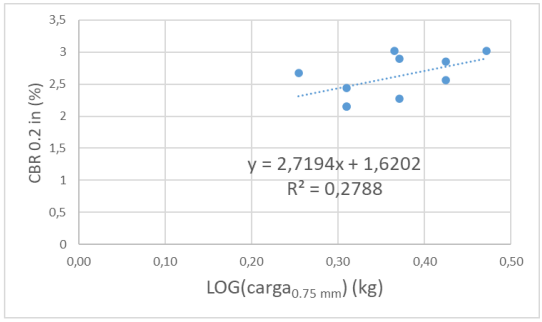


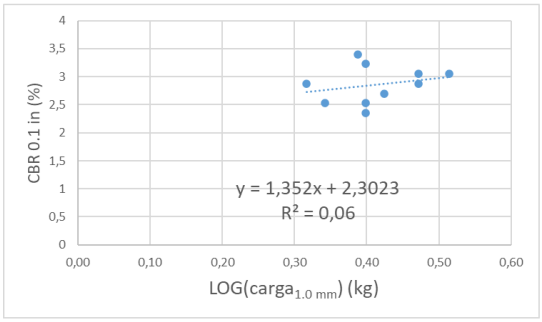


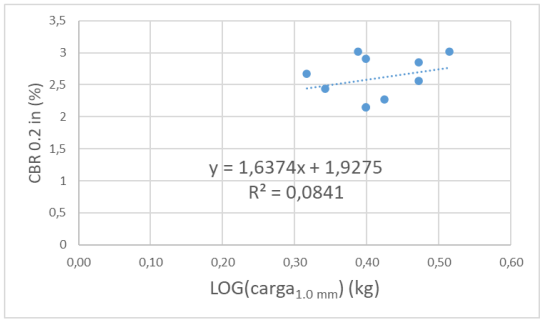


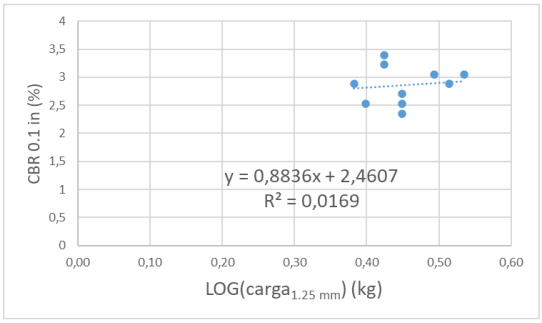


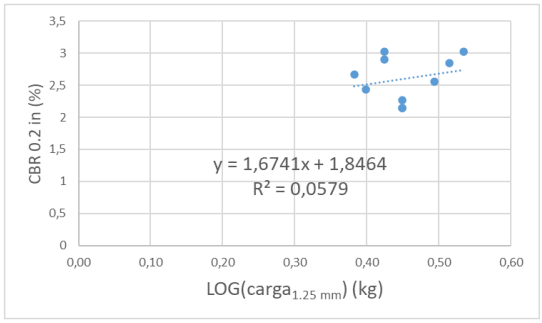

CBR 0.1 in (%)
y = 2,4259x + 1,9833
R² = 0,232
LOG(carga0.75 mm) (kg)

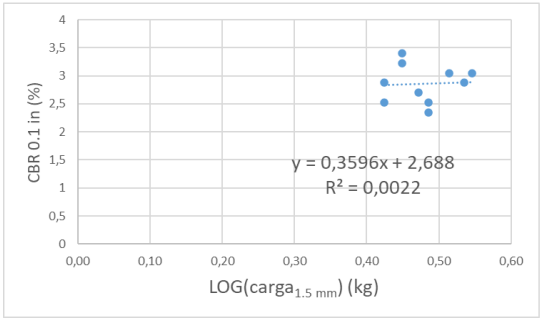

CBR 0.2 in (%)
y = 2,7194x + 1,6202
R² = 0,2788
LOG(carga0.75 mm) (kg)

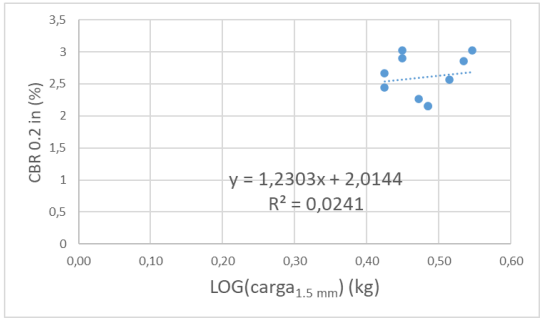

CBR 0.1 in (%)
y = 1,352x + 2,3023
R² = 0,06
LOG(carga1.0 mm) (kg)

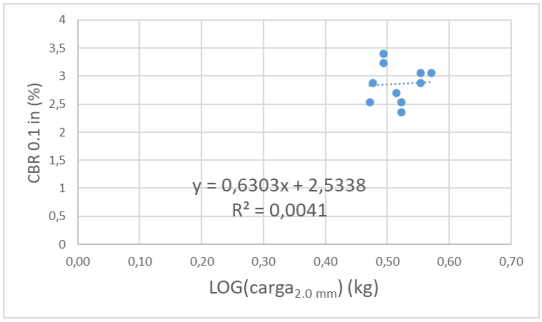

CBR 0.2 in (%)
y = 1,6374x + 1,9275
R² = 0,0841
LOG(carga1.0 mm) (kg)

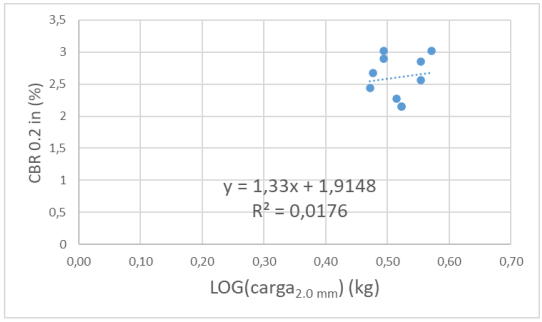

CBR 0.1 in (%)
y = 0,8836x + 2,4607
R² = 0,0169
LOG(carga1.25 mm) (kg)

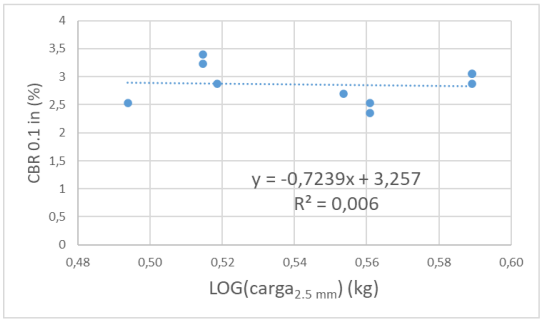

CBR 0.2 in (%)
y = 1,6741x + 1,8464
R² = 0,0579
LOG(carga1.25 mm) (kg)

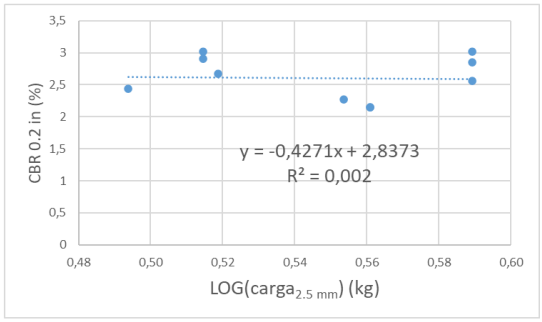

CBR 0.1 in (%)
y = 0,3596x + 2,688
R² = 0,0022
LOG(carga1.5 mm) (kg)

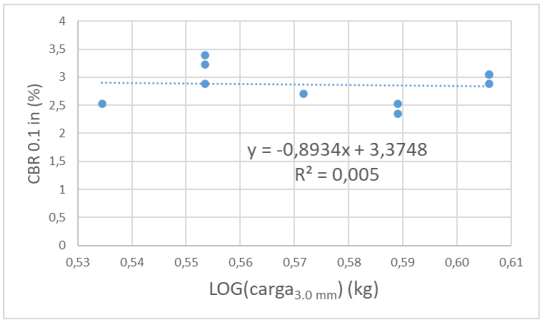

CBR 0.2 in (%)
y = 1,2303x + 2,0144
R² = 0,0241
LOG(carga1.5 mm) (kg)

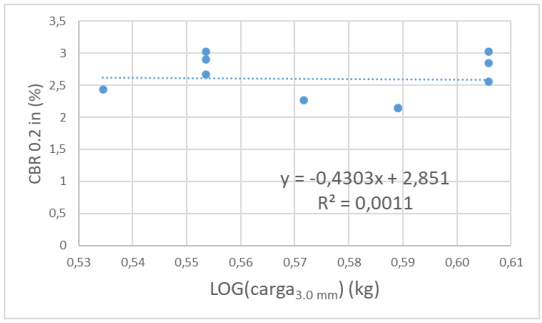

CBR 0.1 in (%)
y = 0,6303x + 2,5338
R² = 0,0041
LOG(carga2.0 mm) (kg)

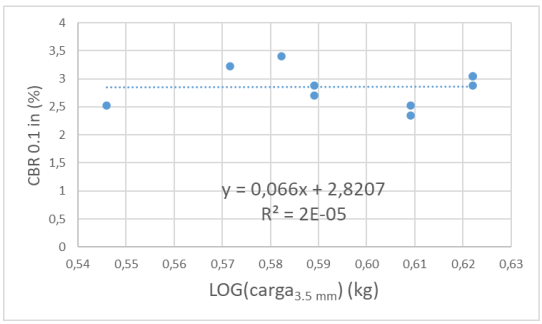

CBR 0.2 in (%)
y = 1,33x + 1,9148
R² = 0,0176
LOG(carga2.0 mm) (kg)

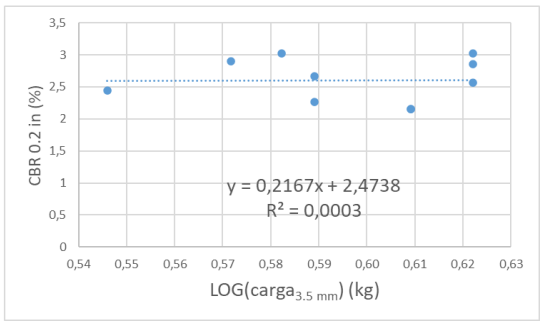

CBR 0.1 in (%)
y = -0,7239x + 3,257
R² = 0,006
LOG(carga2.5 mm) (kg)

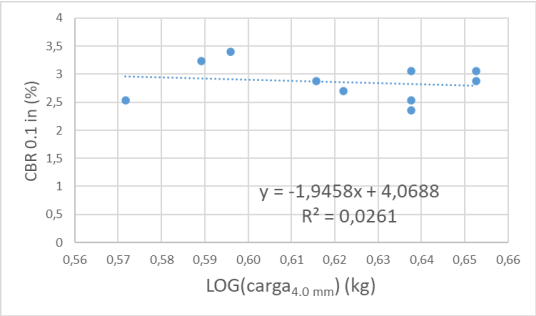

CBR 0.2 in (%)
y = -0,4271x + 2,8373
R² = 0,002
LOG(carga2.5 mm) (kg)

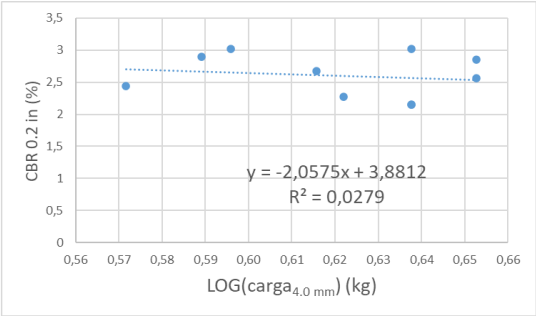

CBR 0.1 in (%)
y = -0,8934x + 3,3748
R² = 0,005
LOG(carga3.0 mm) (kg)

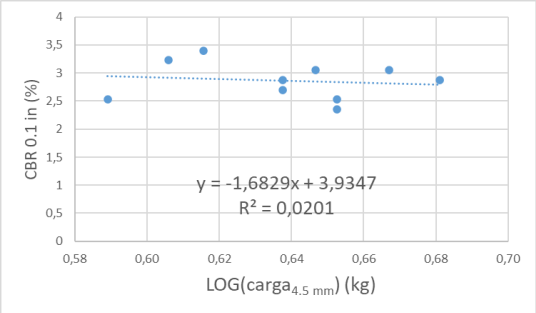

CBR 0.2 in (%)
y = -0,4303x + 2,851
R² = 0,0011
LOG(carga3.0 mm) (kg)

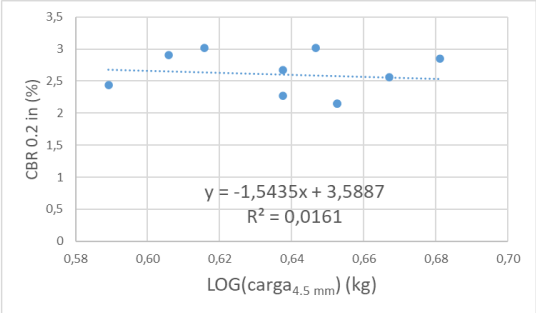

CBR 0.1 in (%)
y = 0,066x + 2,8207
R² = 2E-05
LOG(carga3.5 mm) (kg)

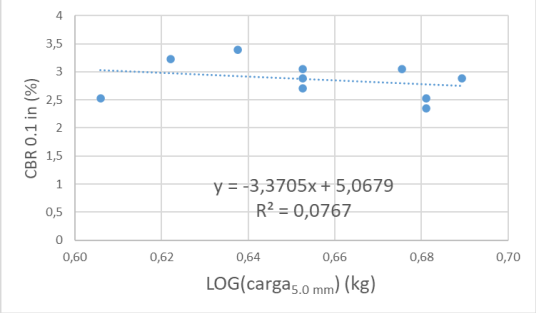

CBR 0.2 in (%)
y = 0,2167x + 2,4738
R² = 0,0003
LOG(carga3.5 mm) (kg)

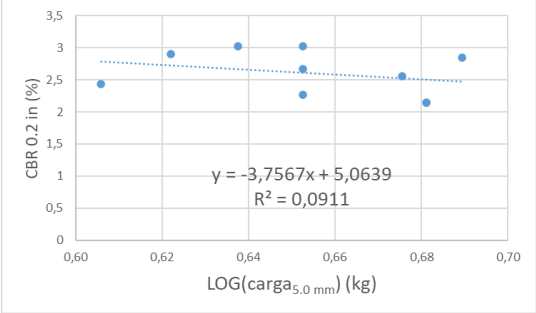




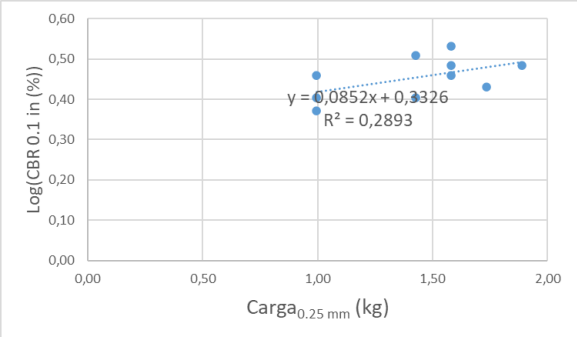


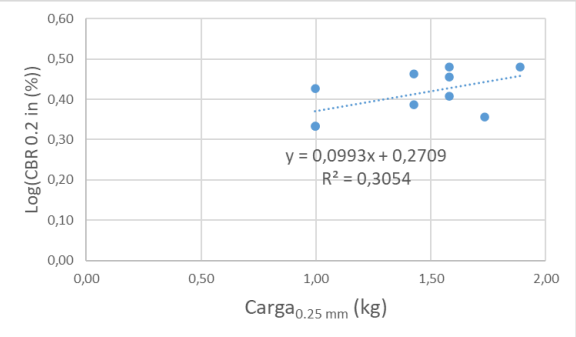


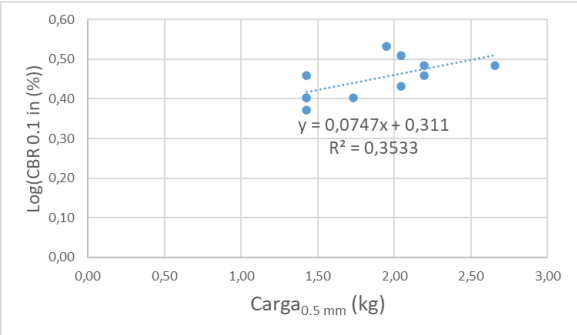


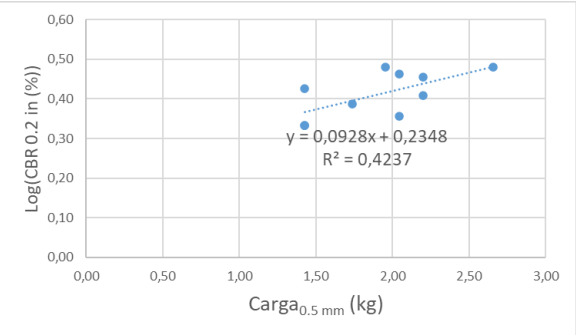


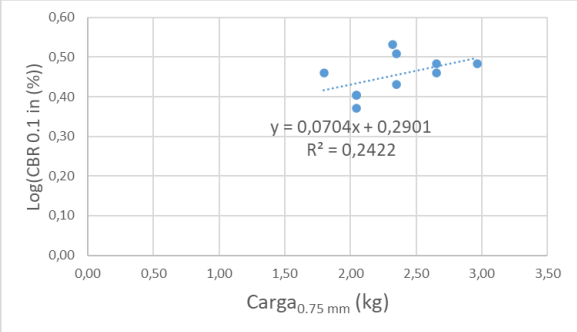
Carga Mini-CBR Vs. LOG (CBR)

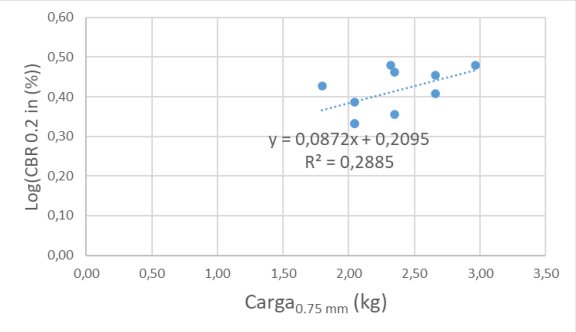


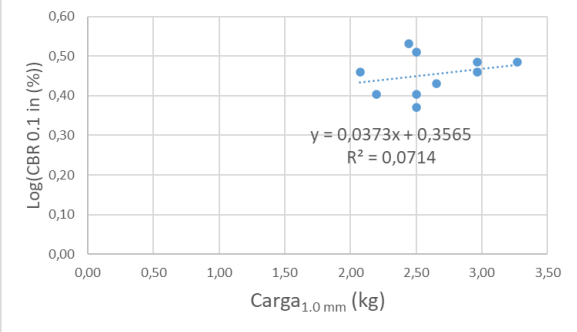


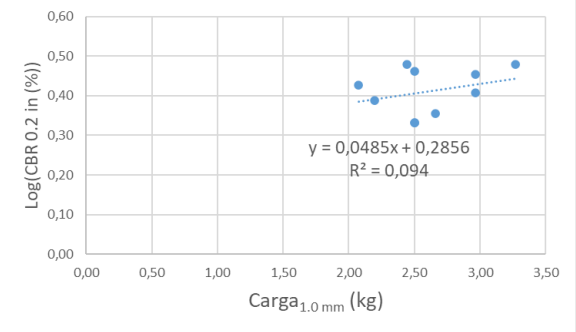

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0747x + 0,311
R² = 0,3533
Carga0.5 mm (kg)

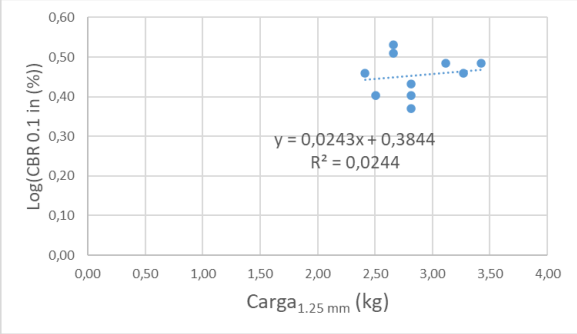

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0928x + 0,2348
R² = 0,4237
Carga0.5 mm (kg)

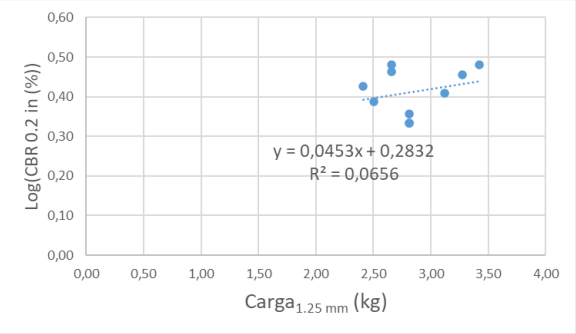

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0704x + 0,2901
R² = 0,2422
Carga0.75 mm (kg)

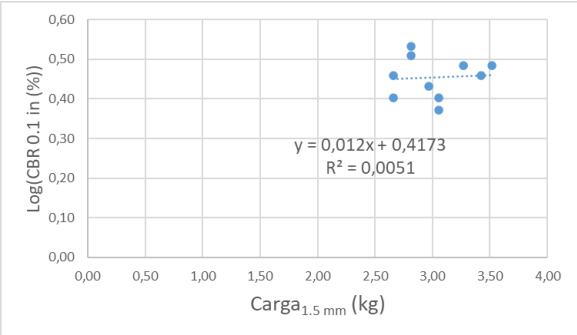

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0872x + 0,2095
R² = 0,2885
Carga0.75 mm (kg)

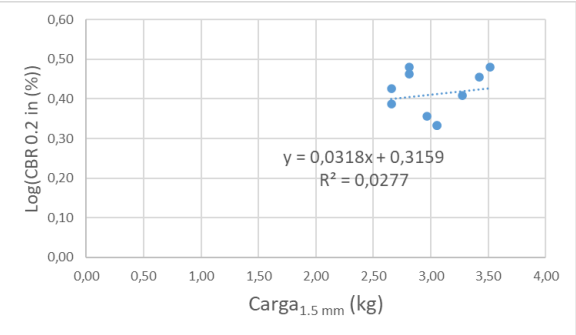

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0373x + 0,3565
R² = 0,0714
Carga1.0 mm (kg)

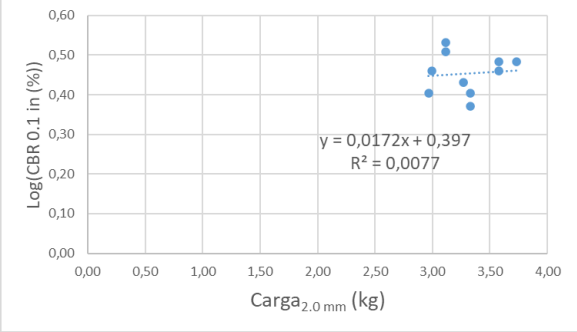

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0485x + 0,2856
R² = 0,094
Carga1.0 mm (kg)

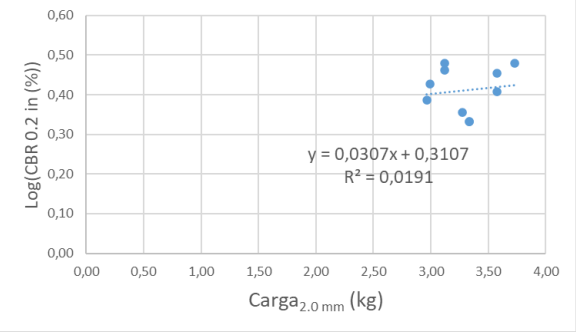

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0243x + 0,3844
R² = 0,0244
Carga1.25 mm (kg)

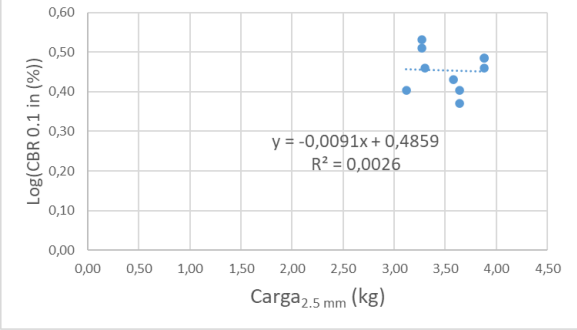

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0453x + 0,2832
R² = 0,0656
Carga1.25 mm (kg)

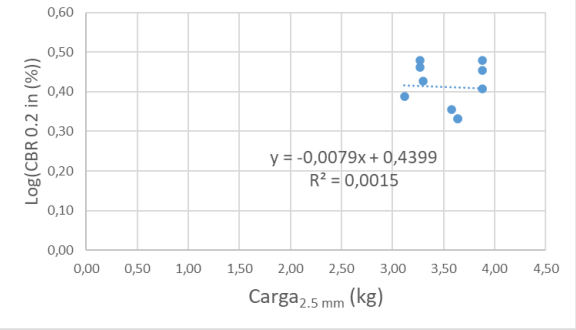

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,012x + 0,4173
R² = 0,0051
Carga1.5 mm (kg)

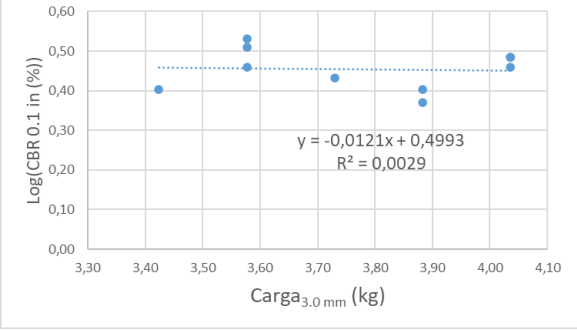

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0318x + 0,3159
R² = 0,0277
Carga1.5 mm (kg)

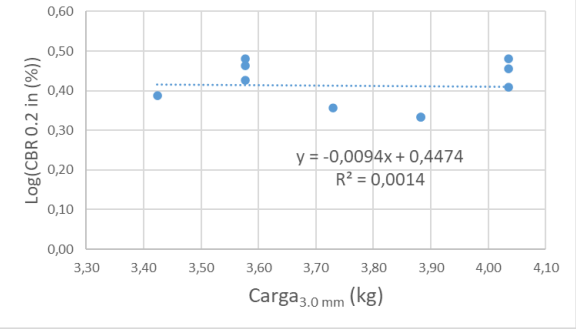

Log(CBR 0.1 in (%))
y = 0,0172x + 0,397
R² = 0,0077
Carga2.0 mm (kg)

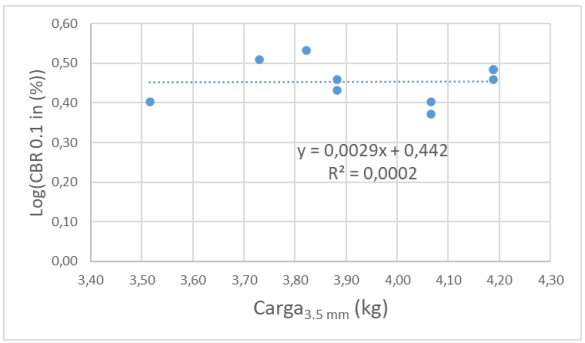

Log(CBR 0.2 in (%))
y = 0,0307x + 0,3107
R² = 0,0191
Carga2.0 mm (kg)

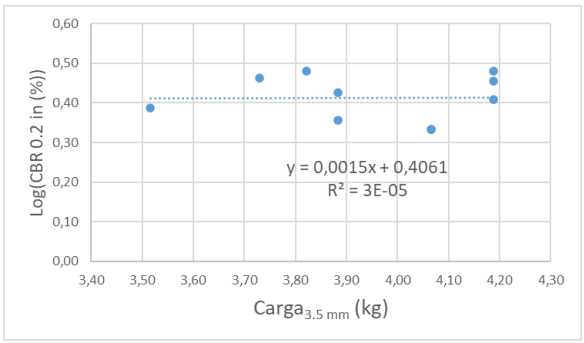

Log(CBR 0.1 in (%))
y = -0,0091x + 0,4859
R² = 0,0026
Carga2.5 mm (kg)

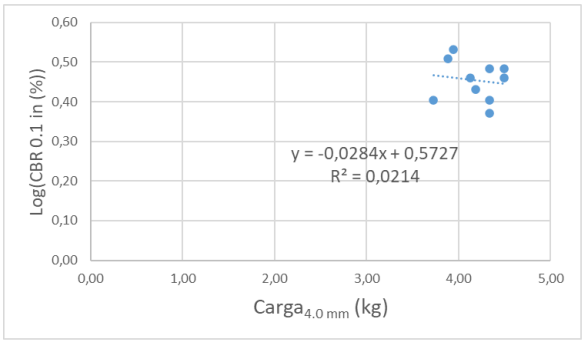

Log(CBR 0.2 in (%))
y = -0,0079x + 0,4399
R² = 0,0015
Carga2.5 mm (kg)

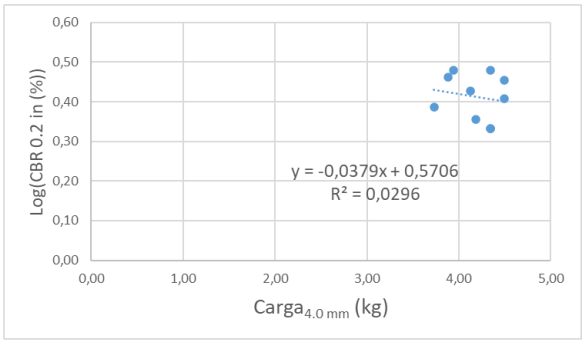

Log(CBR 0.1 in (%))
y = -0,0121x + 0,4993
R² = 0,0029
Carga3.0 mm (kg)

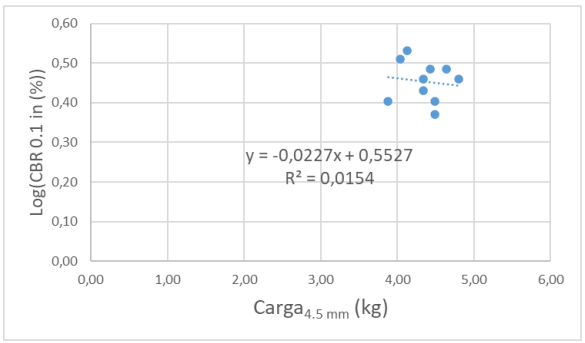

Log(CBR 0.2 in (%))
y = -0,0094x + 0,4474
R² = 0,0014
Carga3.0 mm (kg)

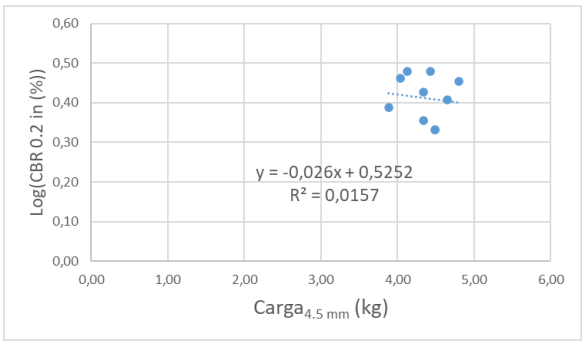


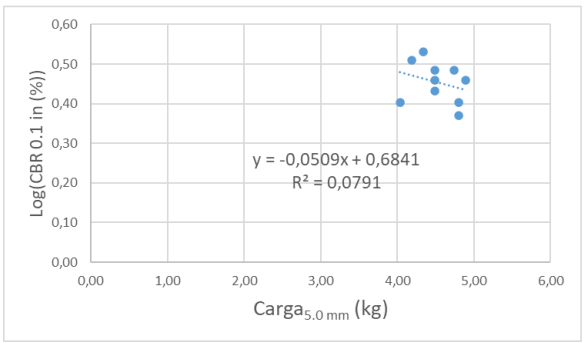


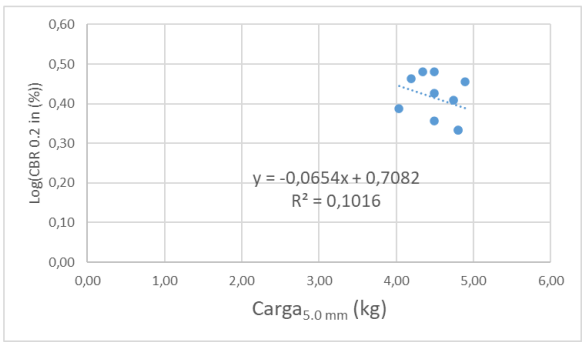






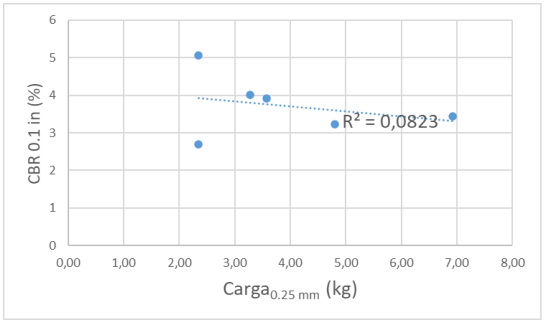


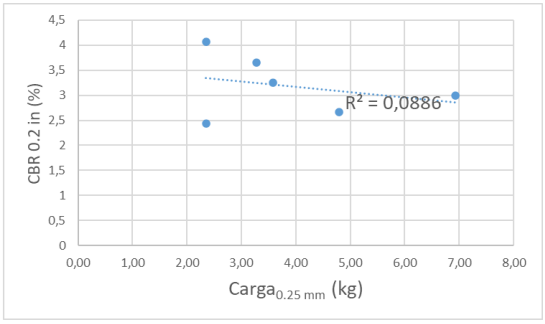


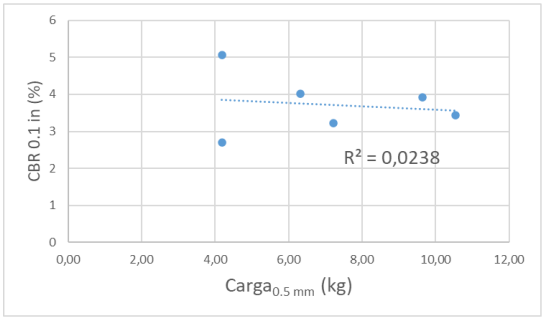


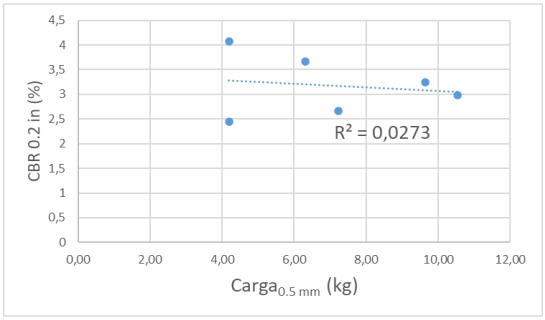
Muestras San José de Bavaria (MH)

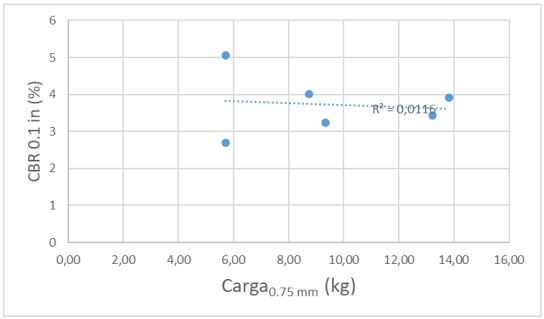
Carga Mini-CBR Vs. CBR

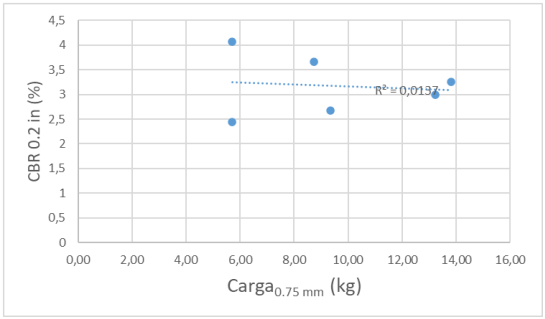

CBR 0.1 in (%)
Carga0.25 mm (kg)
R² = 0,0823

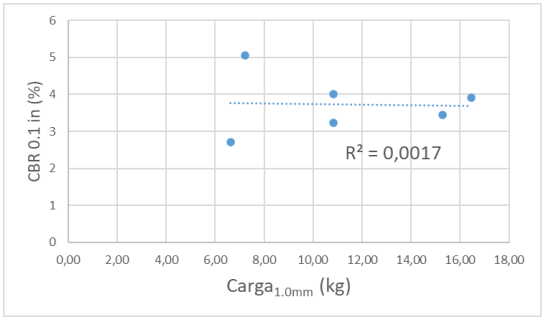

CBR 0.2 in (%)
Carga0.25 mm (kg)
R² = 0,0886

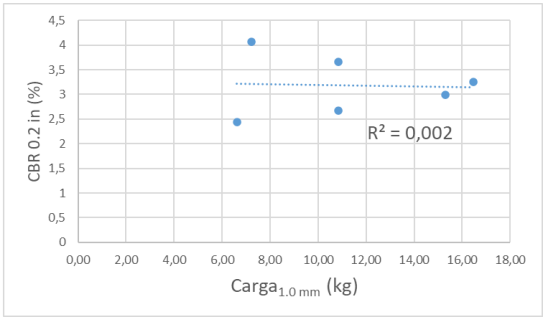

CBR 0.1 in (%)
Carga0.5 mm (kg)
R² = 0,0238

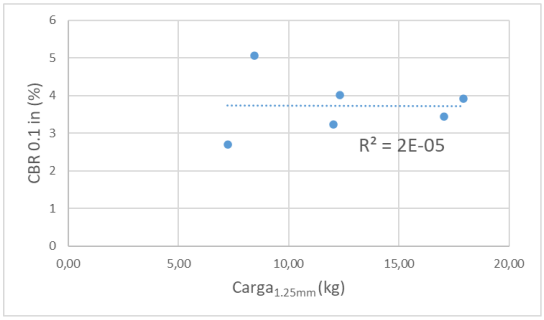

CBR 0.2 in (%)
Carga0.5 mm (kg)
R² = 0,0273

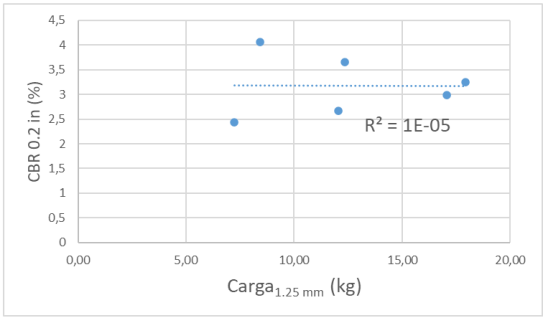

CBR 0.1 in (%)
Carga0.75 mm (kg)
R² = 0,0116

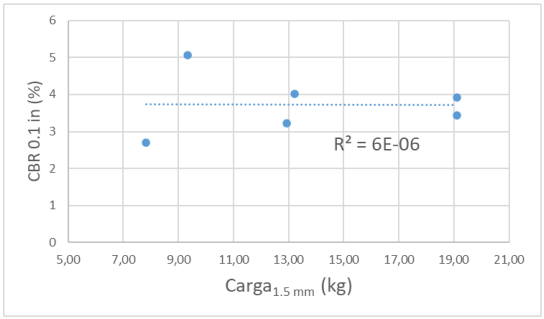

CBR 0.2 in (%)
Carga0.75 mm (kg)
R² = 0,0137

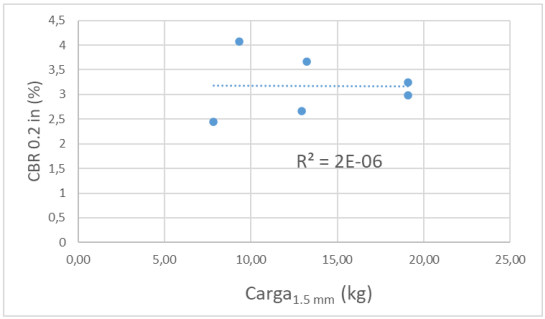

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0017
Carga1.0mm (kg)

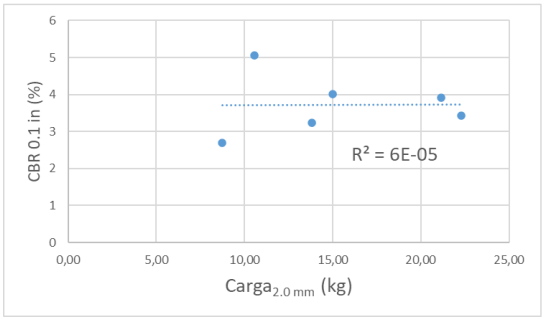

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,002
Carga1.0 mm (kg)

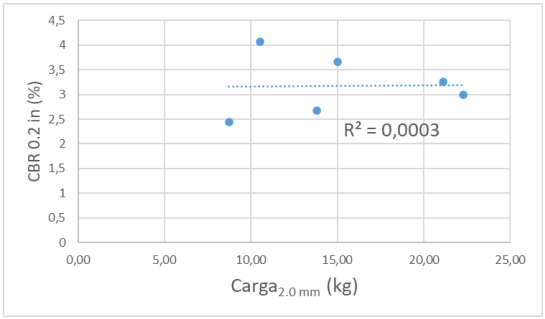

CBR 0.1 in (%)
R² = 2E-05
Carga1.25mm (kg)

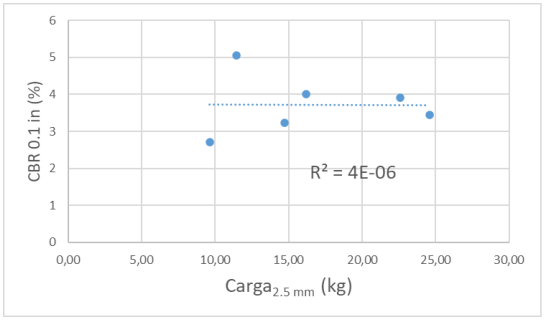

CBR 0.2 in (%)
R² = 1E-05
Carga1.25 mm (kg)

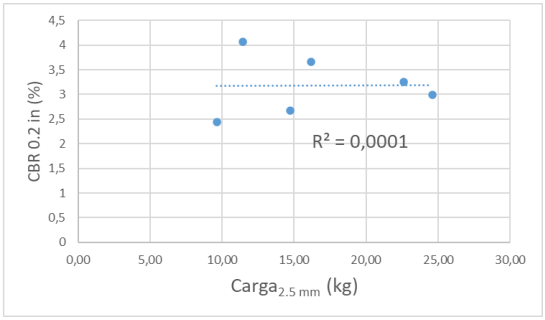

CBR 0.1 in (%)
R² = 6E-06
Carga1.5 mm (kg)

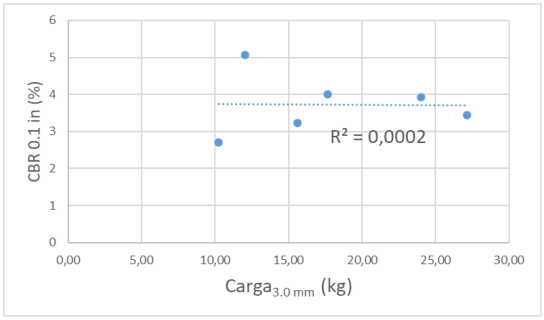

CBR 0.2 in (%)
R² = 2E-06
Carga1.5 mm (kg)

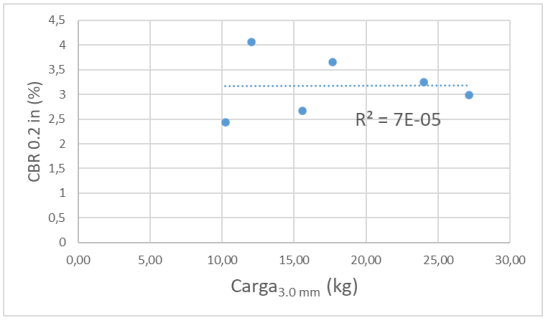

CBR 0.1 in (%)
R² = 6E-05
Carga2.0 mm (kg)

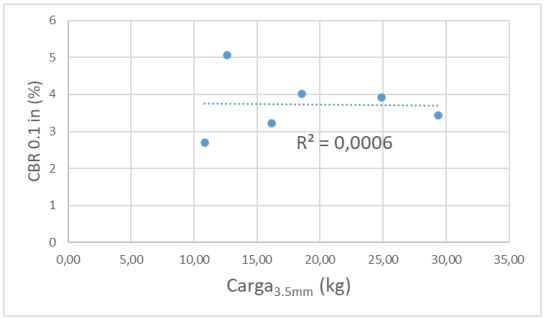

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0003
Carga2.0 mm (kg)

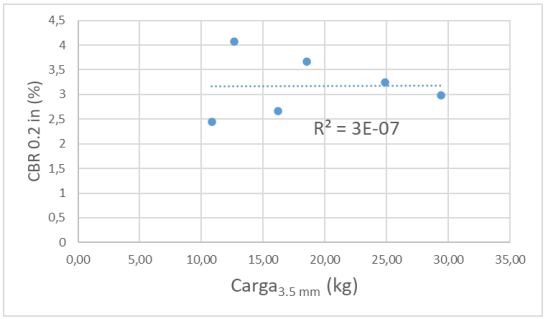

CBR 0.1 in (%)
R² = 4E-06
Carga2.5 mm (kg)

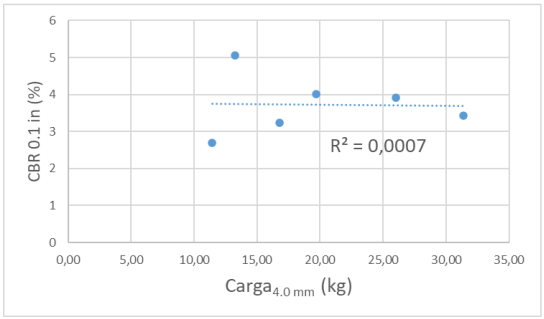

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0001
Carga2.5 mm (kg)

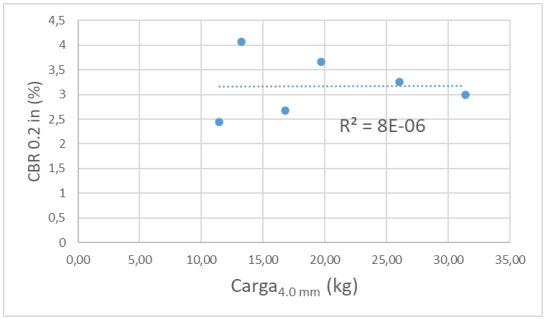

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0002
Carga3.0 mm (kg)

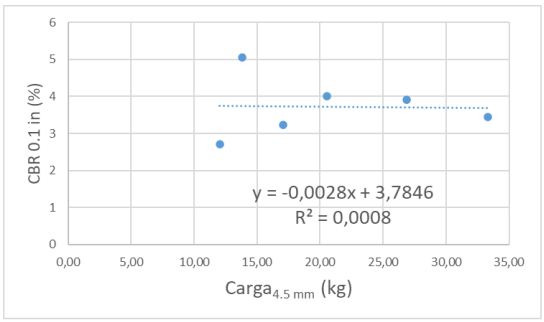

CBR 0.2 in (%)
R² = 7E-05
Carga3.0 mm (kg)

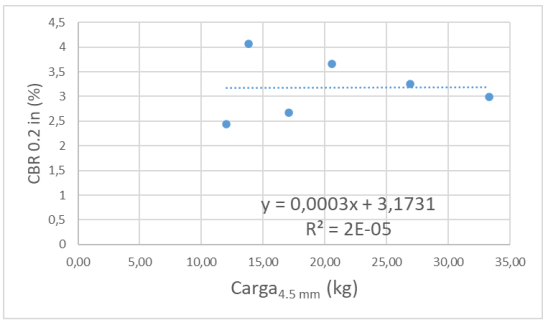

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0006
Carga3.5mm (kg)

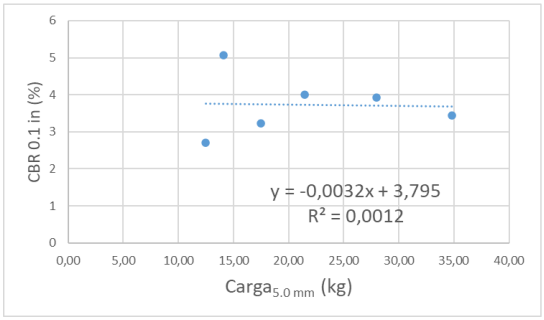

CBR 0.2 in (%)
R² = 3E-07
Carga3.5 mm (kg)

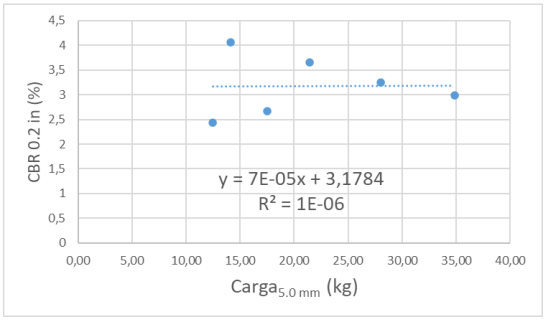

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0007
Carga4.0 mm (kg)


CBR 0.2 in (%)
R² = 8E-06
Carga4.0 mm (kg)

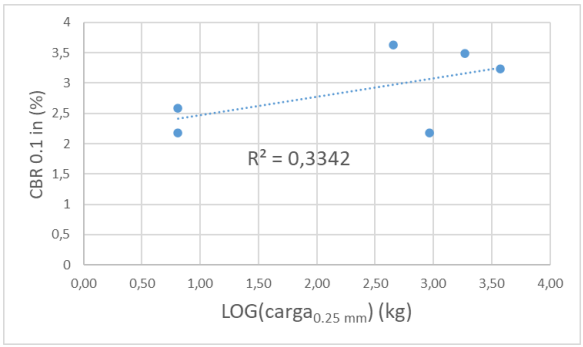


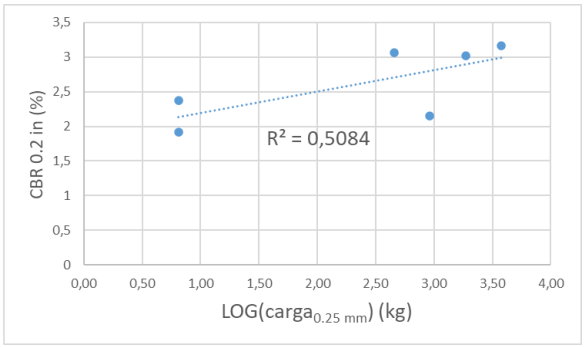


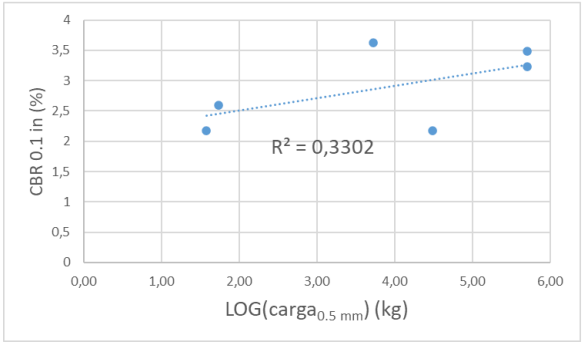


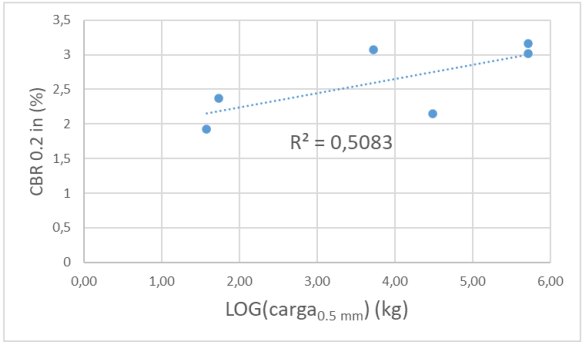


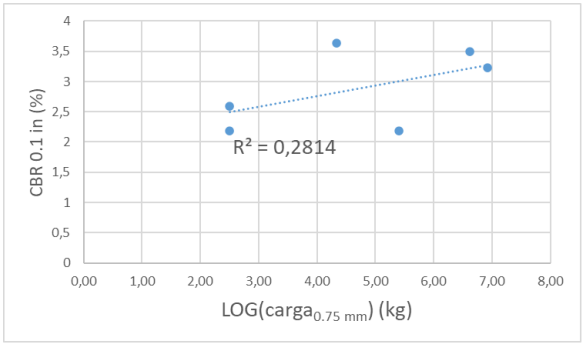
LOG (Carga Mini-CBR) Vs. CBR

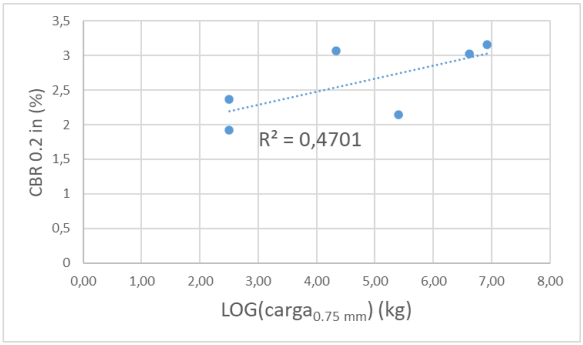


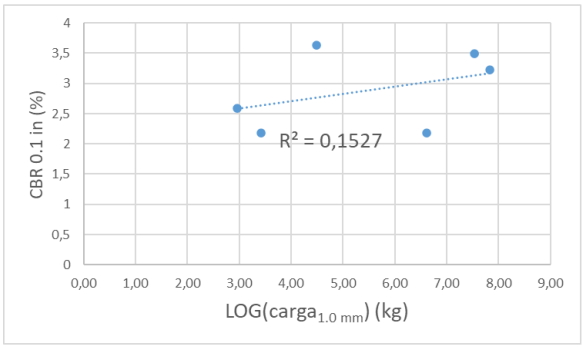


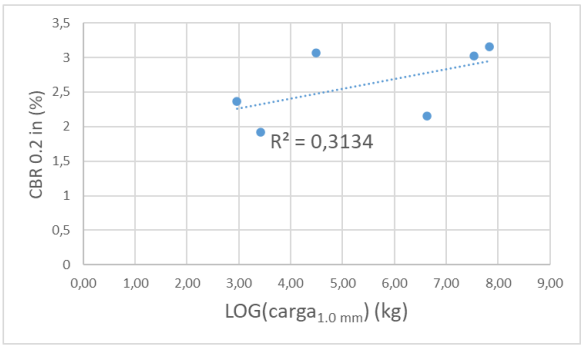


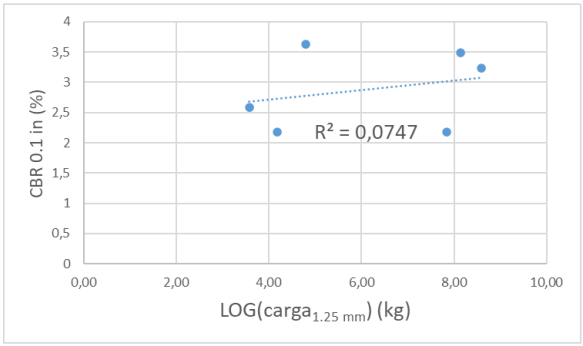


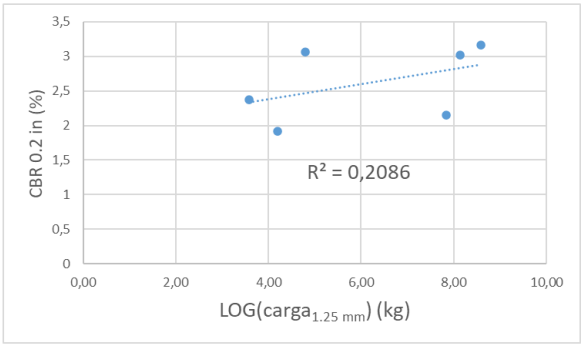

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,2814
LOG(carga0.75 mm) (kg)

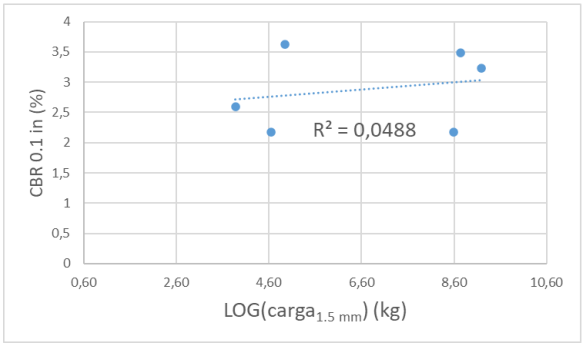

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,4701
LOG(carga0.75 mm) (kg)

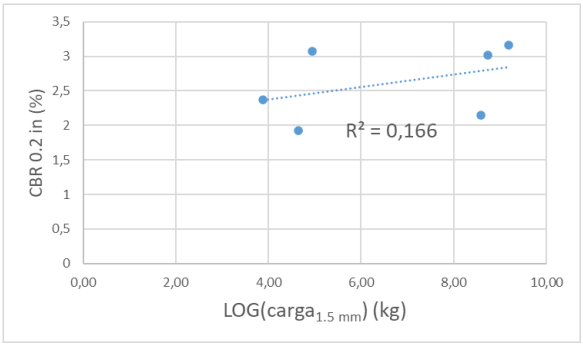

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,1527
LOG(carga1.0 mm) (kg)

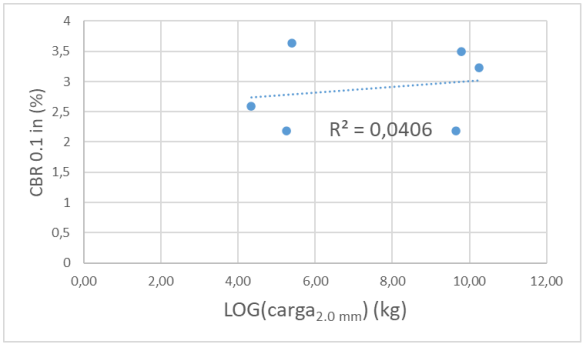

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,3134
LOG(carga1.0 mm) (kg)

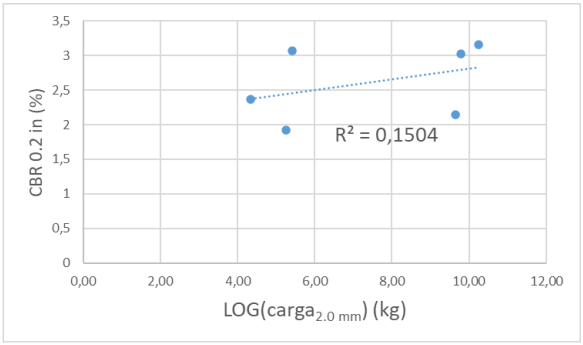

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0747
LOG(carga1.25 mm) (kg)

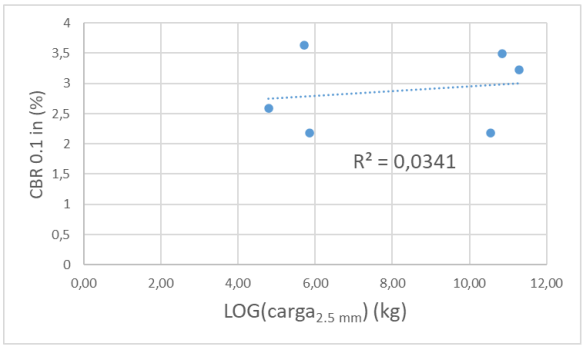

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,2086
LOG(carga1.25 mm) (kg)

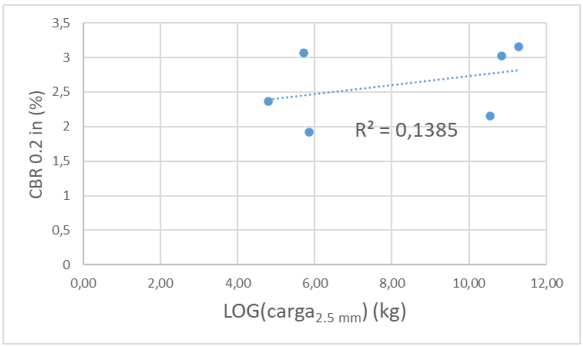

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0488
LOG(carga1.5 mm) (kg)

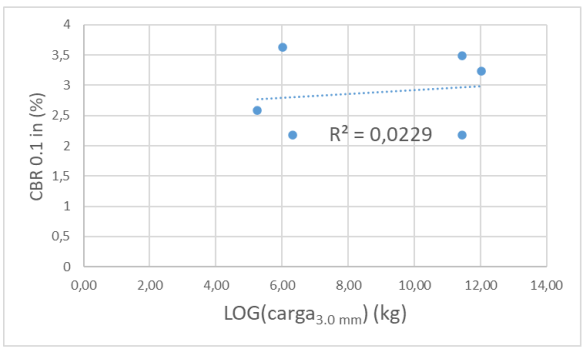

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,166
LOG(carga1.5 mm) (kg)

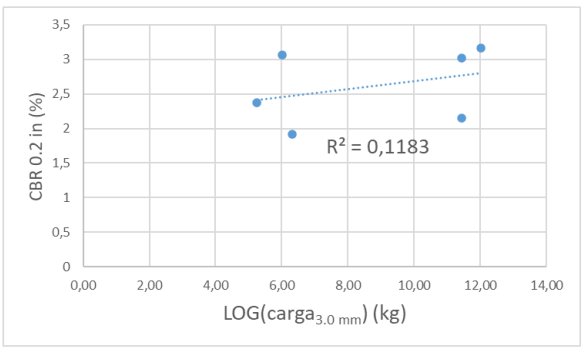

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga2.0 mm) (kg)
R² = 0,0406

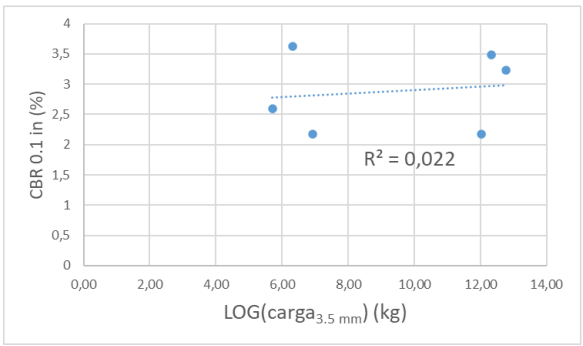

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga2.0 mm) (kg)
R² = 0,1504

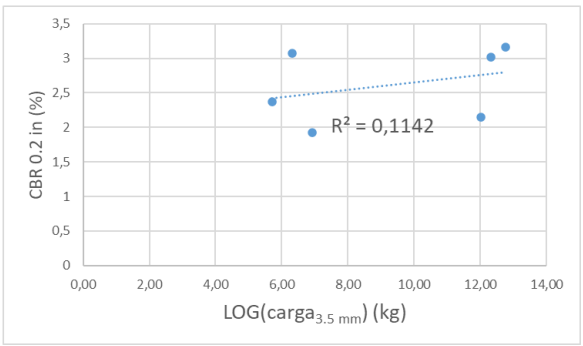

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga2.5 mm) (kg)
R² = 0,0341

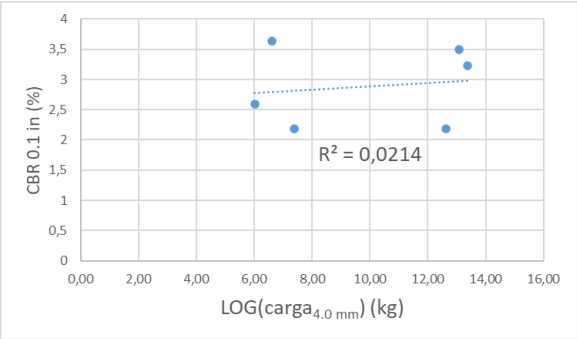

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga2.5 mm) (kg)
R² = 0,1385

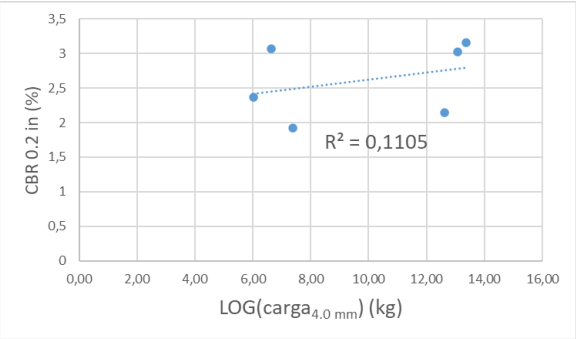

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga3.0 mm) (kg)
R² = 0,0229

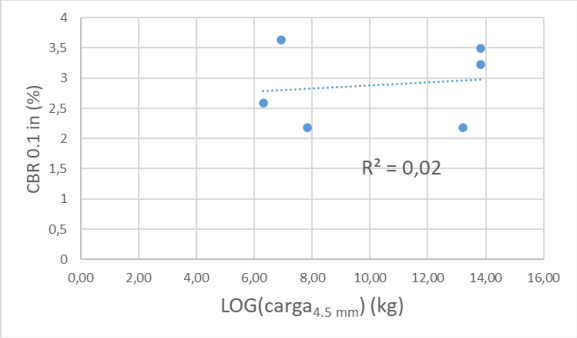

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga3.0 mm) (kg)
R² = 0,1183

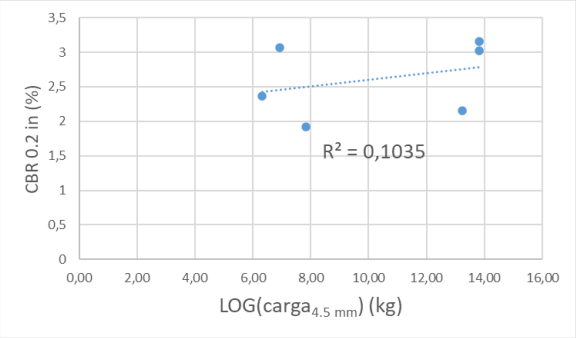

CBR 0.1 in (%)
LOG(carga3.5 mm) (kg)
R² = 0,022

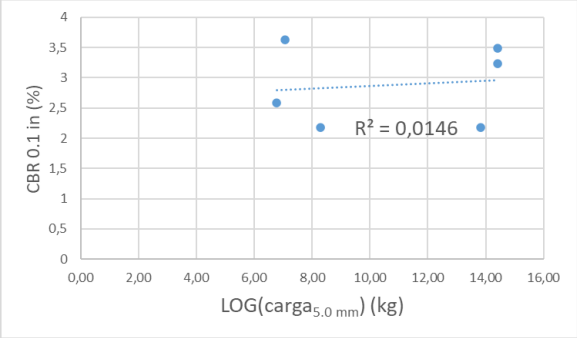

CBR 0.2 in (%)
LOG(carga3.5 mm) (kg)
R² = 0,1142

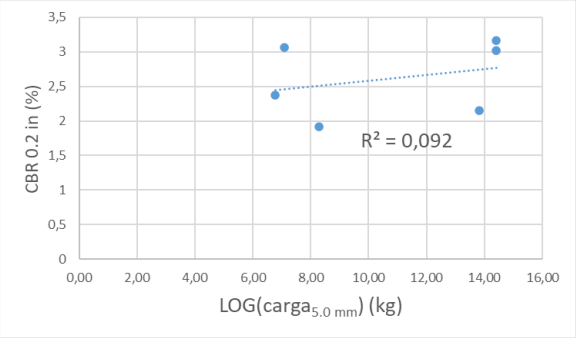




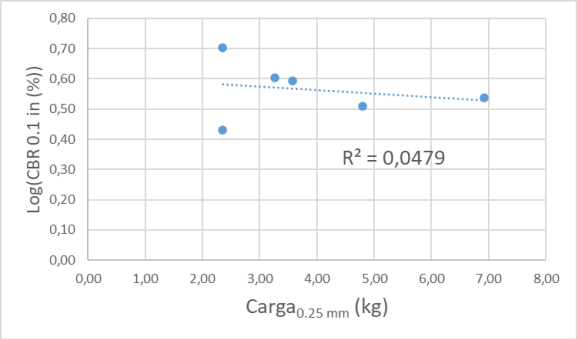


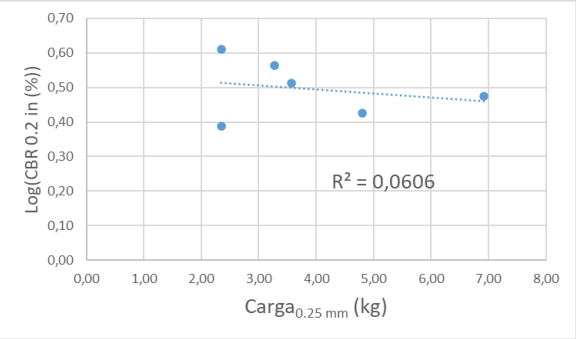


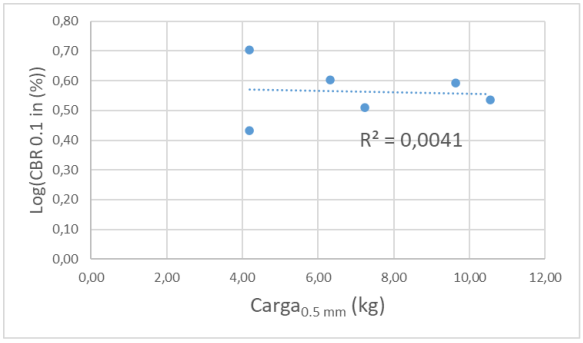


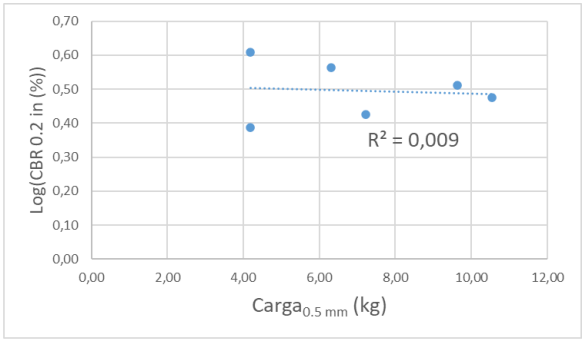


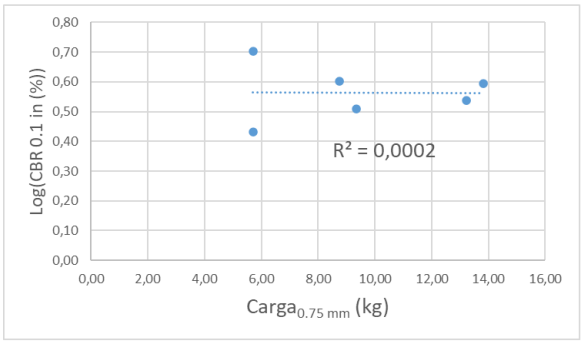
Carga Mini-CBR Vs. LOG (CBR)

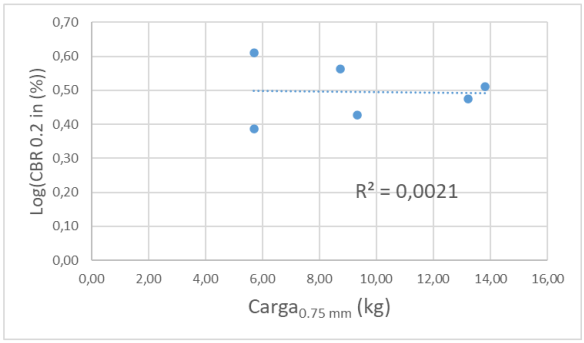


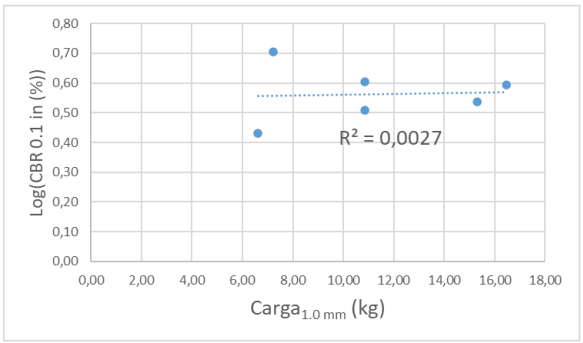


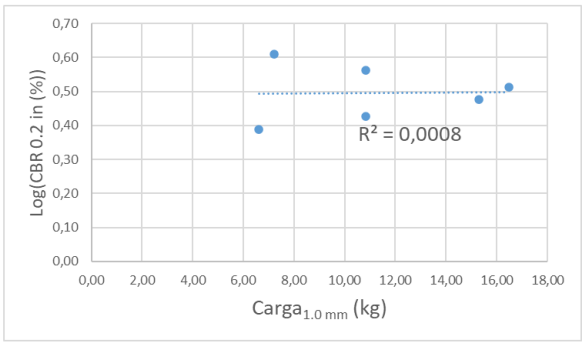

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00
R² = 0,0041
Carga0.5 mm (kg)

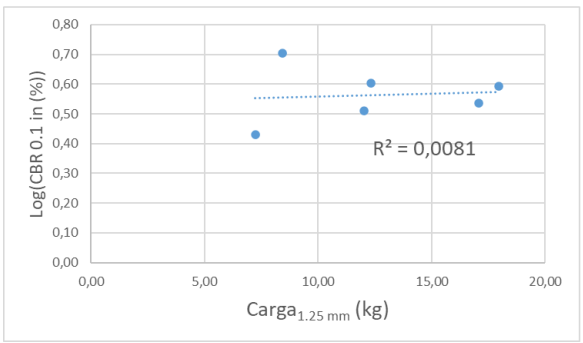

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00
R² = 0,009
Carga0.5 mm (kg)

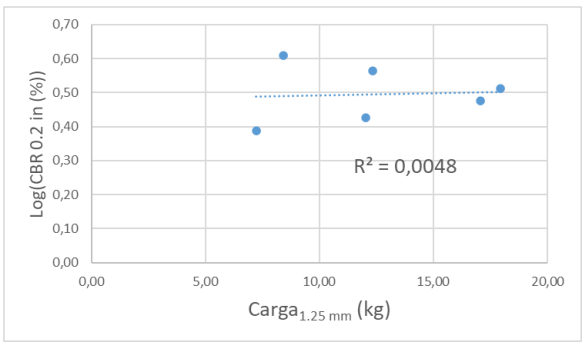

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00
R² = 0,0002
Carga0.75 mm (kg)

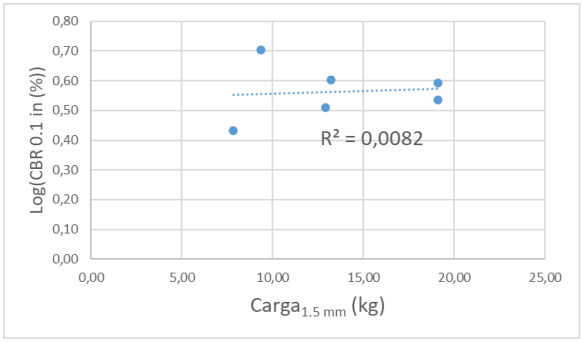

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00
R² = 0,0021
Carga0.75 mm (kg)

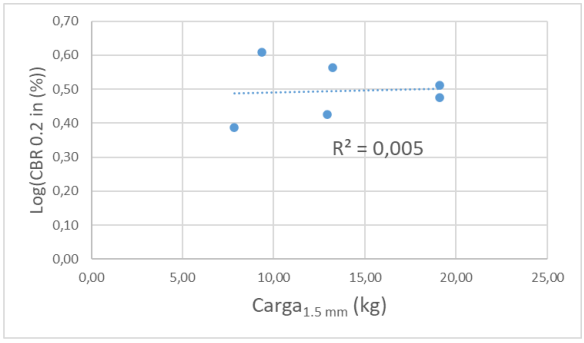

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00 18,00
R² = 0,0027
Carga1.0 mm (kg)

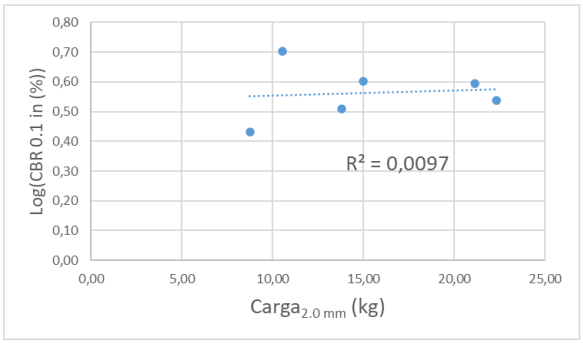

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00 18,00
R² = 0,0008
Carga1.0 mm (kg)

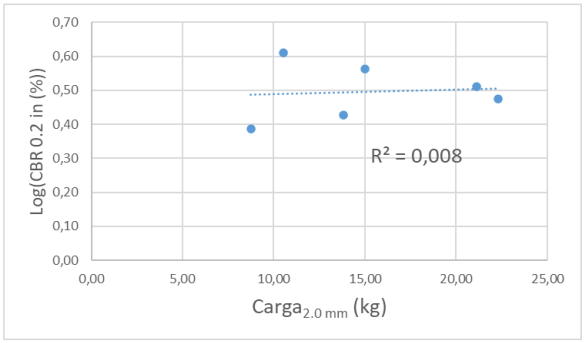

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00
R² = 0,0081
Carga1.25 mm (kg)

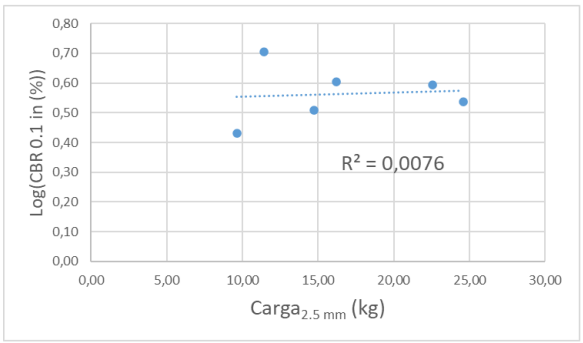

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 5,00 10,00 15,00 20,00
R² = 0,0048
Carga1.25 mm (kg)

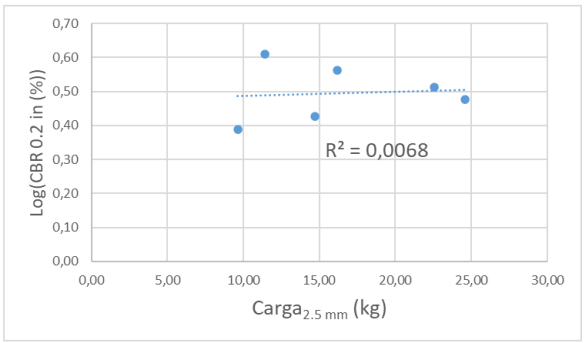

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
R² = 0,0082
Carga1.5 mm (kg)

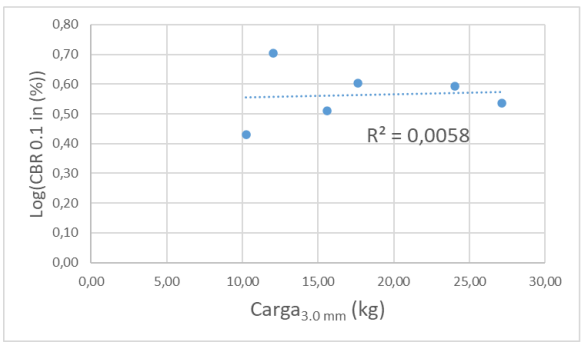

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
R² = 0,005
Carga1.5 mm (kg)

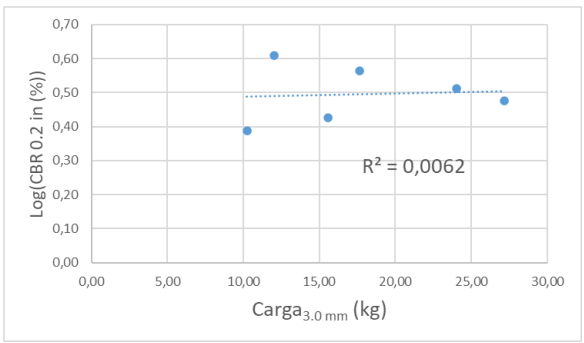

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
R² = 0,0097
Carga2.0 mm (kg)

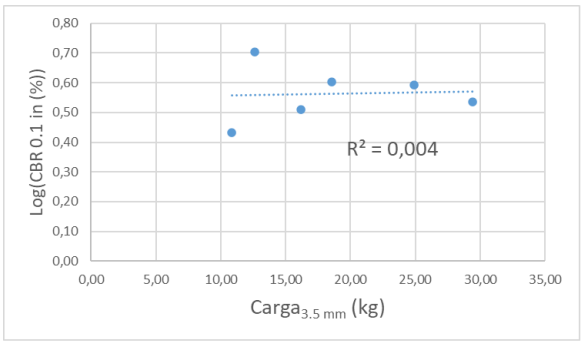

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
R² = 0,008
Carga2.0 mm (kg)

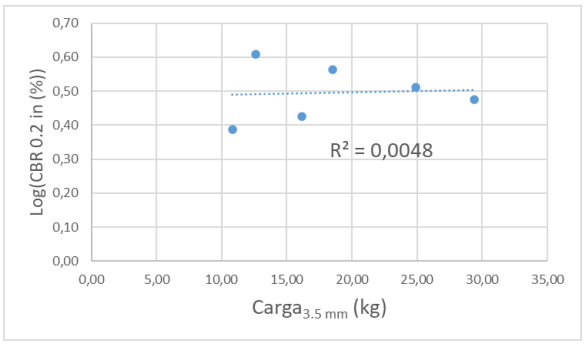

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
R² = 0,0076
Carga2.5 mm (kg)

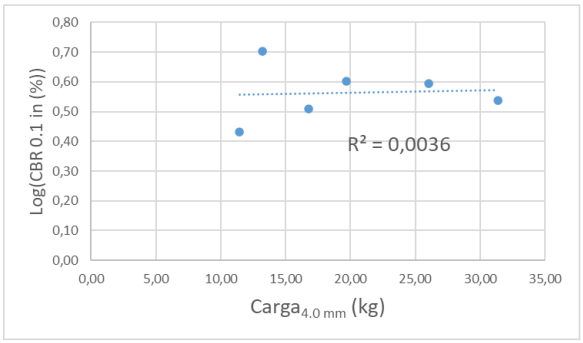

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
R² = 0,0068
Carga2.5 mm (kg)

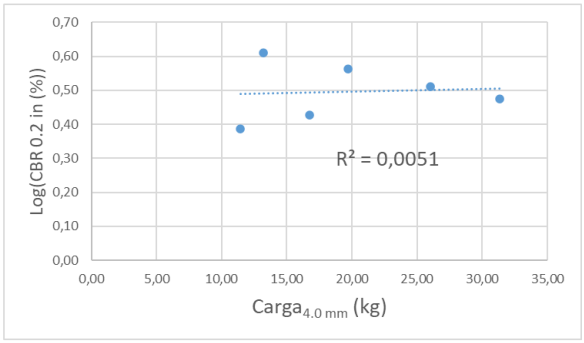

Log(CBR 0.1 in (%))
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
R² = 0,0058
Carga3.0 mm (kg)

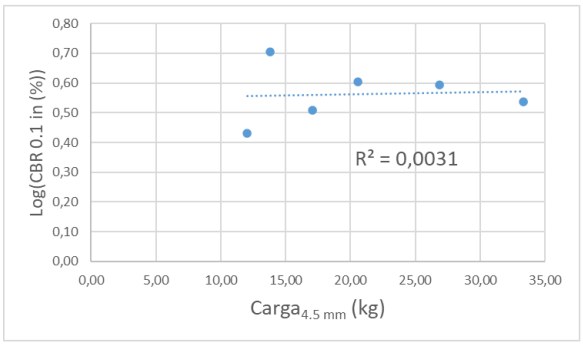

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
R² = 0,0062
Carga3.0 mm (kg)

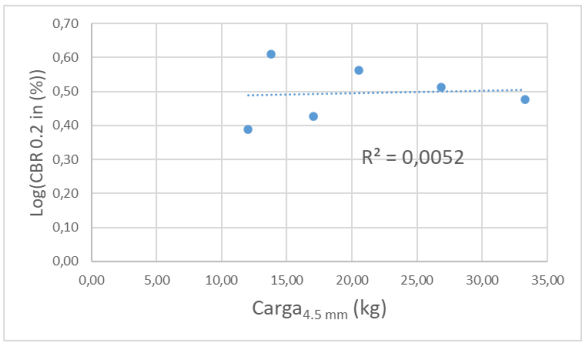


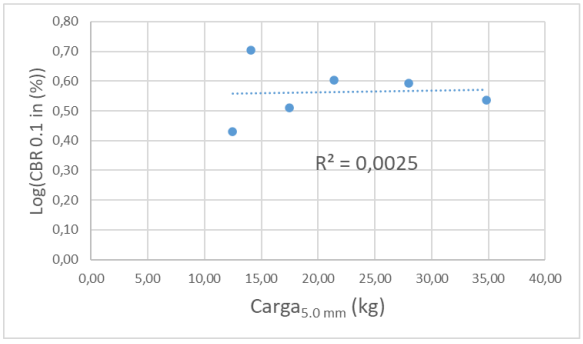


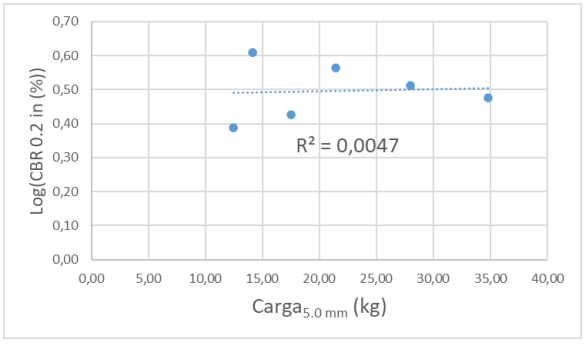






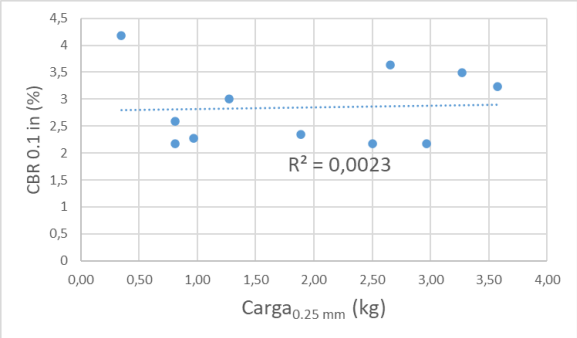


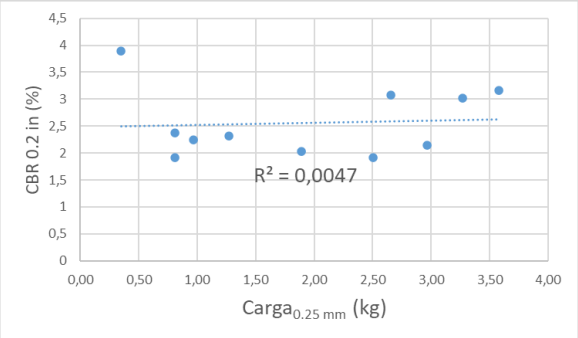


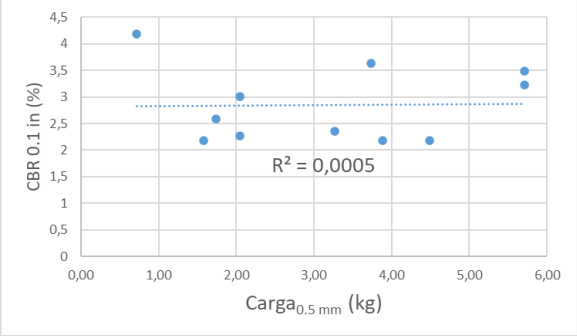


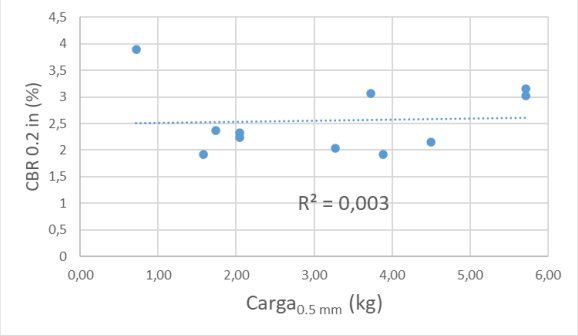
Muestras Limo Arcilloso de alta compresibilidad (MH)

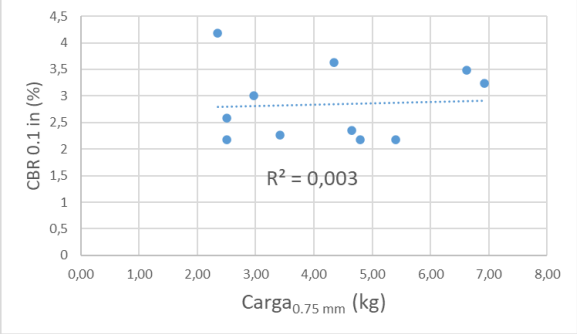
Carga Mini-CBR Vs. CBR

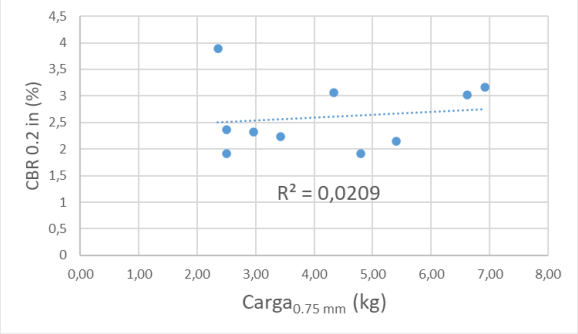


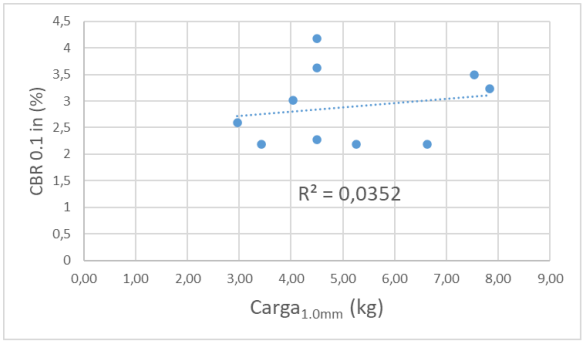


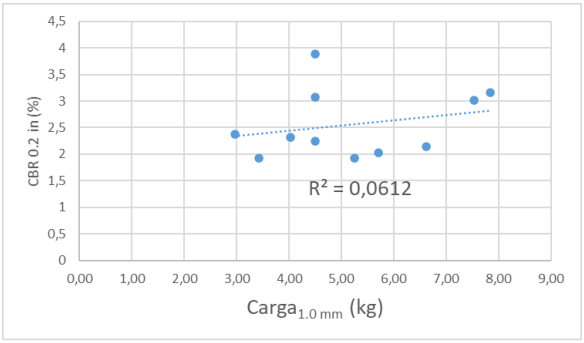


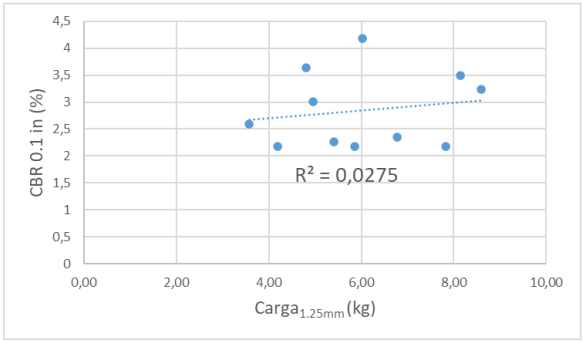


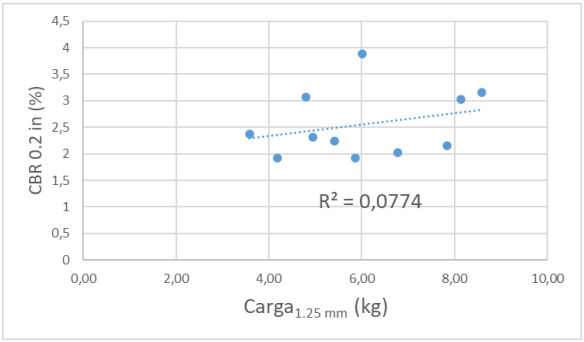


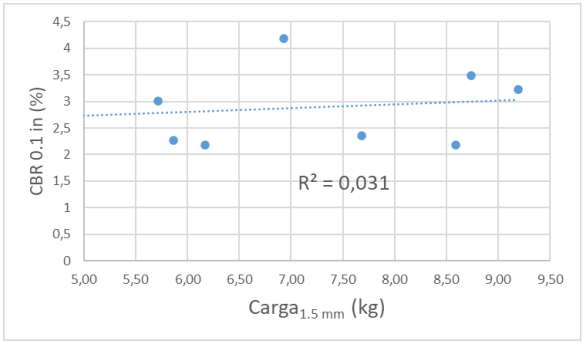


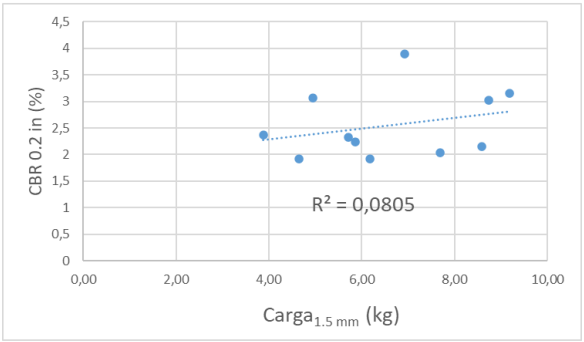

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0352
Carga1.0mm (kg)

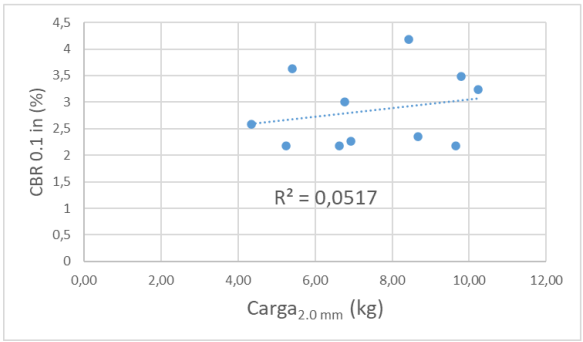

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0612
Carga1.0 mm (kg)

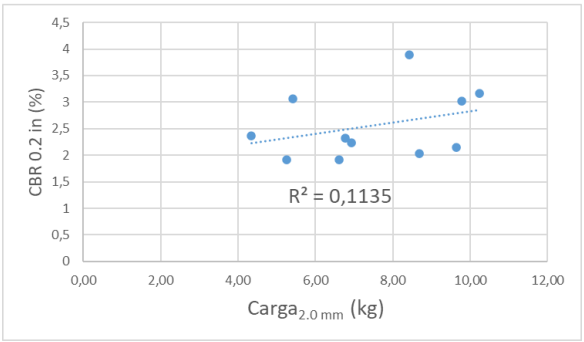

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0275
Carga1.25mm (kg)

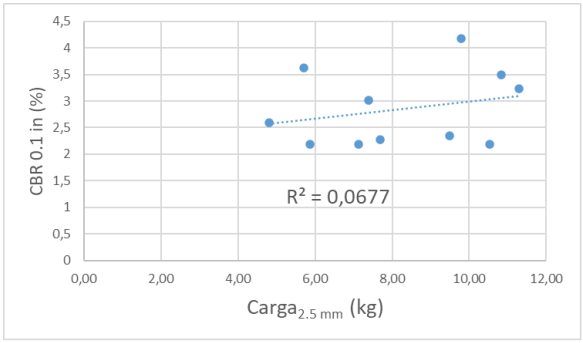

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0774
Carga1.25 mm (kg)

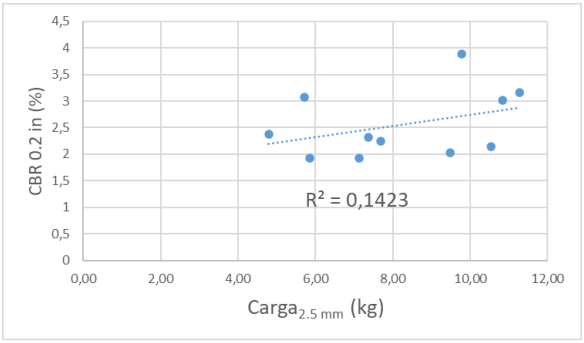

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,031
Carga1.5 mm (kg)

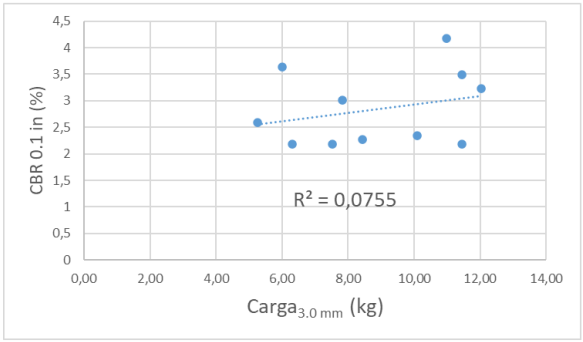

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0805
Carga1.5 mm (kg)

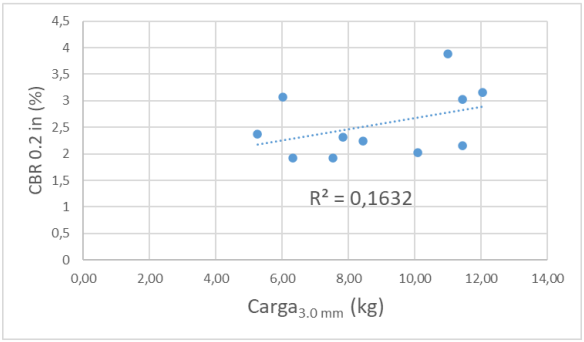

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0517
Carga2.0 mm (kg)

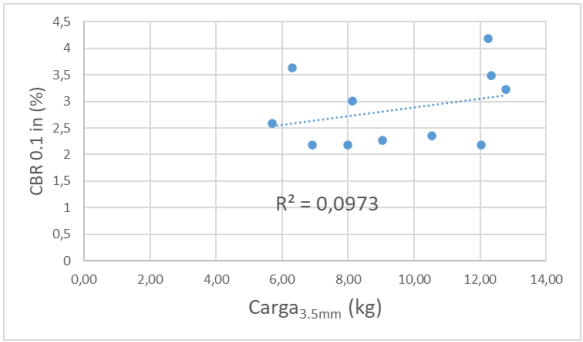

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,1135
Carga2.0 mm (kg)

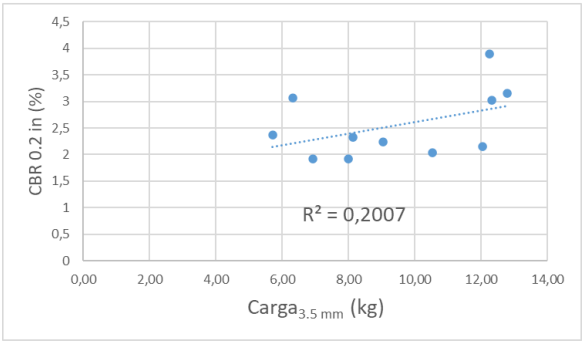

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0677
Carga2.5 mm (kg)

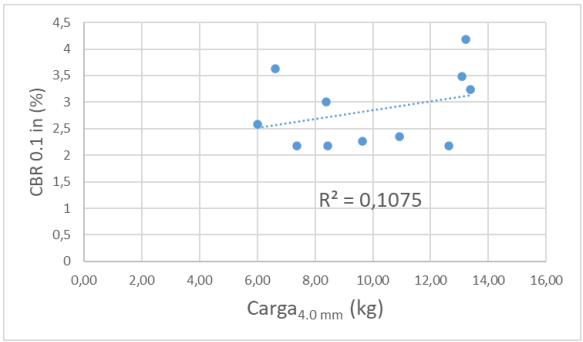

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,1423
Carga2.5 mm (kg)

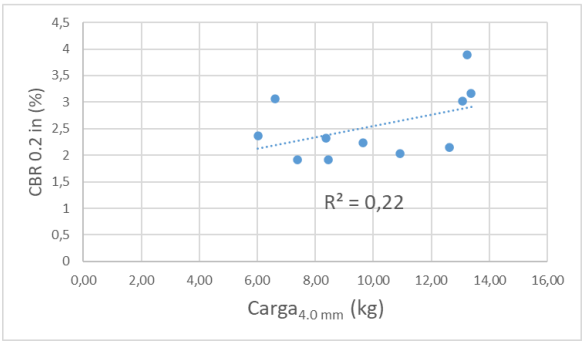

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0755
Carga3.0 mm (kg)

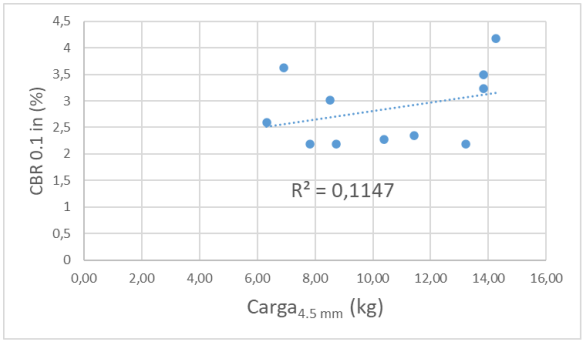

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,1632
Carga3.0 mm (kg)

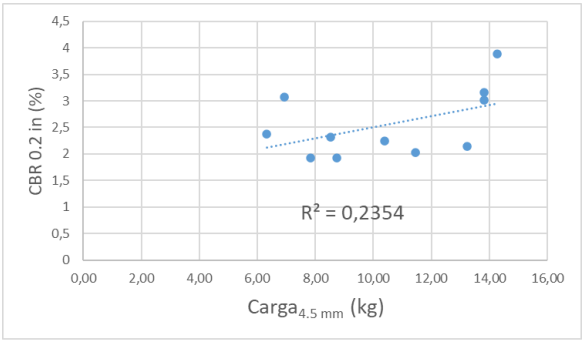

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0973
Carga3.5mm (kg)

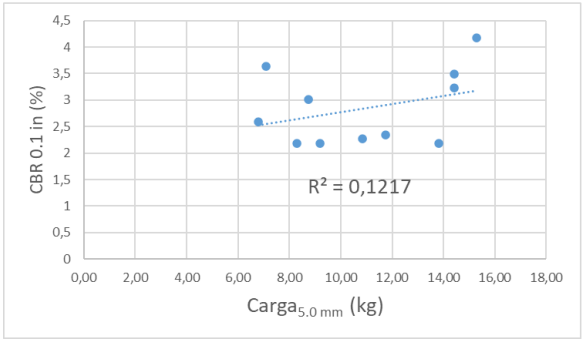

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,2007
Carga3.5 mm (kg)

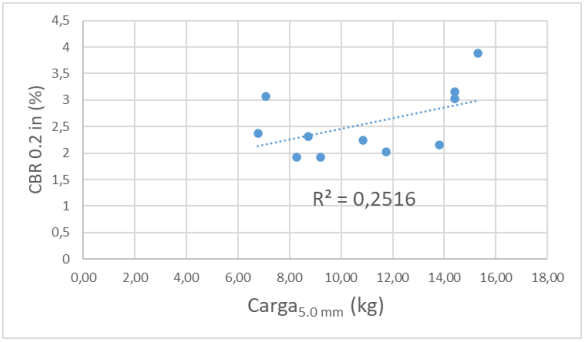

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,1075
Carga4.0 mm (kg)


CBR 0.2 in (%)
R² = 0,22
Carga4.0 mm (kg)

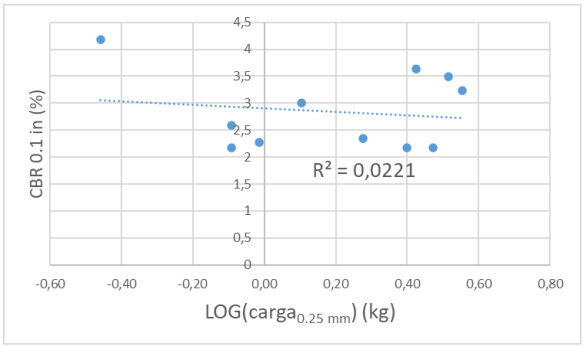


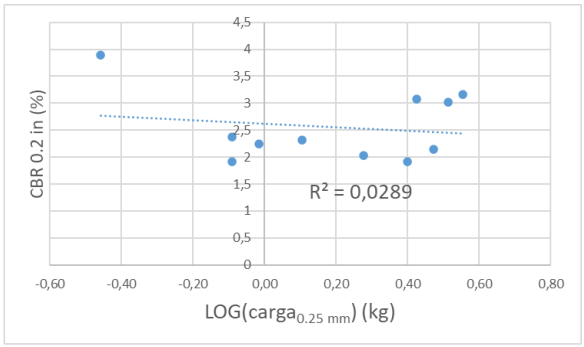


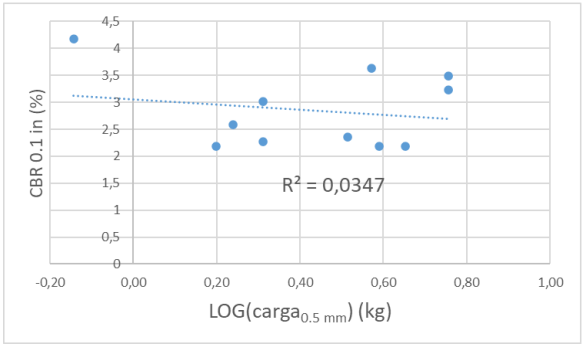


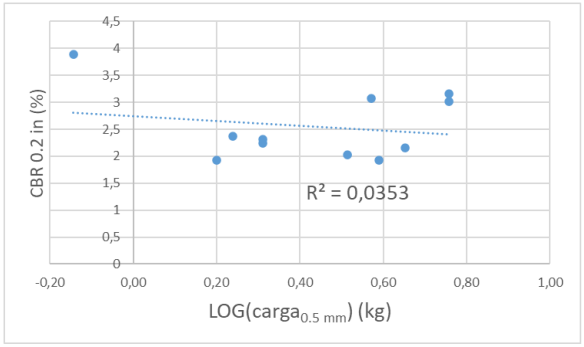


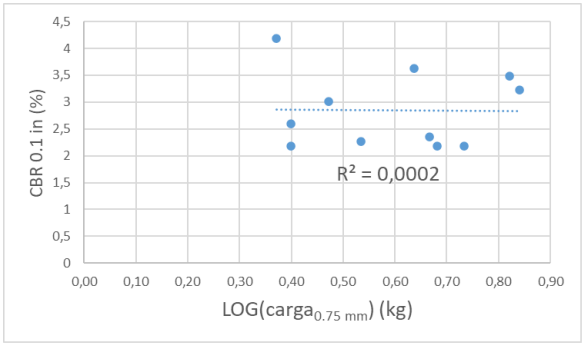
LOG (Carga Mini-CBR) Vs. CBR

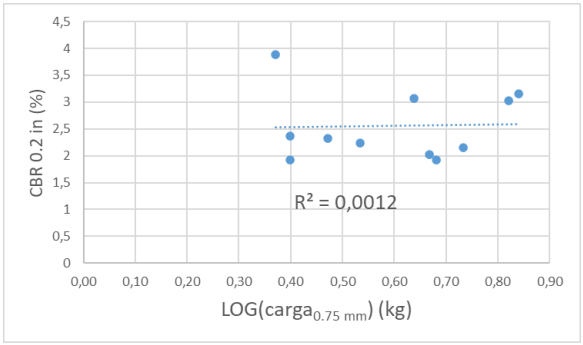


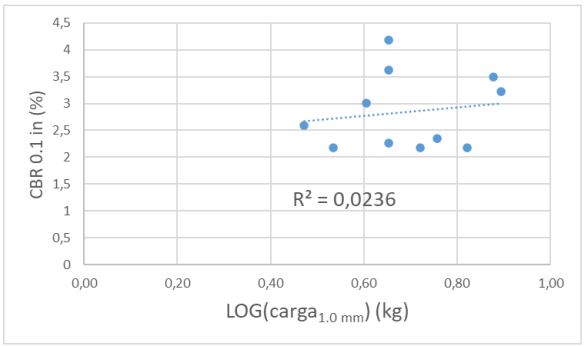


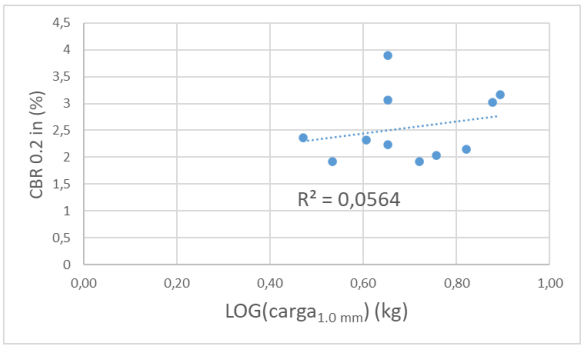


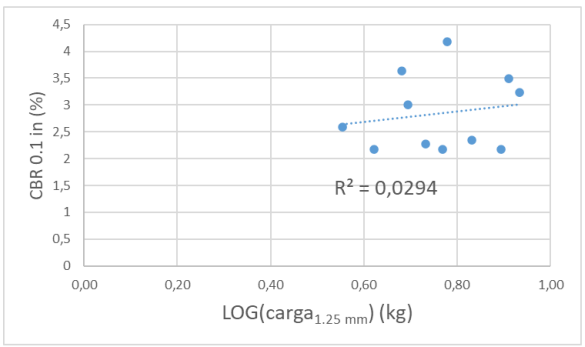


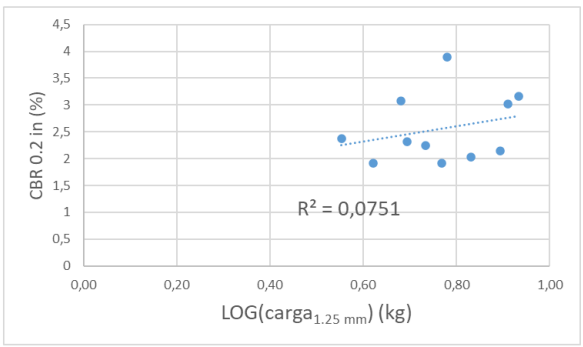

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0002
LOG(carga0.75 mm) (kg)

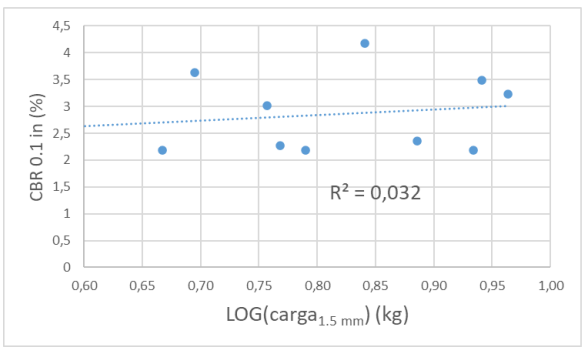

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0012
LOG(carga0.75 mm) (kg)

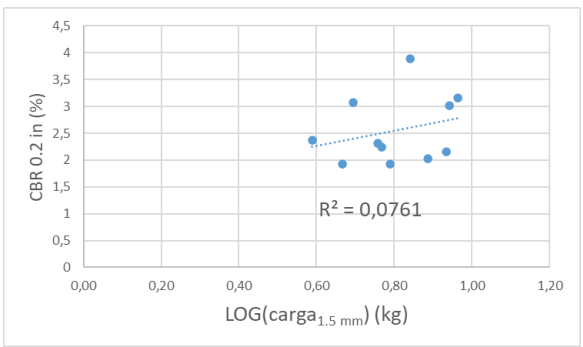

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0236
LOG(carga1.0 mm) (kg)

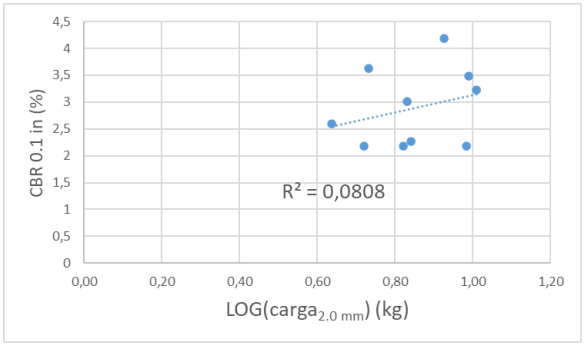

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0564
LOG(carga1.0 mm) (kg)

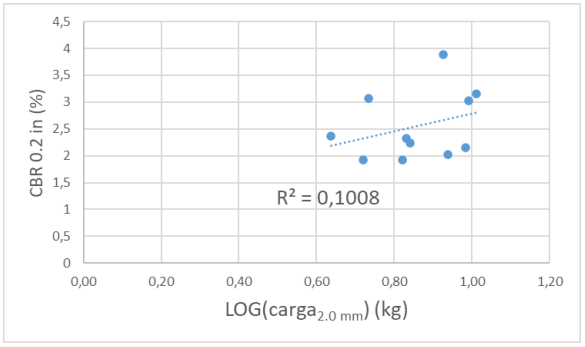

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0294
LOG(carga1.25 mm) (kg)

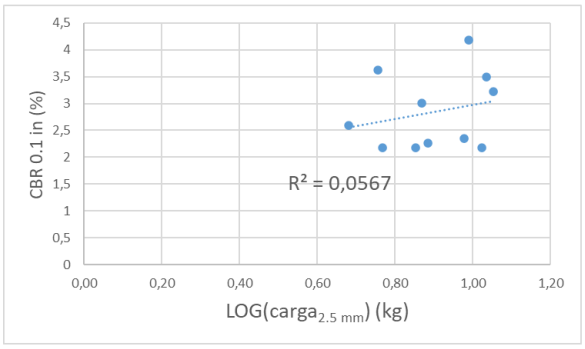

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0751
LOG(carga1.25 mm) (kg)

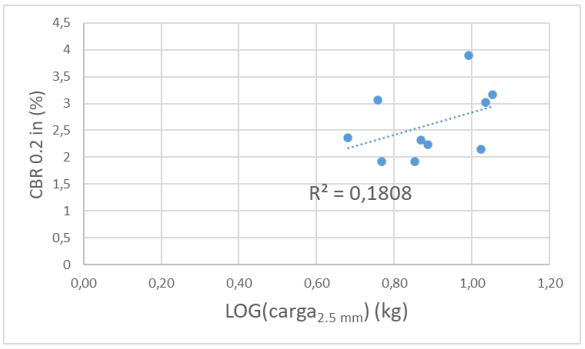

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,032
LOG(carga1.5 mm) (kg)

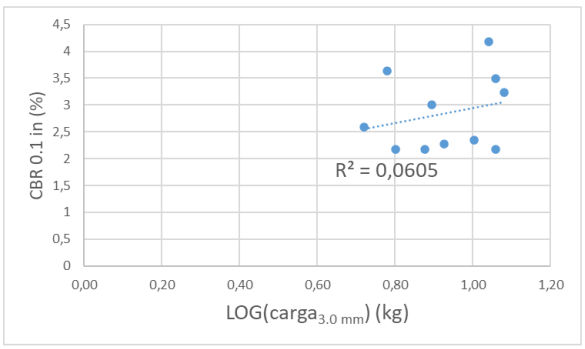

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0761
LOG(carga1.5 mm) (kg)

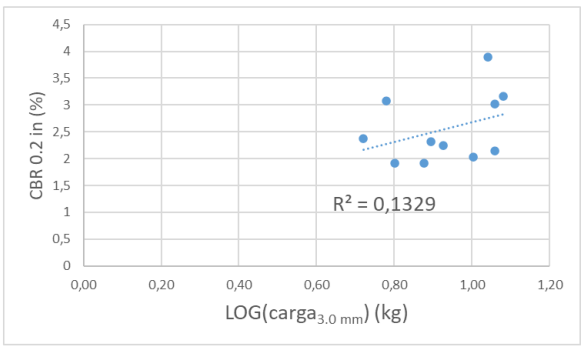

CBR 0.1 in (%)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
1,20
R² = 0,0808
LOG(carga2.0 mm) (kg)

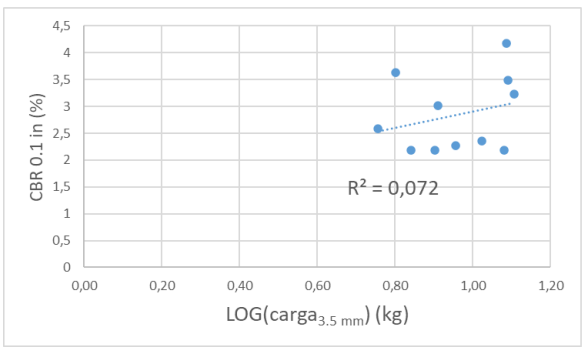

CBR 0.2 in (%)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
1,20
R² = 0,1008
LOG(carga2.0 mm) (kg)

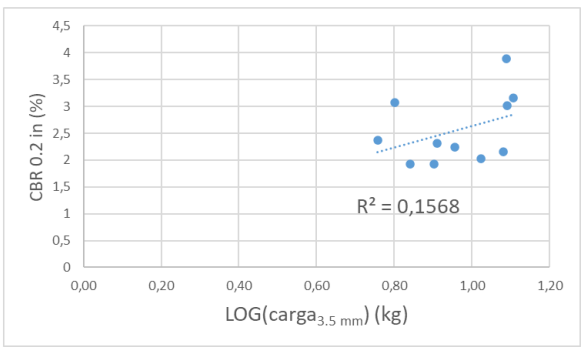

CBR 0.1 in (%)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
1,20
R² = 0,0567
LOG(carga2.5 mm) (kg)

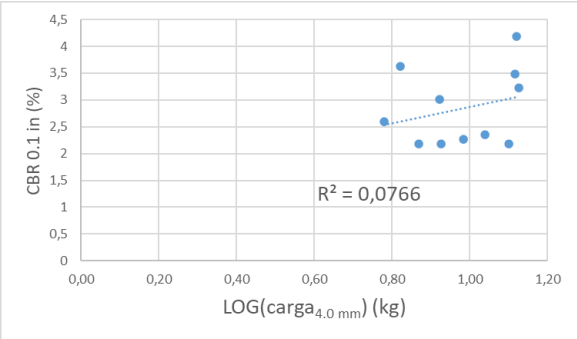

CBR 0.2 in (%)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
1,20
R² = 0,1808
LOG(carga2.5 mm) (kg)

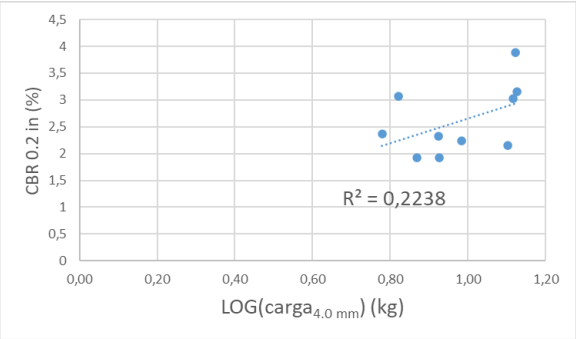

CBR 0.1 in (%)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
1,20
R² = 0,0605
LOG(carga3.0 mm) (kg)

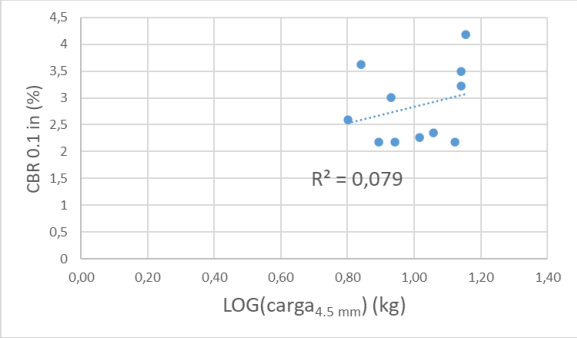

CBR 0.2 in (%)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
1,20
R² = 0,1329
LOG(carga3.0 mm) (kg)

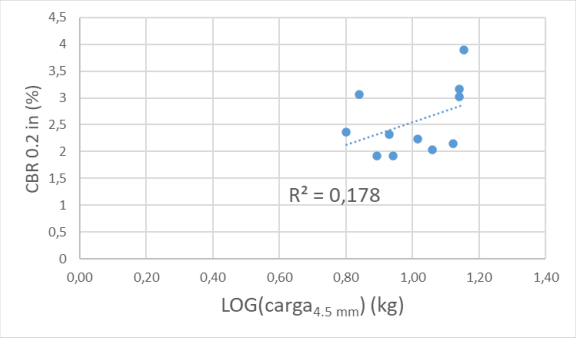

CBR 0.1 in (%)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
1,20
R² = 0,072
LOG(carga3.5 mm) (kg)

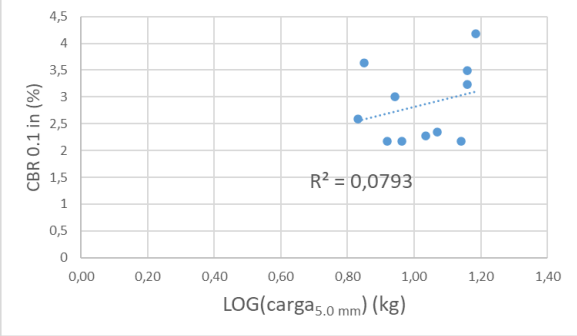

CBR 0.2 in (%)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
1,20
R² = 0,1568
LOG(carga3.5 mm) (kg)

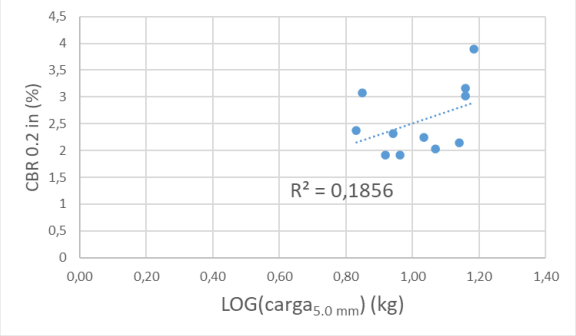




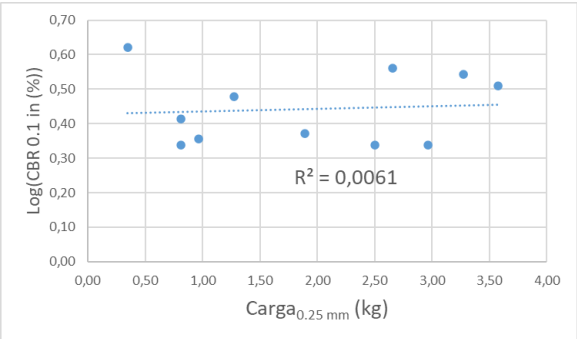


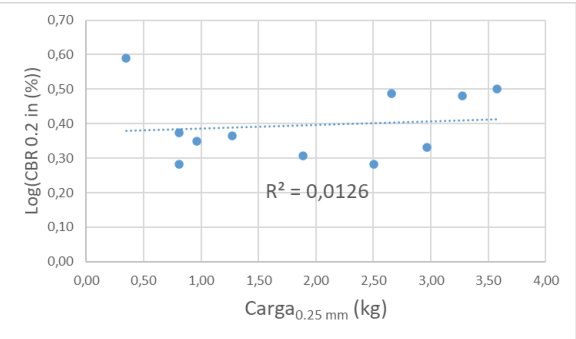


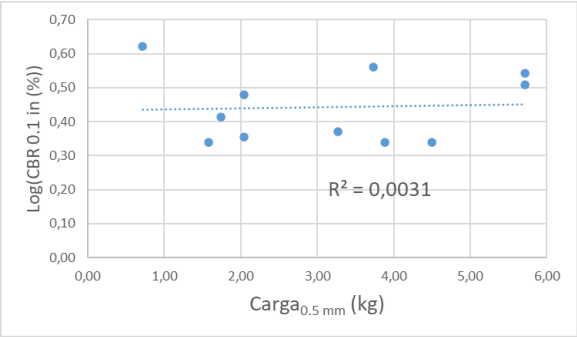


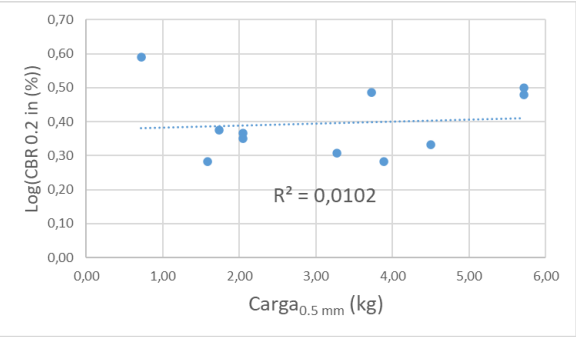


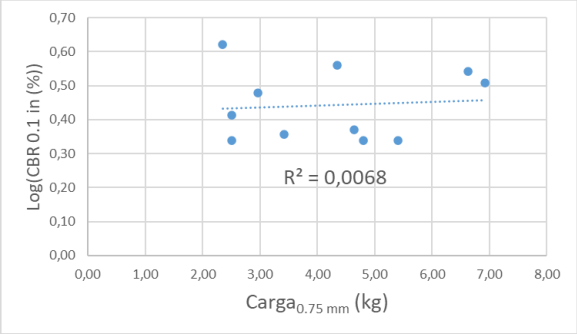
Carga Mini-CBR Vs. LOG (CBR)

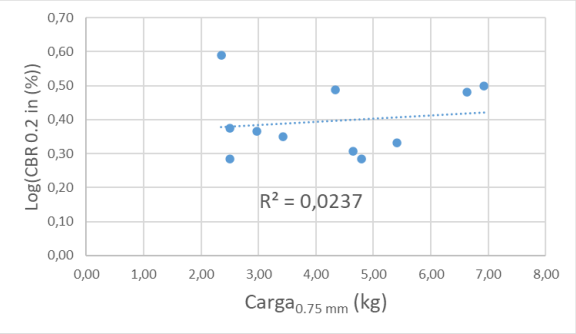


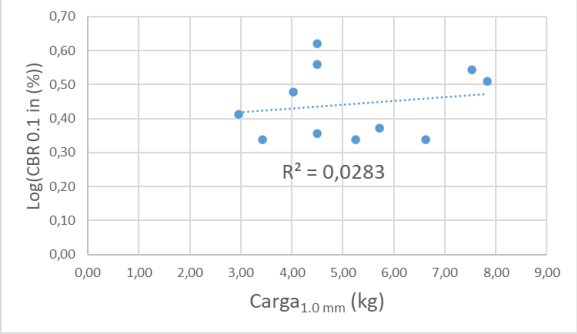


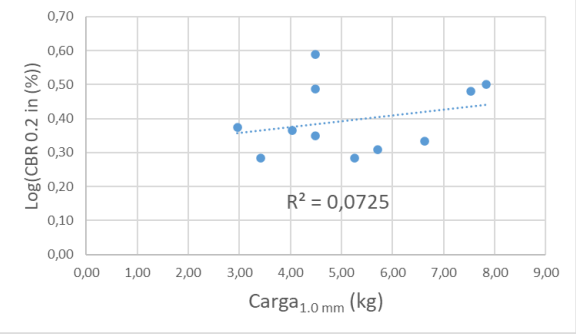

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00
R² = 0,0031
Carga0.5 mm (kg)

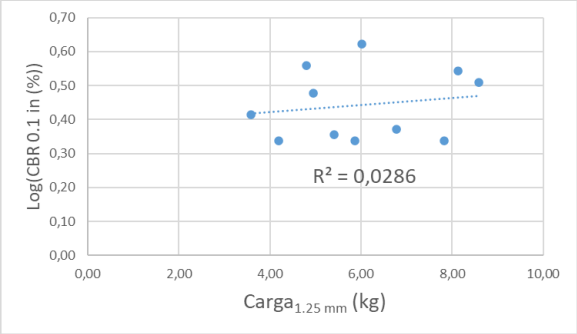

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00
R² = 0,0102
Carga0.5 mm (kg)

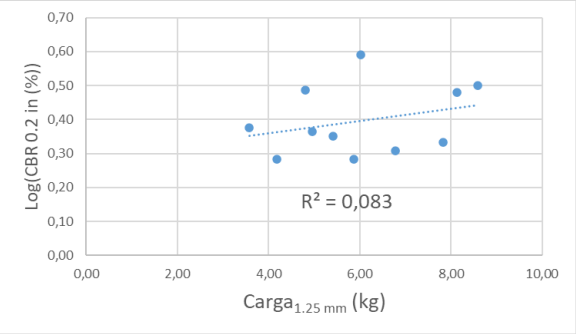

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00
R² = 0,0068
Carga0.75 mm (kg)

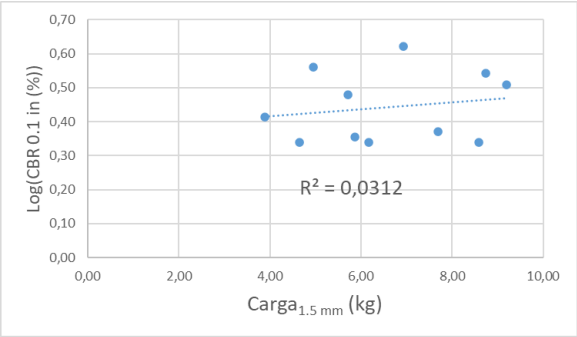

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00
R² = 0,0237
Carga0.75 mm (kg)

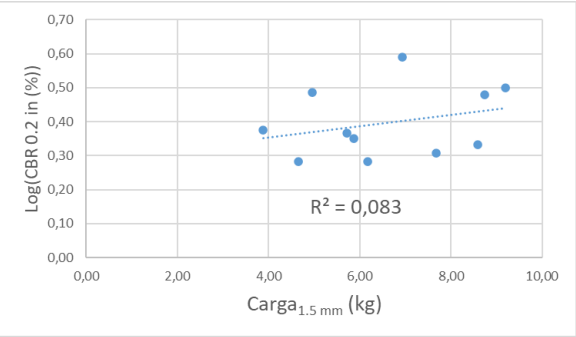

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00 9,00
R² = 0,0283
Carga1.0 mm (kg)

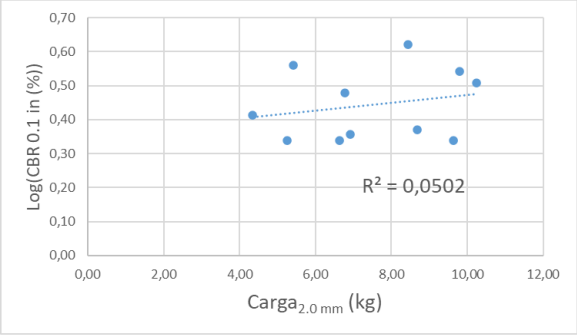

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00 9,00
R² = 0,0725
Carga1.0 mm (kg)

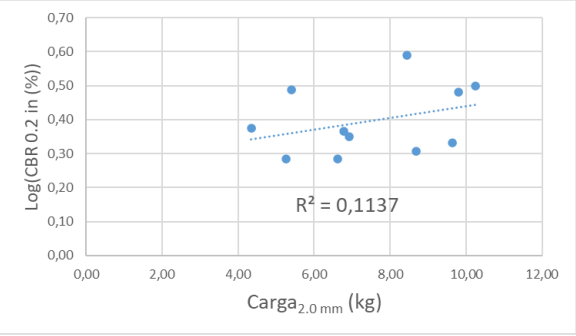

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00
R² = 0,0286
Carga1.25 mm (kg)

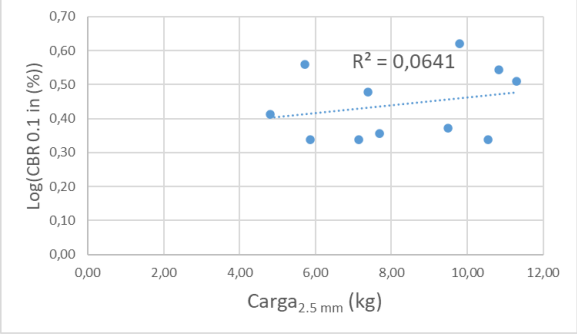

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00
R² = 0,083
Carga1.25 mm (kg)

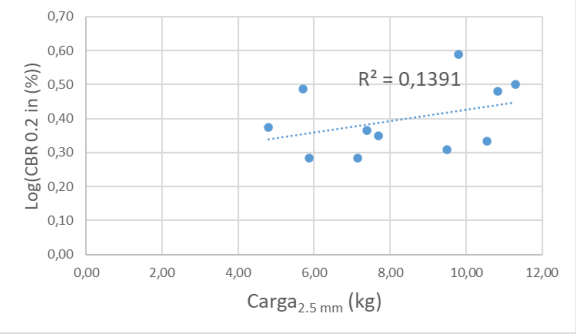

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
R² = 0,0312
Carga1.5 mm (kg)

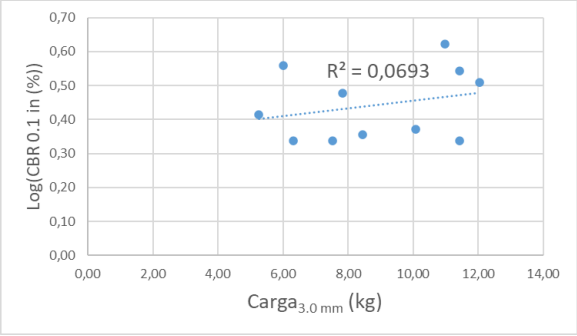

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
R² = 0,083
Carga1.5 mm (kg)

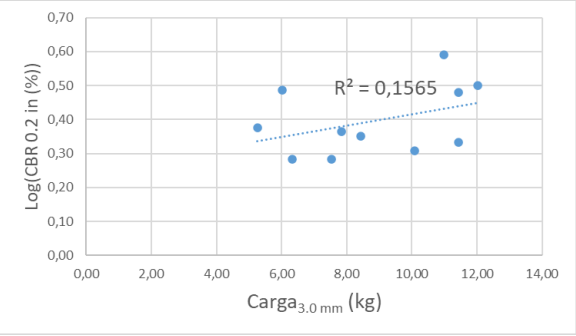

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
R² = 0,0502
Carga2.0 mm (kg)

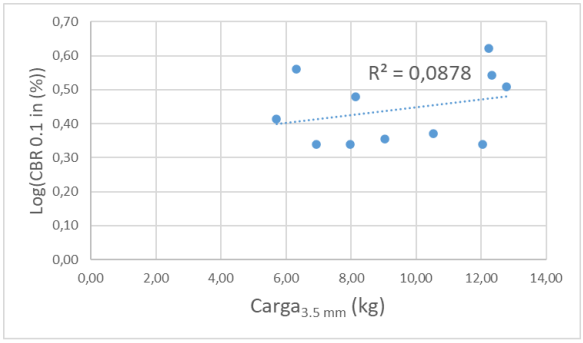

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
R² = 0,1137
Carga2.0 mm (kg)

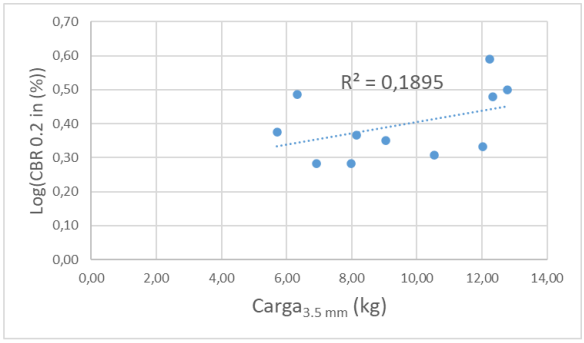

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
R² = 0,0641
Carga2.5 mm (kg)

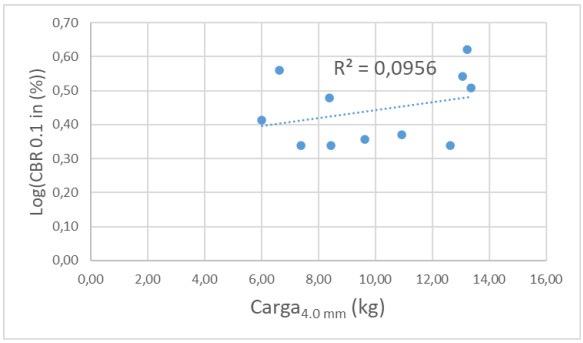

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
R² = 0,1391
Carga2.5 mm (kg)

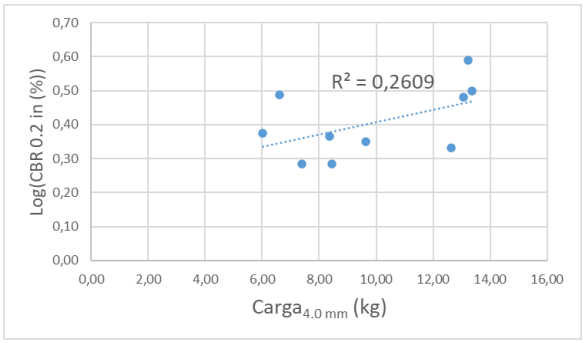

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
14,00
R² = 0,0693
Carga3.0 mm (kg)

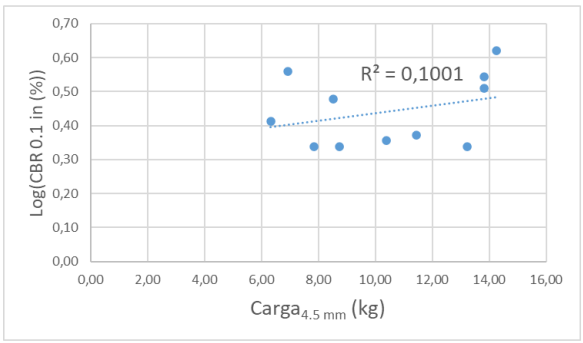

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
14,00
R² = 0,1565
Carga3.0 mm (kg)

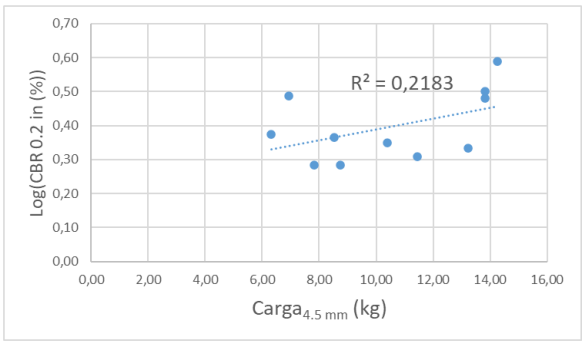


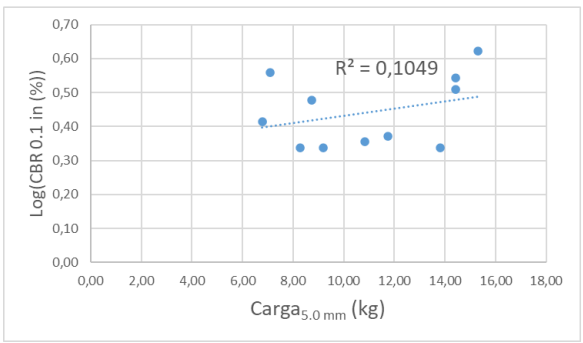


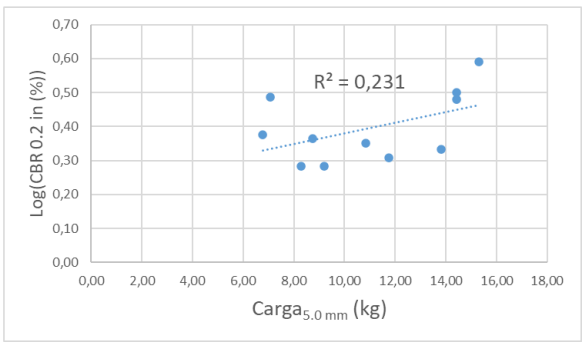






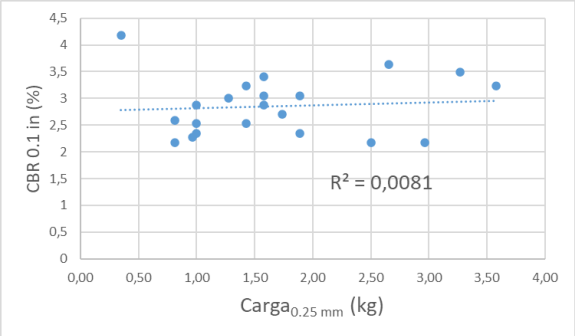


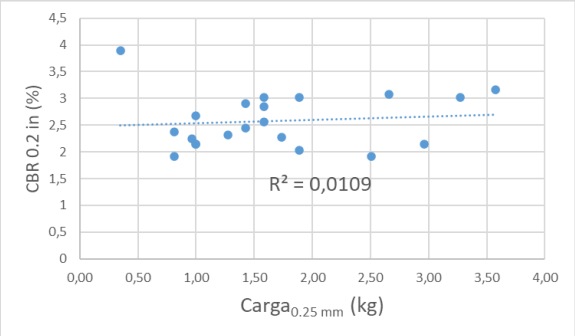


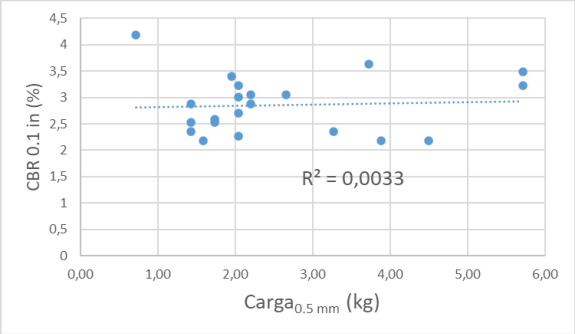


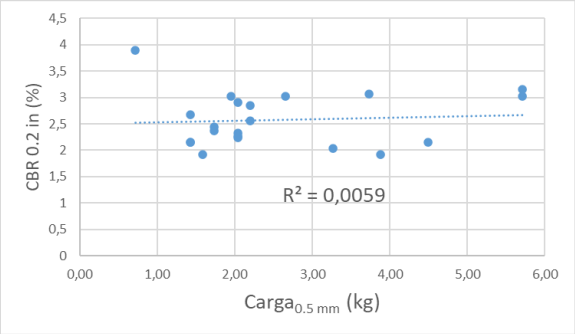
Todas las muestras (MH y CH)

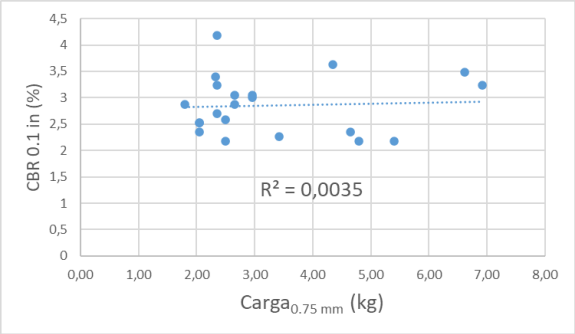
Carga Mini-CBR Vs. CBR

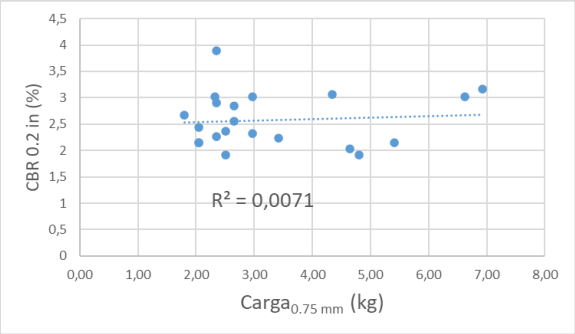


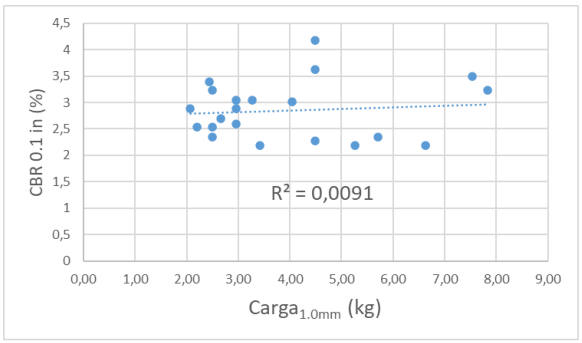


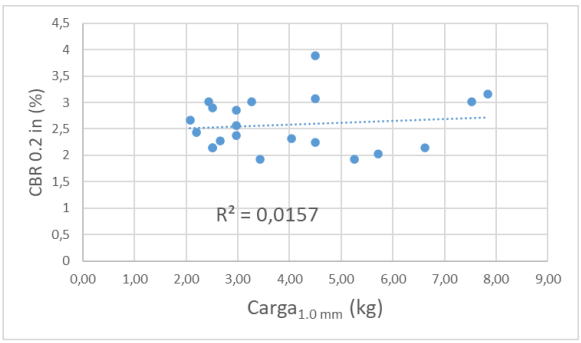


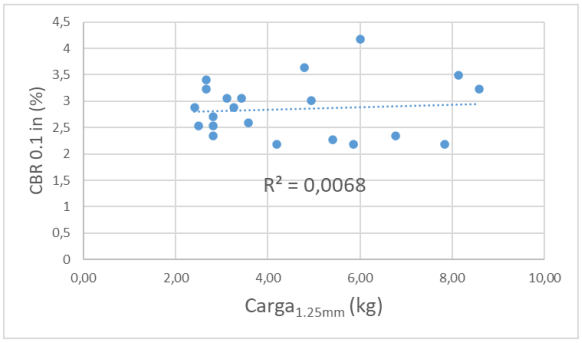


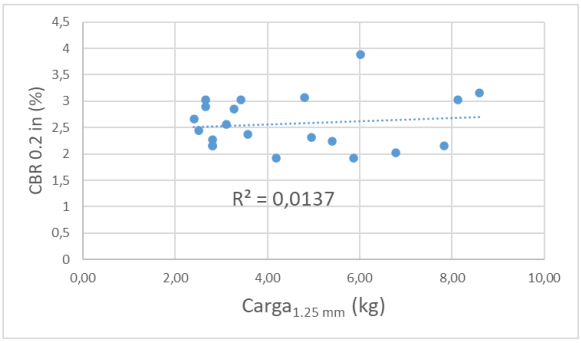


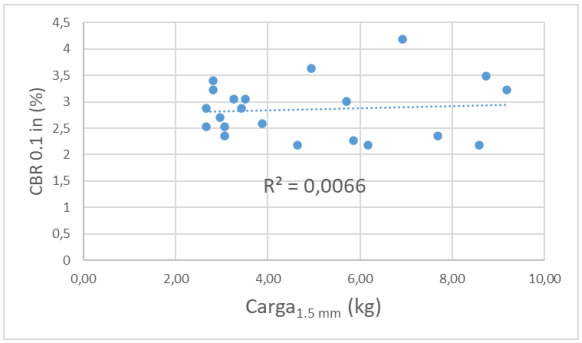


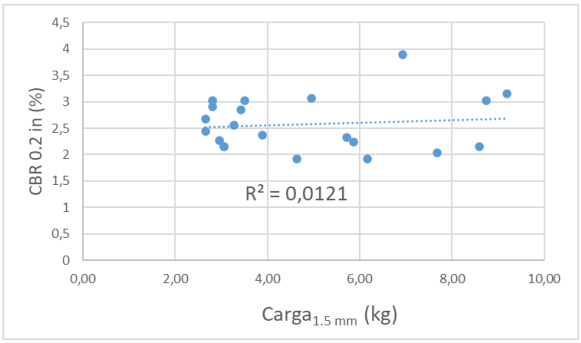

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0091
Carga1.0mm (kg)

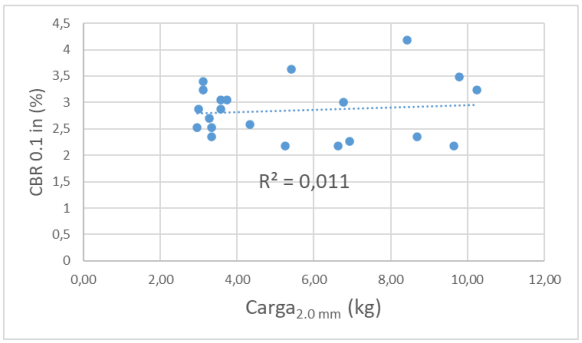

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0157
Carga1.0 mm (kg)

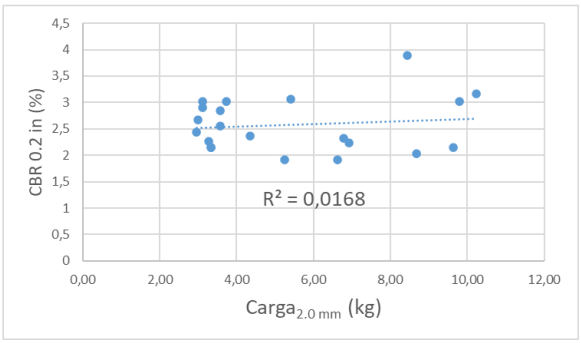

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0068
Carga1.25mm (kg)

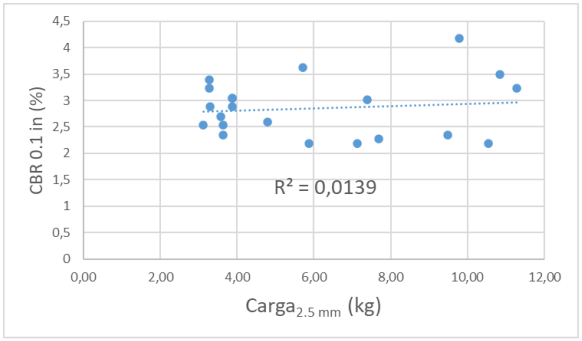

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0137
Carga1.25 mm (kg)

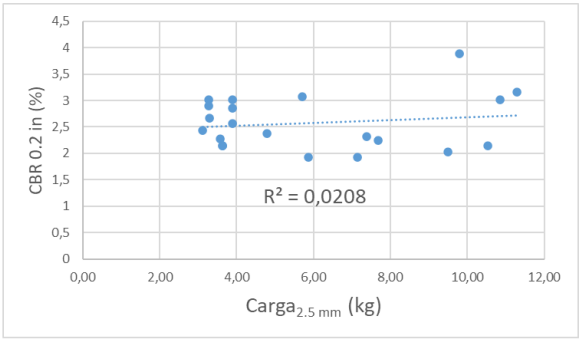

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0066
Carga1.5 mm (kg)

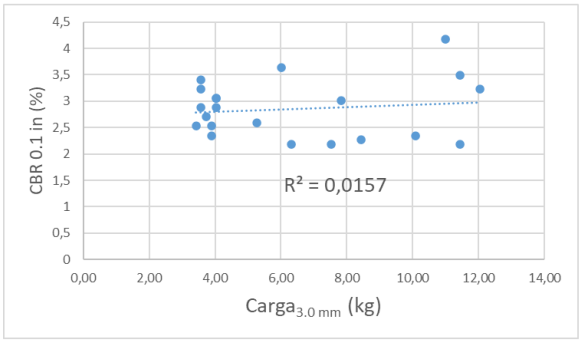

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0121
Carga1.5 mm (kg)

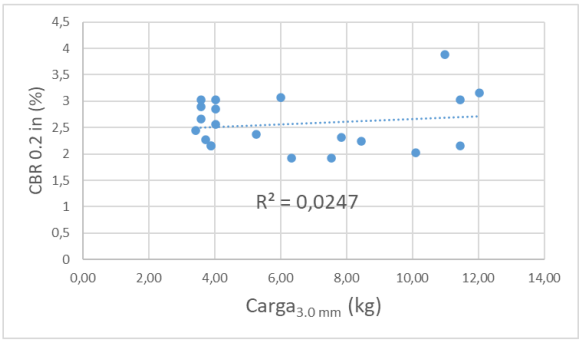

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,011
Carga2.0 mm (kg)

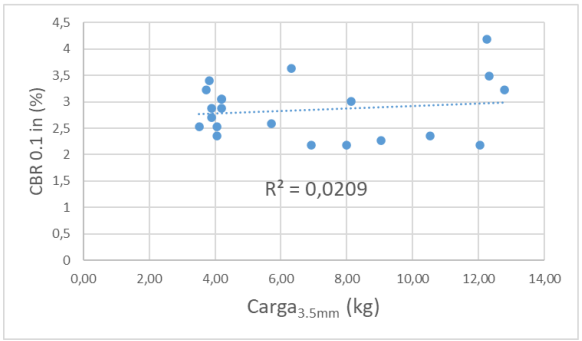

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0168
Carga2.0 mm (kg)

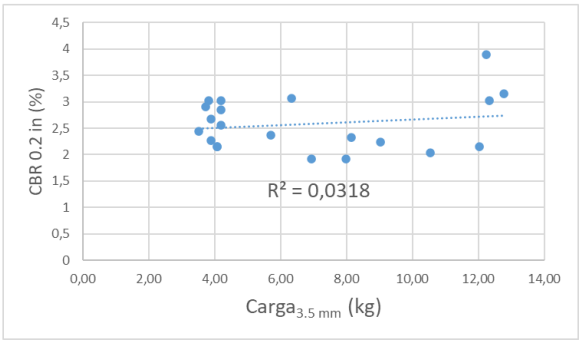

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0139
Carga2.5 mm (kg)

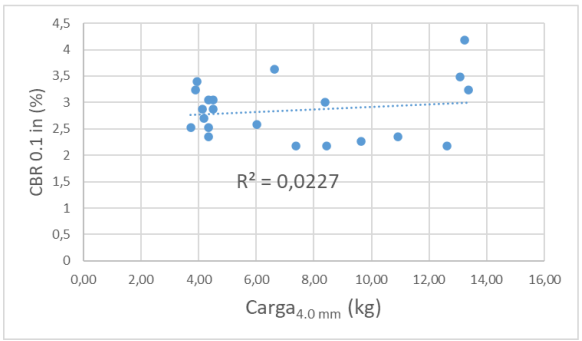

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0208
Carga2.5 mm (kg)

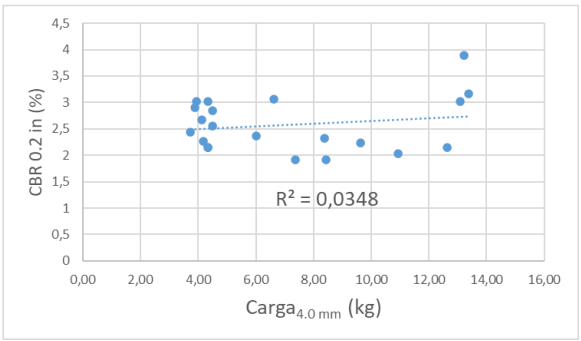

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0157
Carga3.0 mm (kg)

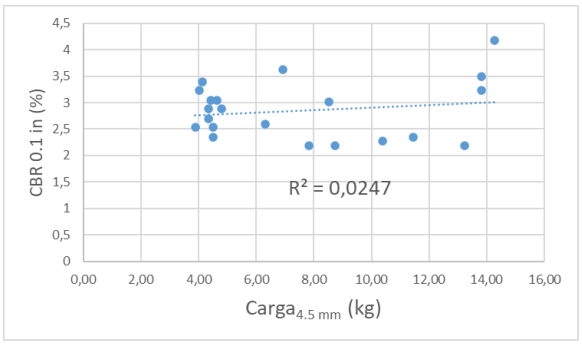

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0247
Carga3.0 mm (kg)

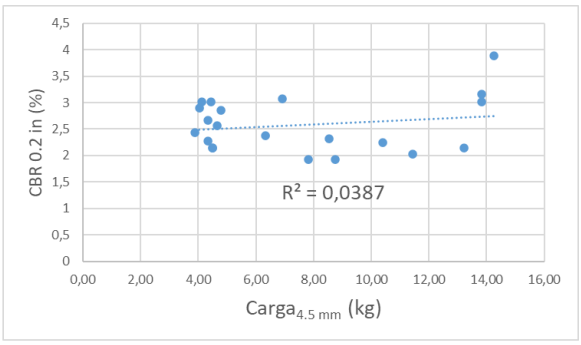

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0209
Carga3.5mm (kg)

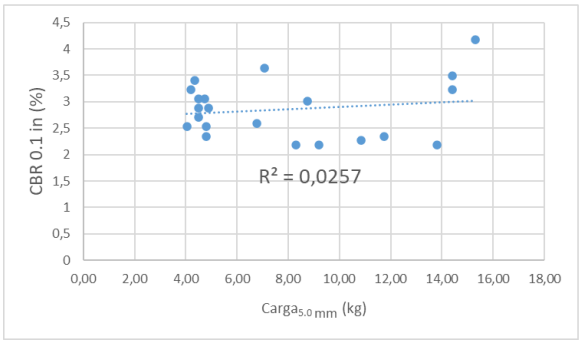

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0318
Carga3.5 mm (kg)

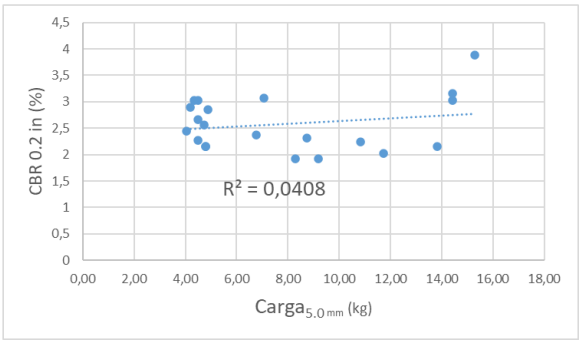

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0227
Carga4.0 mm (kg)


CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0348
Carga4.0 mm (kg)

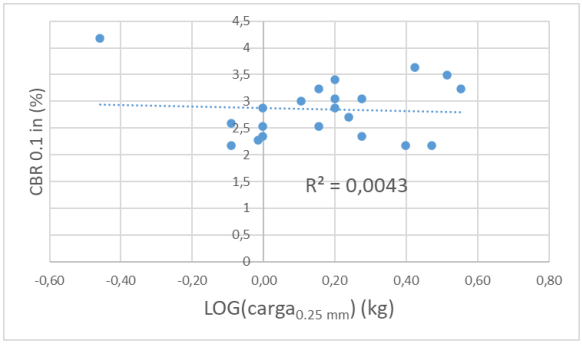


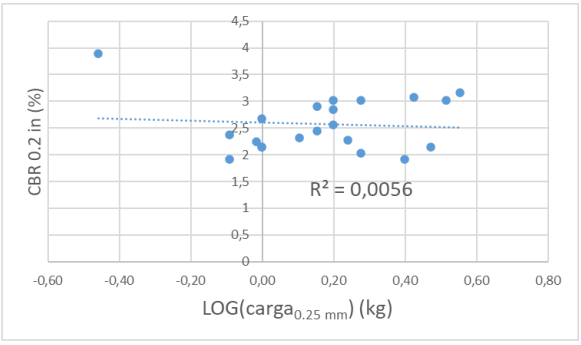


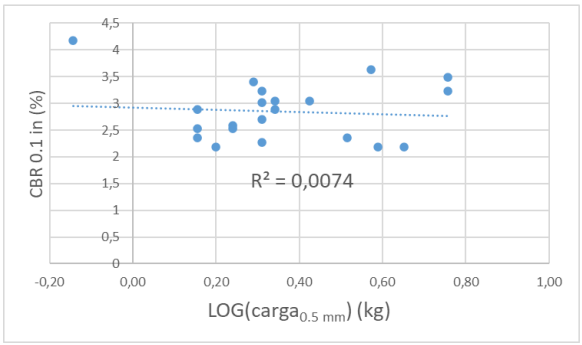


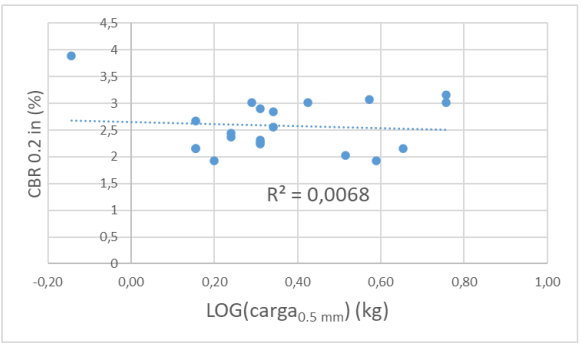


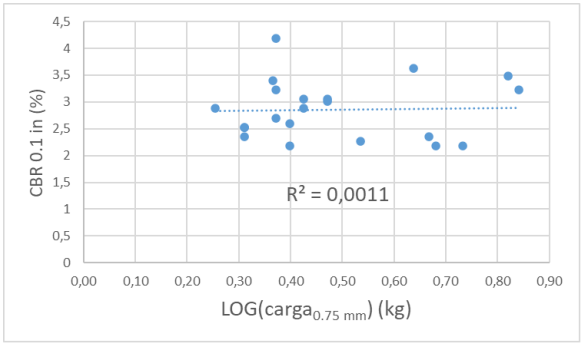
LOG (Carga Mini-CBR) Vs. CBR

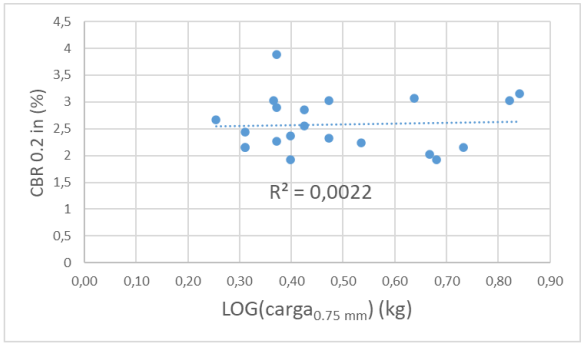


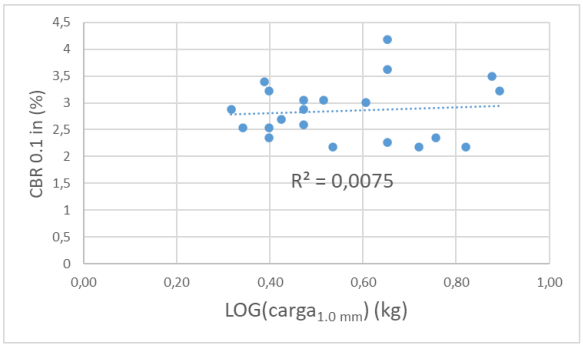


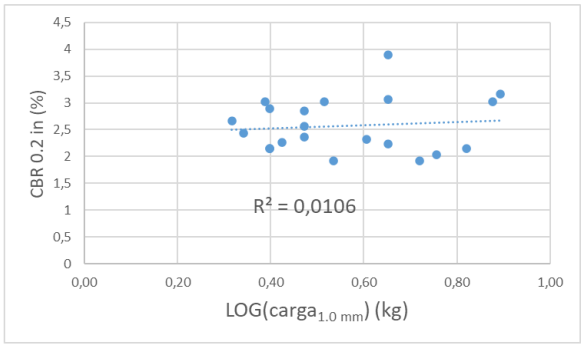


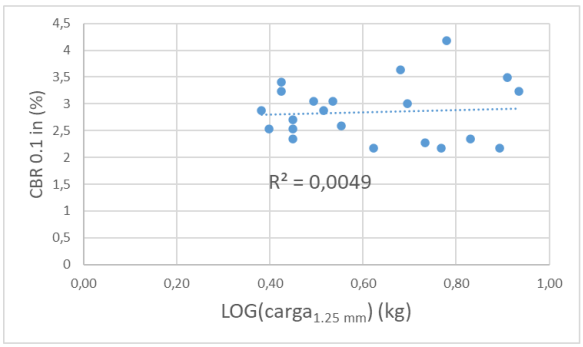


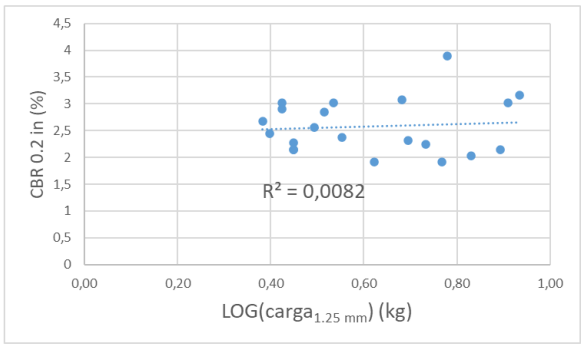

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0011
LOG(carga0.75 mm) (kg)

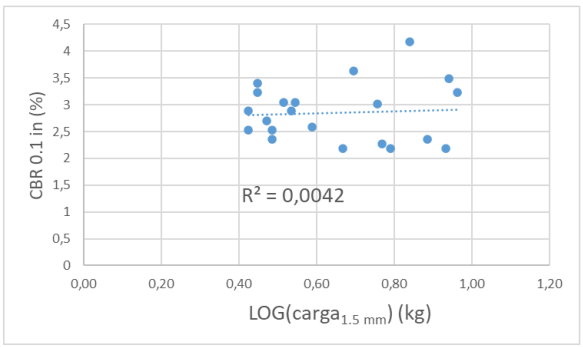

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0022
LOG(carga0.75 mm) (kg)

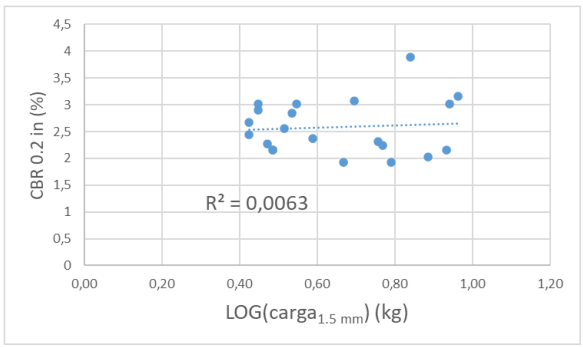

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0075
LOG(carga1.0 mm) (kg)

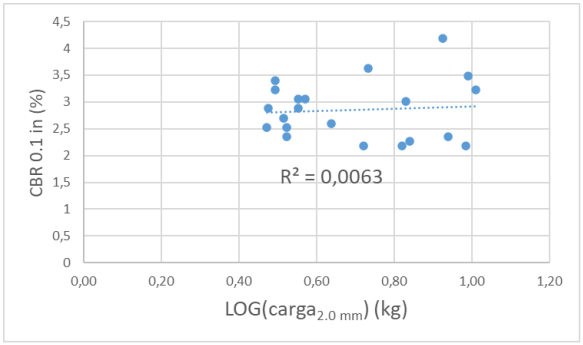

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0106
LOG(carga1.0 mm) (kg)

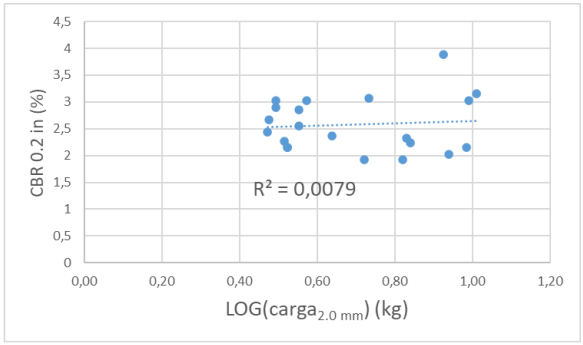

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0049
LOG(carga1.25 mm) (kg)

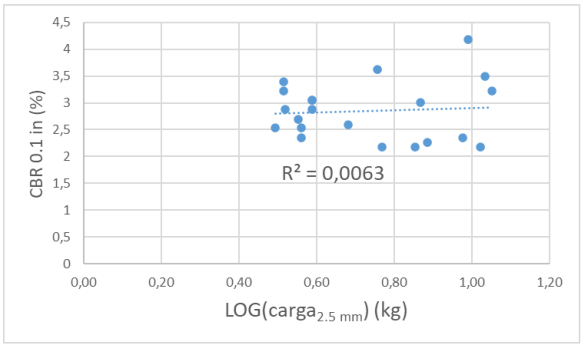

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0082
LOG(carga1.25 mm) (kg)

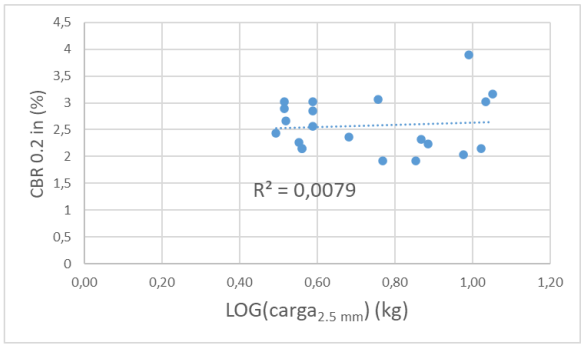

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0042
LOG(carga1.5 mm) (kg)

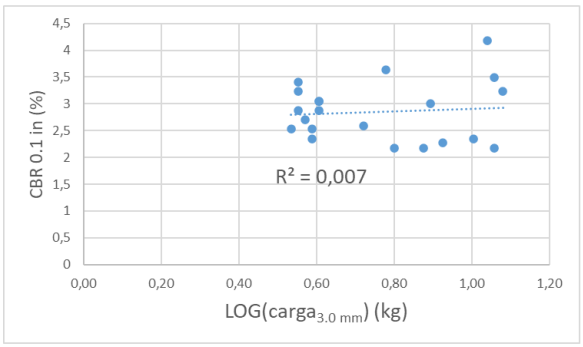

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0063
LOG(carga1.5 mm) (kg)

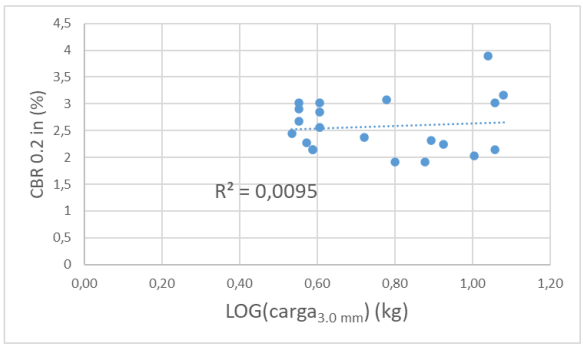

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0063
LOG(carga2.0 mm) (kg)

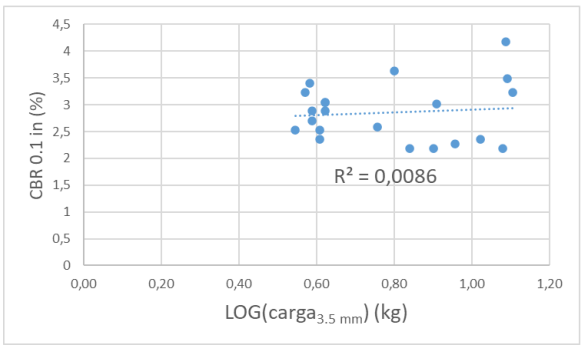

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0079
LOG(carga2.0 mm) (kg)

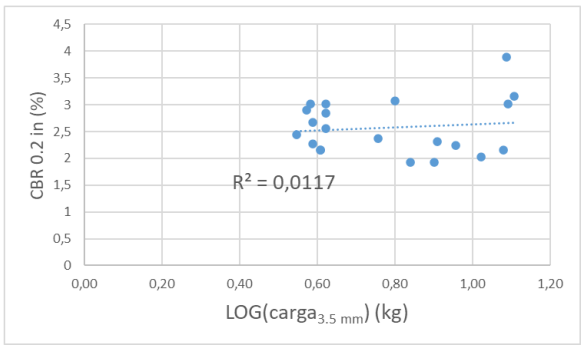

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0063
LOG(carga2.5 mm) (kg)

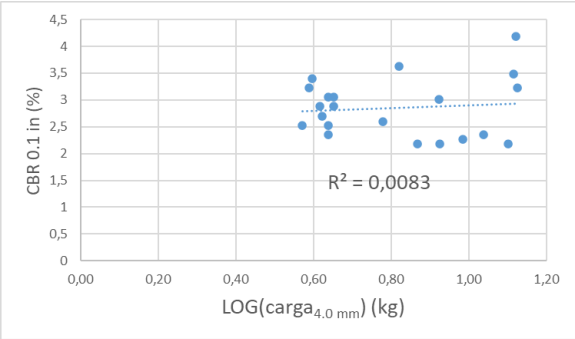

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0079
LOG(carga2.5 mm) (kg)

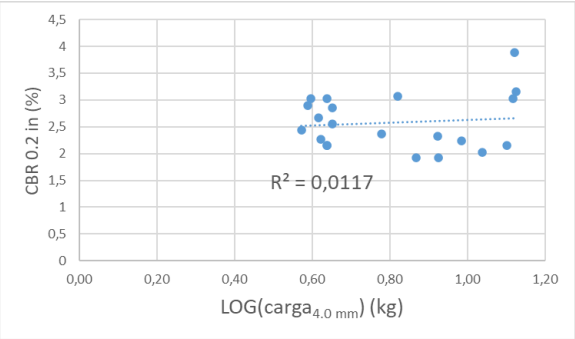

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,007
LOG(carga3.0 mm) (kg)

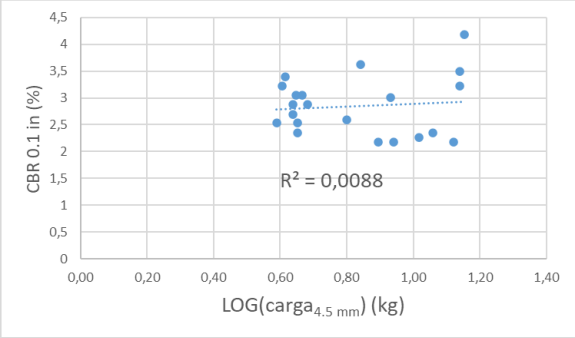

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0095
LOG(carga3.0 mm) (kg)

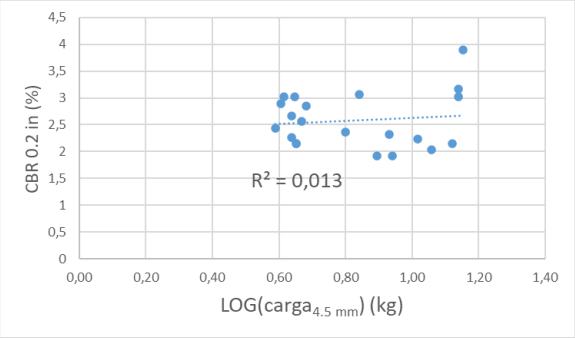

CBR 0.1 in (%)
R² = 0,0086
LOG(carga3.5 mm) (kg)

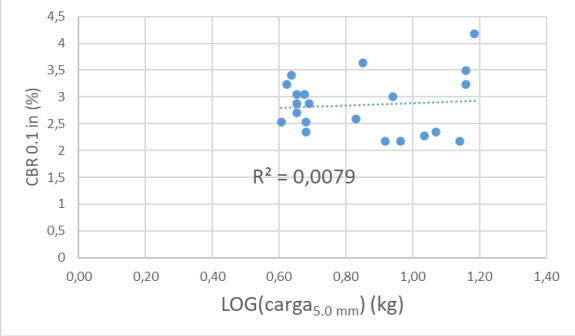

CBR 0.2 in (%)
R² = 0,0117
LOG(carga3.5 mm) (kg)

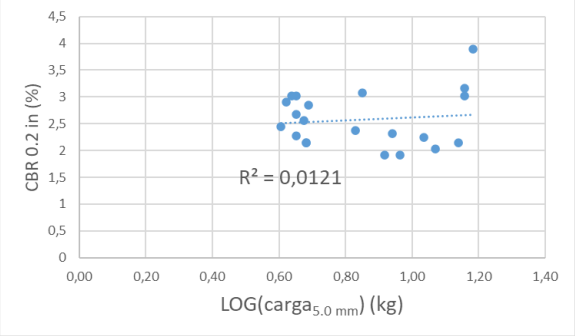




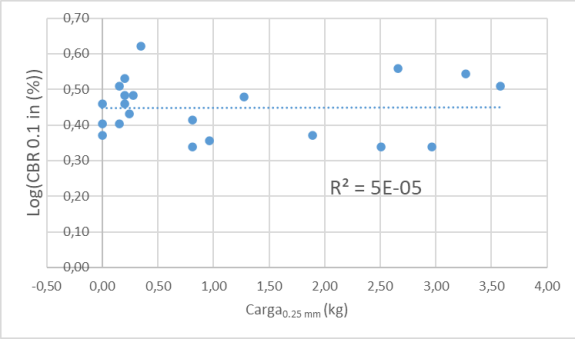


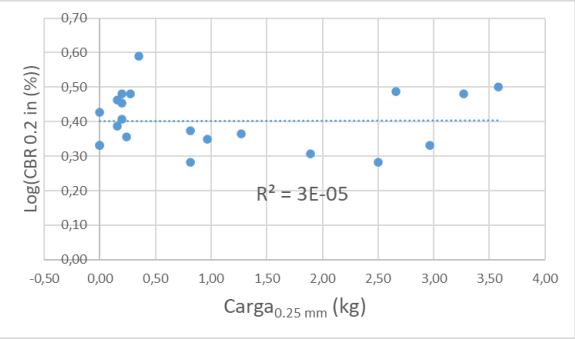


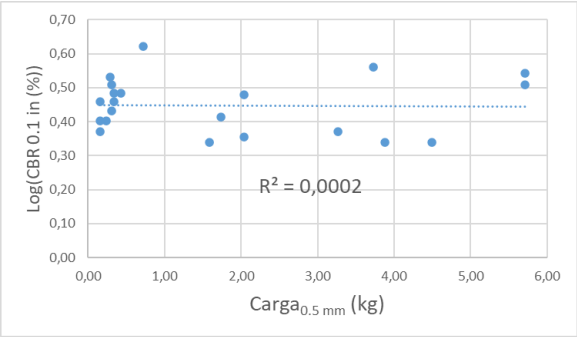


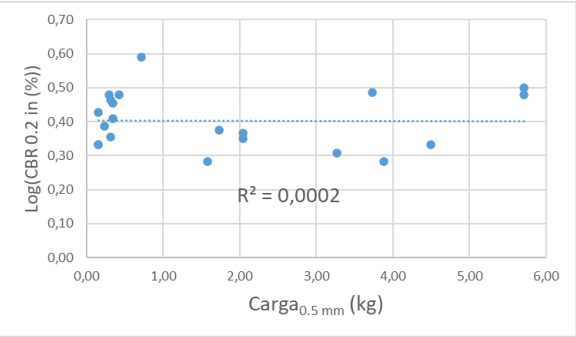


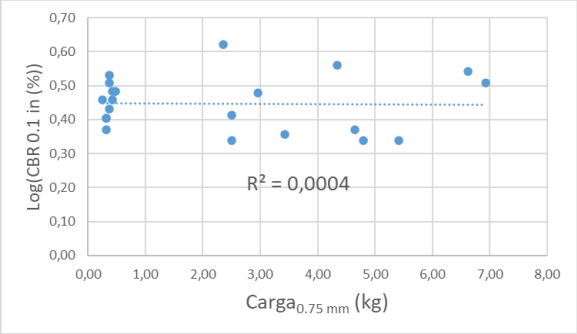
Carga Mini-CBR Vs. LOG (CBR)

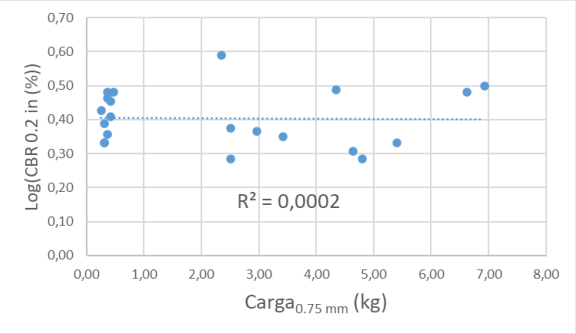


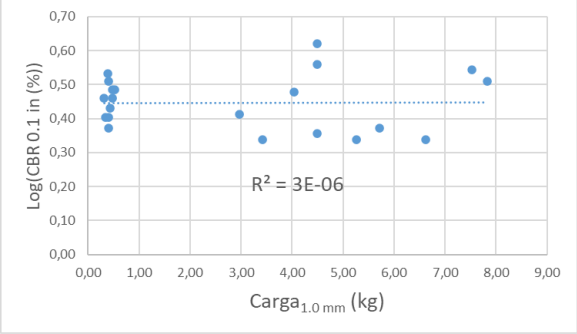


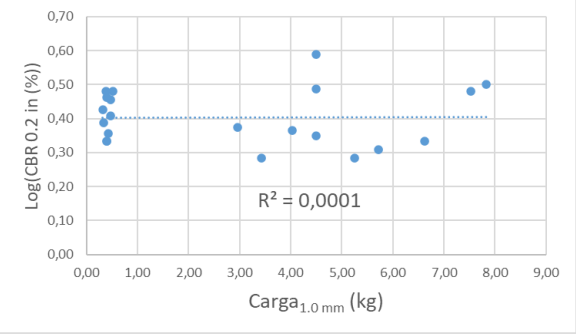

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00
R² = 0,0002
Carga0.5 mm (kg)

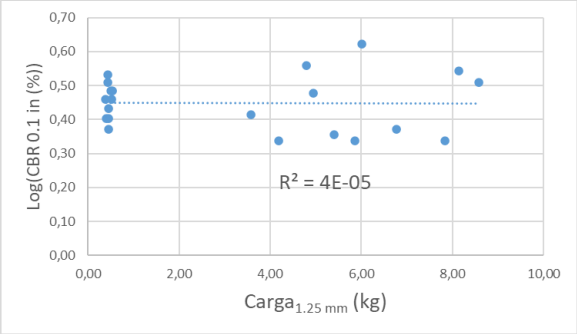

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00
R² = 0,0002
Carga0.5 mm (kg)

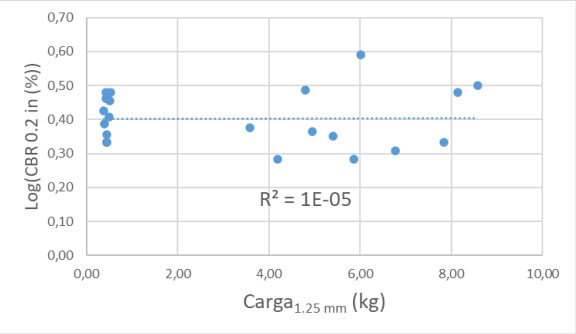

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00
R² = 0,0004
Carga0.75 mm (kg)

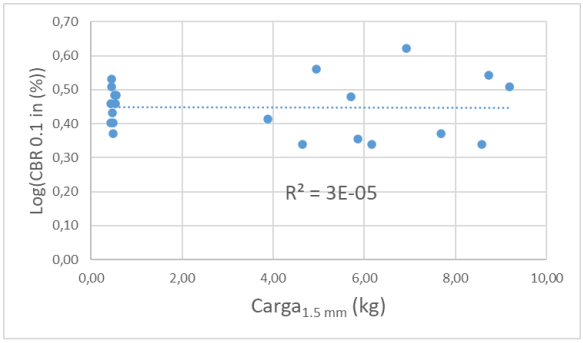

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00
R² = 0,0002
Carga0.75 mm (kg)

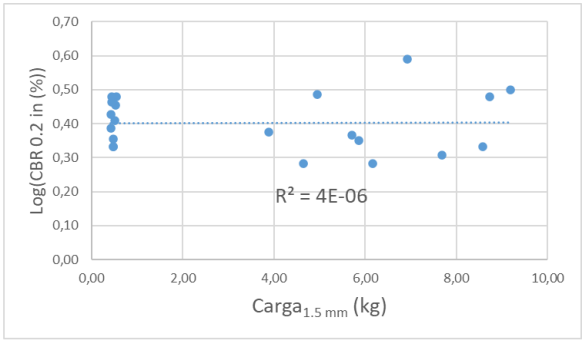

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00 9,00
R² = 3E-06
Carga1.0 mm (kg)

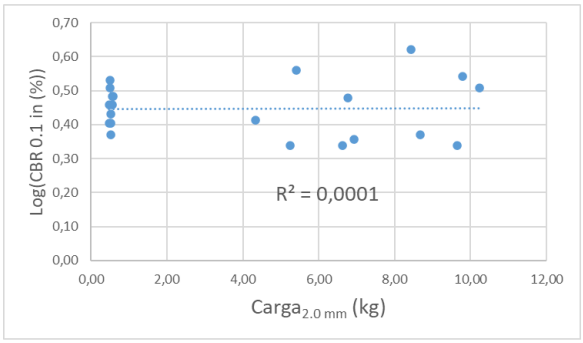

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00 9,00
R² = 0,0001
Carga1.0 mm (kg)

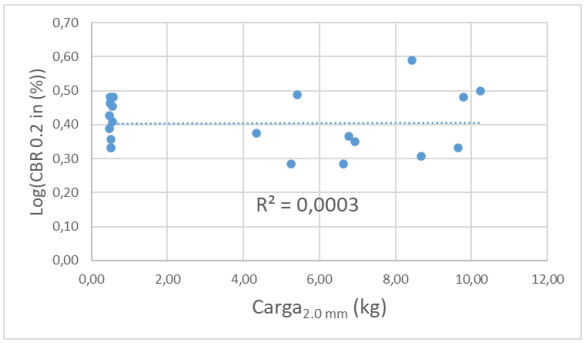

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00
R² = 4E-05
Carga1.25 mm (kg)

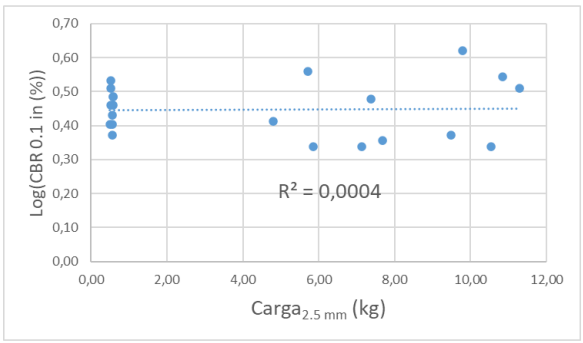

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00
R² = 1E-05
Carga1.25 mm (kg)

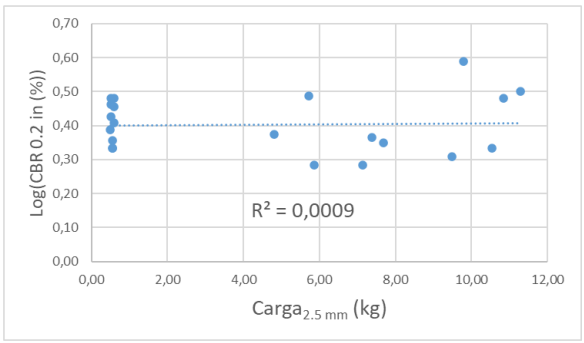

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
R² = 3E-05
Carga1.5 mm (kg)

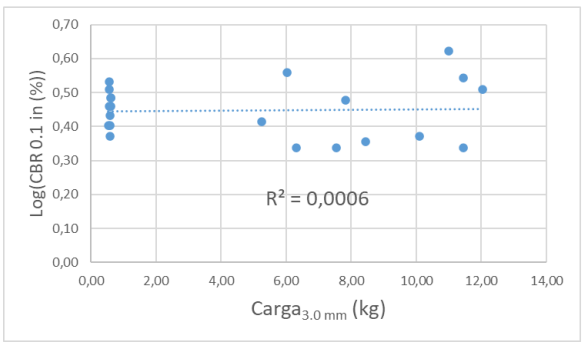

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
R² = 4E-06
Carga1.5 mm (kg)

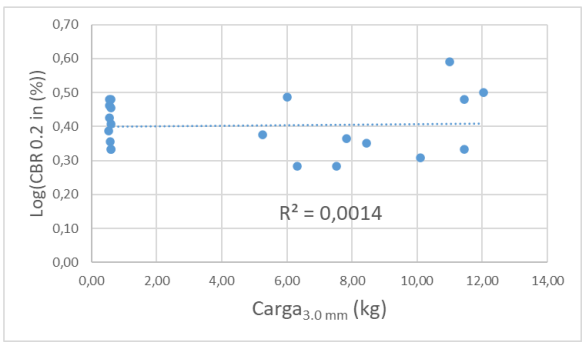

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
R² = 0,0001
Carga2.0 mm (kg)

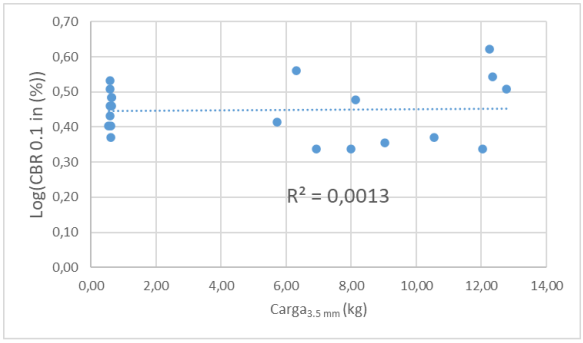

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
R² = 0,0003
Carga2.0 mm (kg)

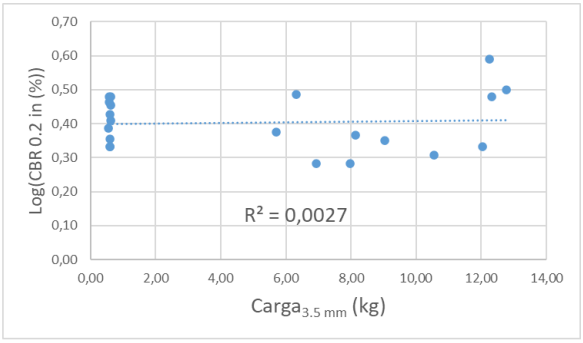

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
R² = 0,0004
Carga2.5 mm (kg)

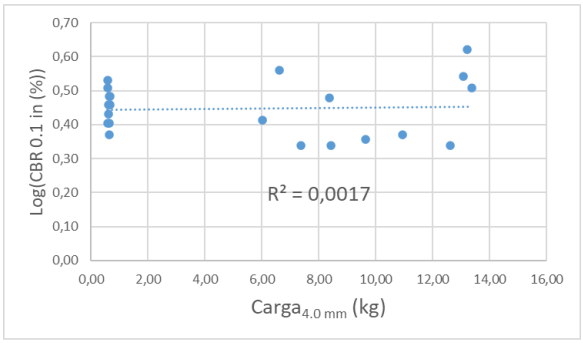

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
R² = 0,0009
Carga2.5 mm (kg)

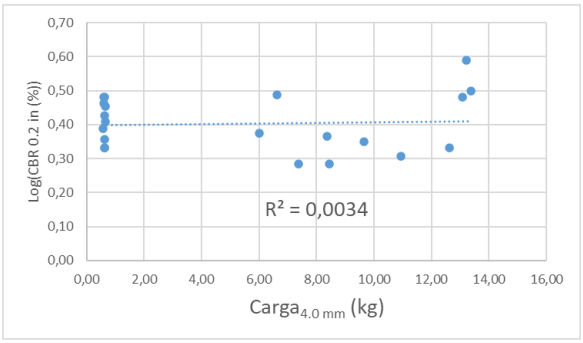

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
14,00
R² = 0,0006
Carga3.0 mm (kg)

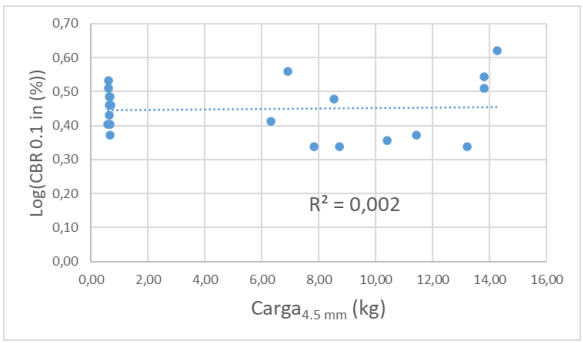

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
8,00
10,00
12,00
14,00
R² = 0,0014
Carga3.0 mm (kg)

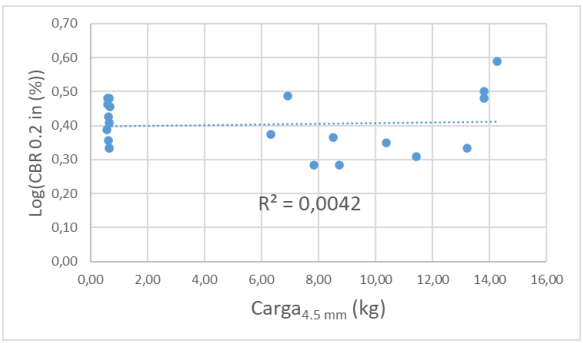

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00
R² = 0,0013
Carga3.5 mm (kg)

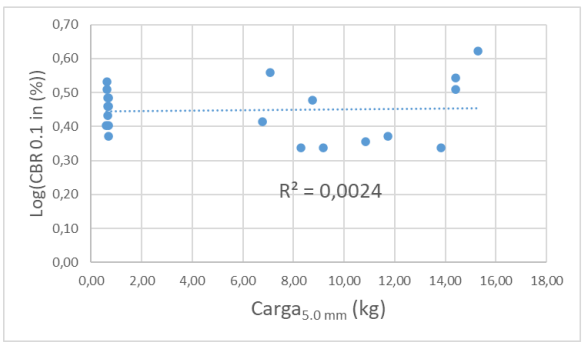

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00
R² = 0,0027
Carga3.5 mm (kg)

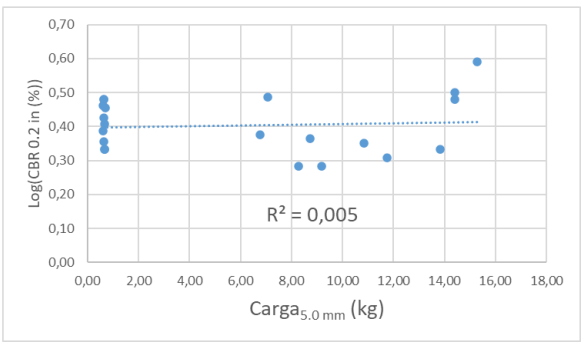

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00
R² = 0,0017
Carga4.0 mm (kg)


Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00
R² = 0,0034
Carga4.0 mm (kg)


Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00
R² = 0,002
Carga4.5 mm (kg)

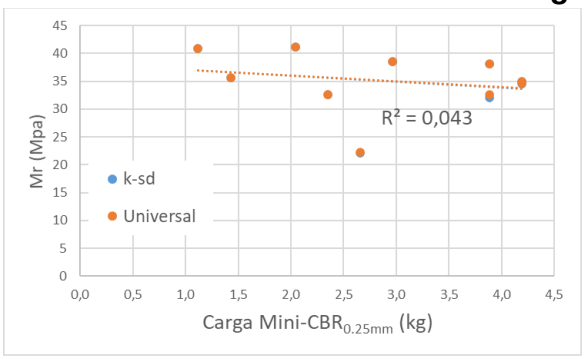

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00
R² = 0,0042
Carga4.5 mm (kg)

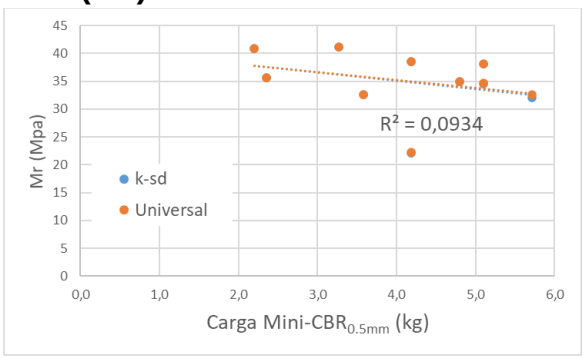

Log(CBR 0.1 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00 18,00
R² = 0,0024
Carga5.0 mm (kg)

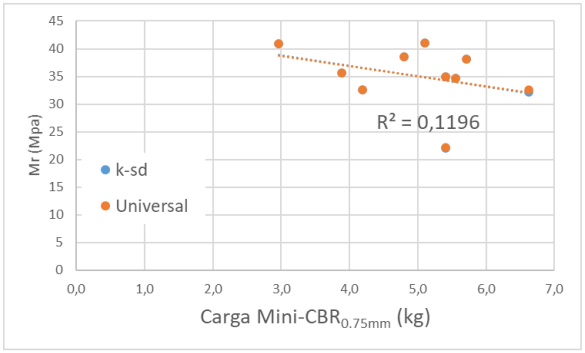

Log(CBR 0.2 in (%))
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00 2,00 4,00 6,00 8,00 10,00 12,00 14,00 16,00 18,00
R² = 0,005
Carga5.0 mm (kg)

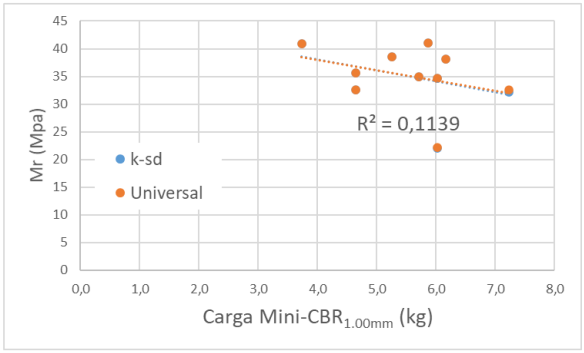
Comparación cargas Mini-CBR Vs. $Mr_{95\%}$

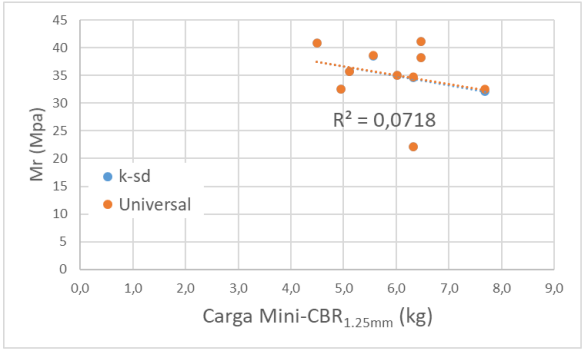
Muestras Escuela Colombiana de Ingeniería (CH)

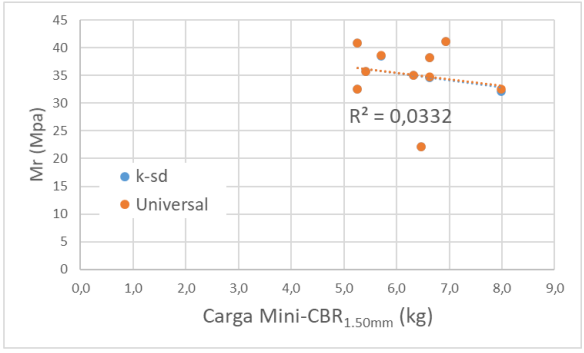


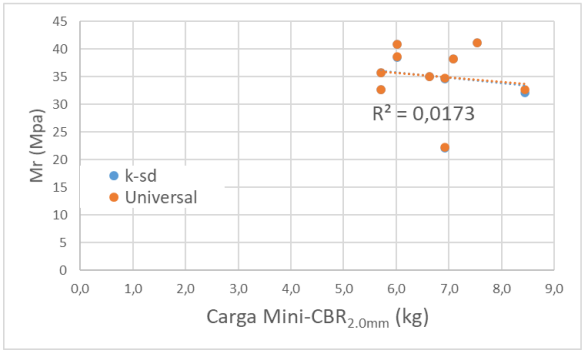


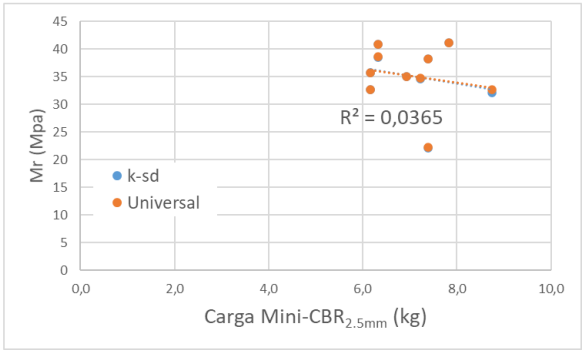


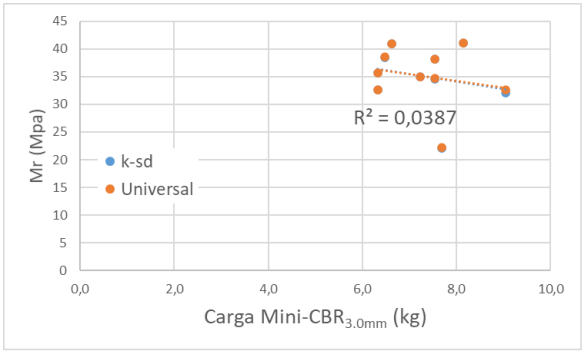


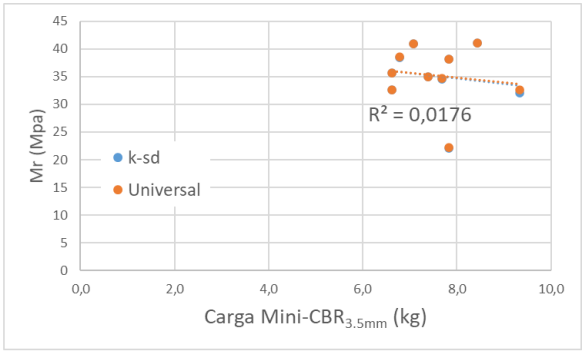


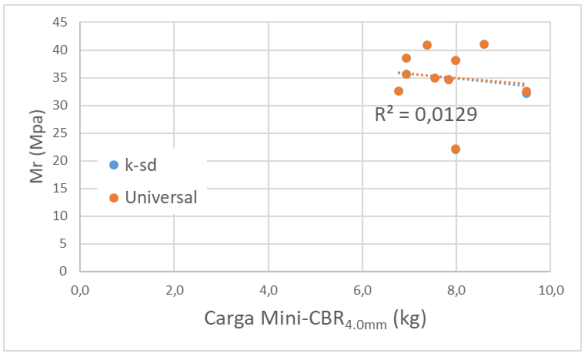


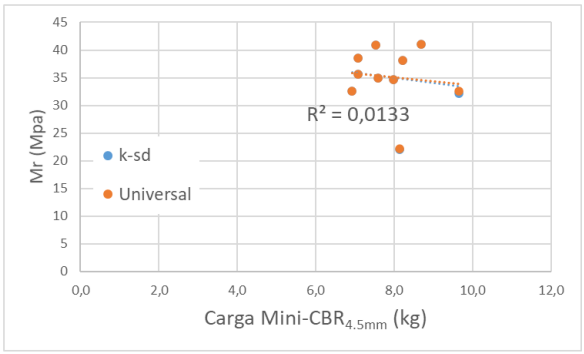


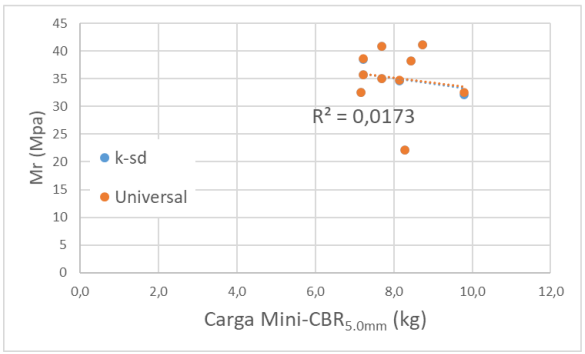




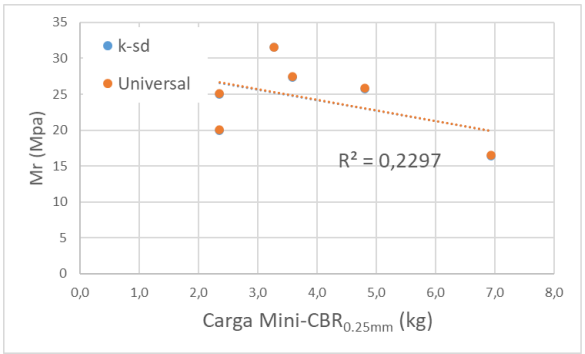


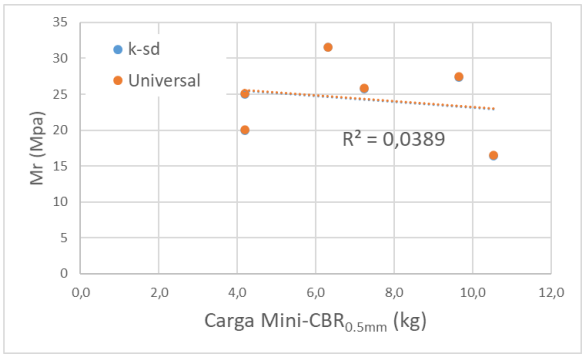


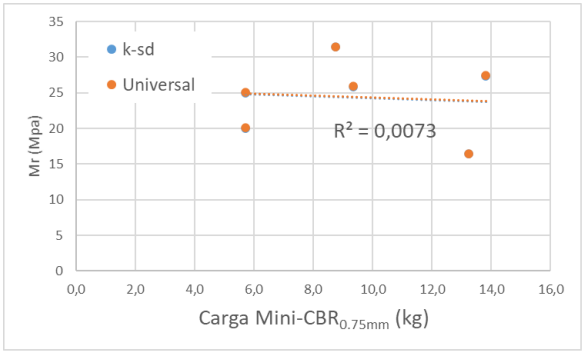


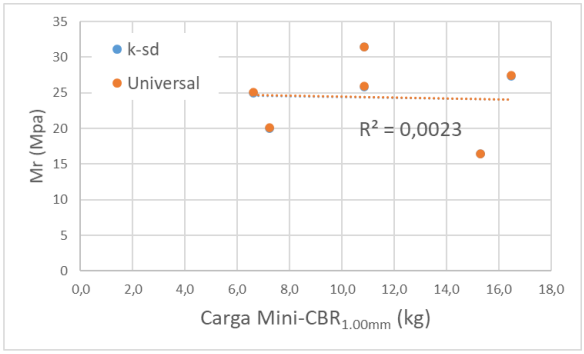


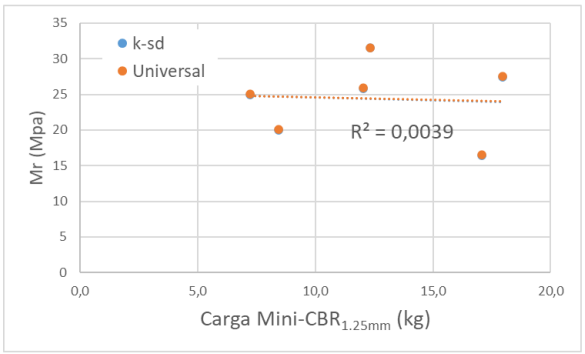
Muestras San José de Bavaria (MH)

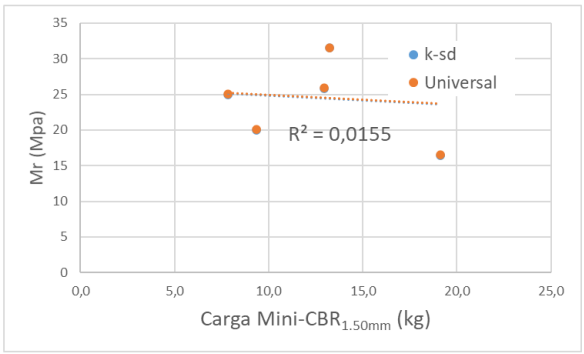


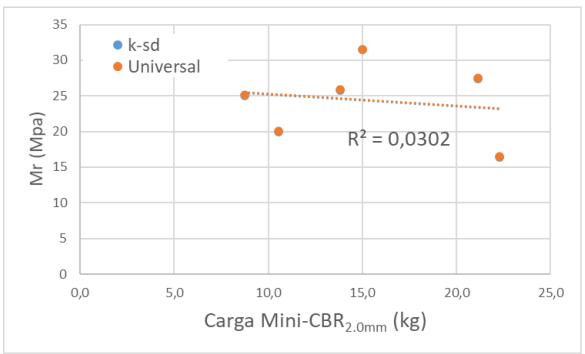


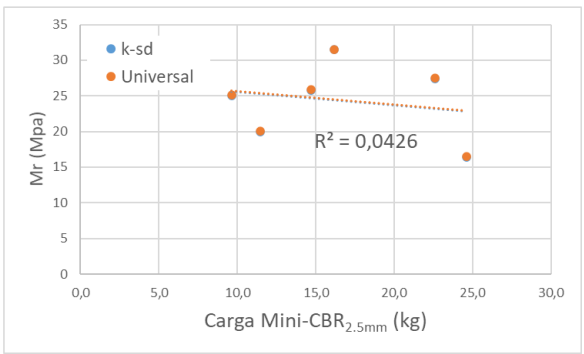

k-sd
Universal
R² = 0,0073
Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR0.75mm (kg)

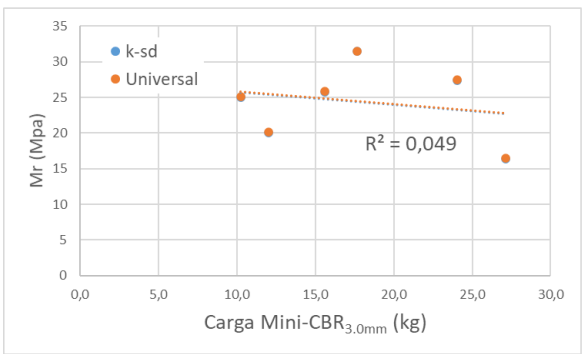

k-sd
Universal
R² = 0,0023
Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR1.00mm (kg)

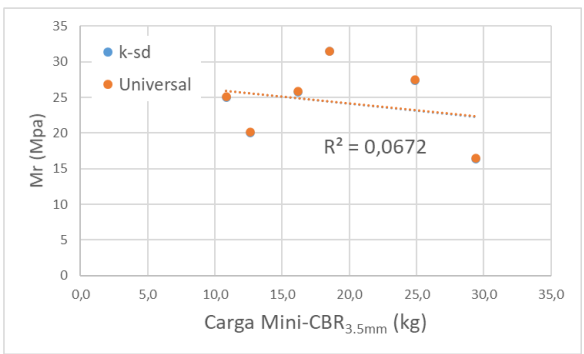

k-sd
Universal
R² = 0,0039
Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR1.25mm (kg)

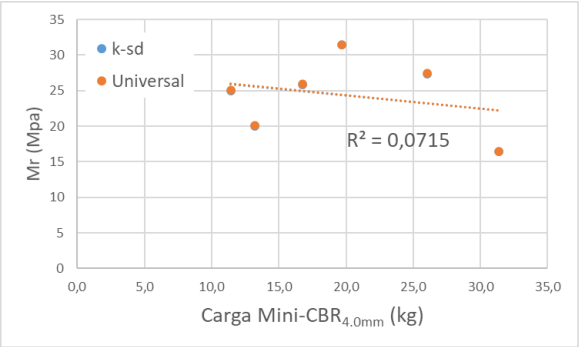

k-sd
Universal
R² = 0,0155
Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR1.50mm (kg)

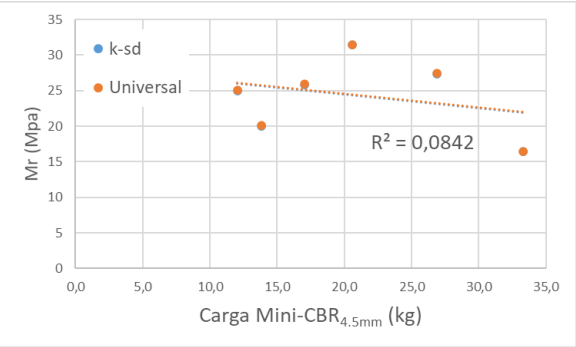

k-sd
Universal
R² = 0,0302
Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR2.0mm (kg)

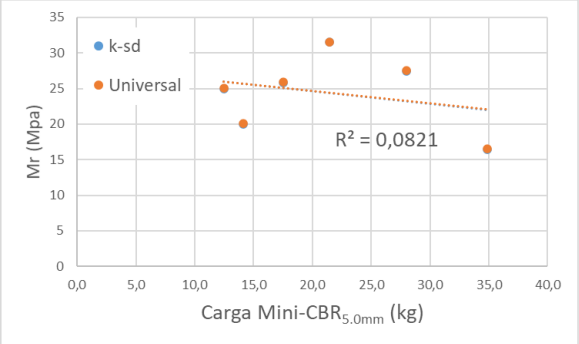

k-sd
Universal
R² = 0,0426
Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR2.5mm (kg)


k-sd
Universal
R² = 0,049
Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR3.0mm (kg)

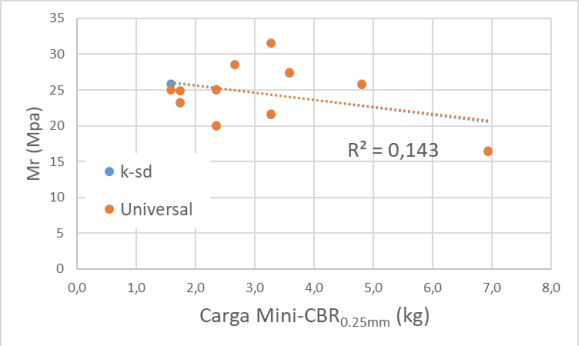

k-sd
Universal
R² = 0,0672
Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR3.5mm (kg)

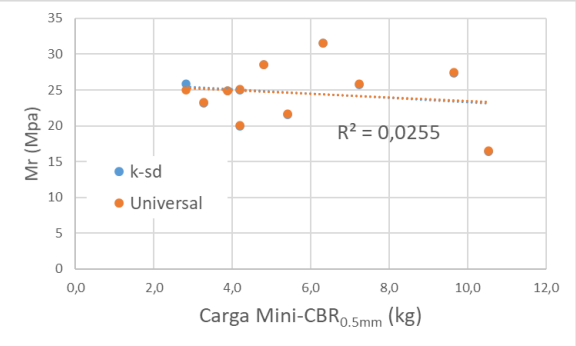


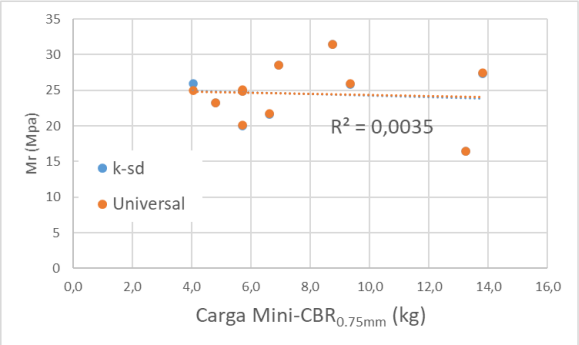


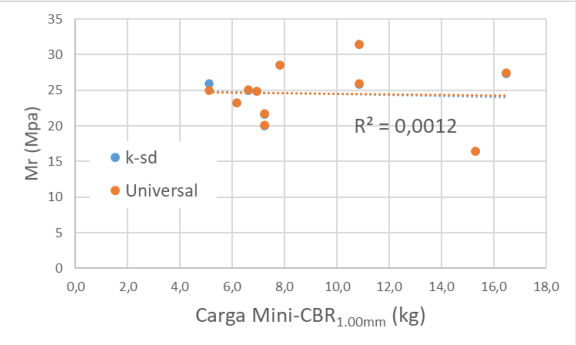


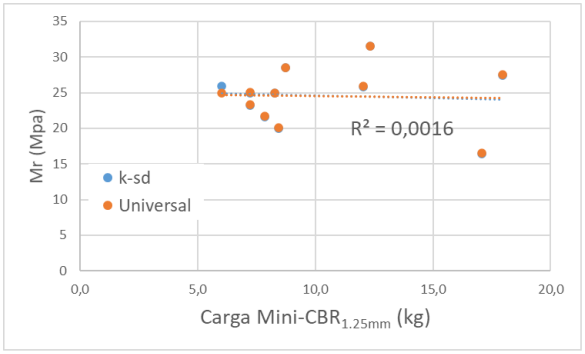
Muestras Limos de alta compresibilidad (MH)

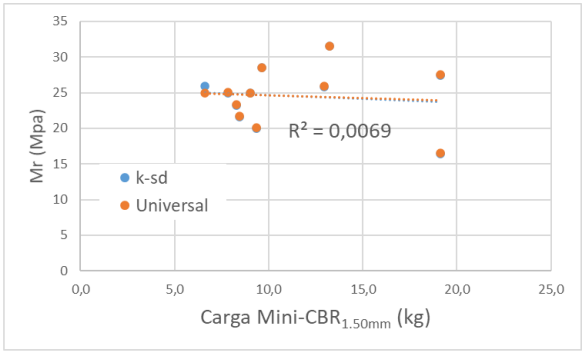


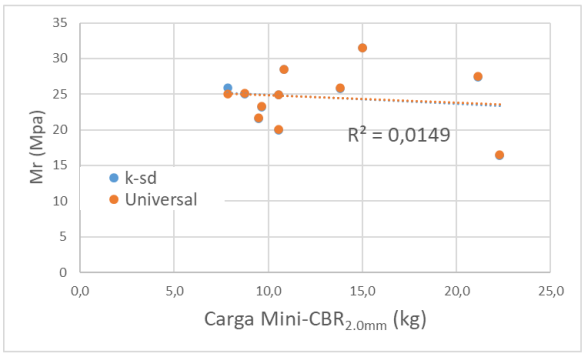


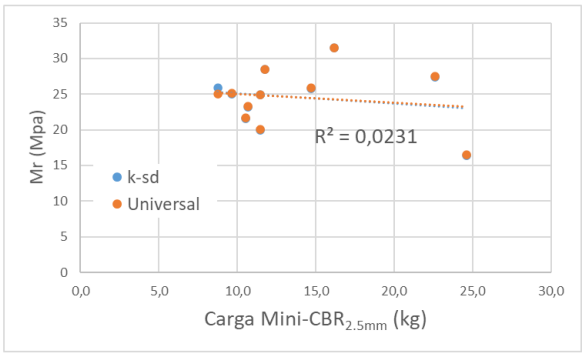


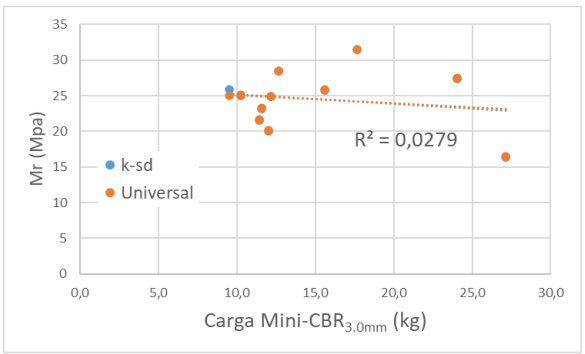


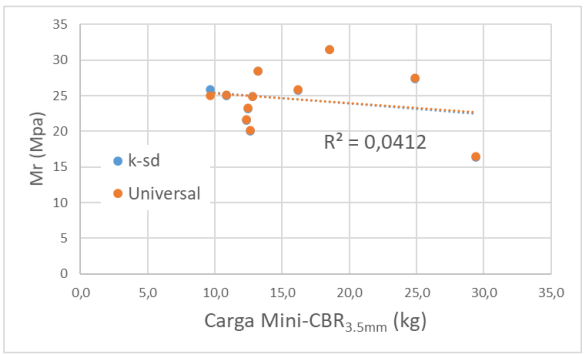

Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR1.25mm (kg)
R² = 0,0016
k-sd
Universal

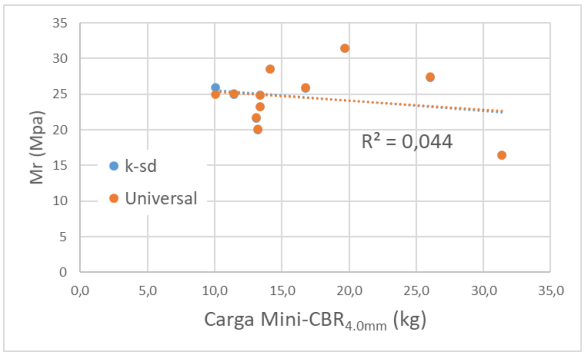

Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR1.50mm (kg)
R² = 0,0069
k-sd
Universal

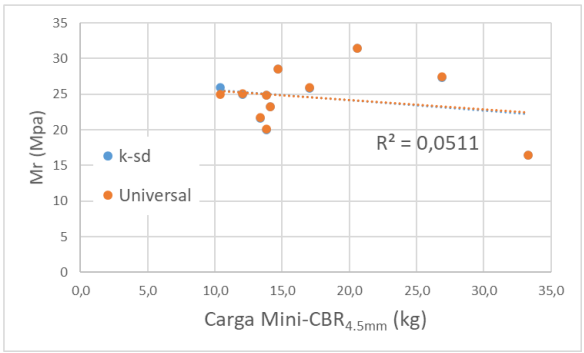

Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR2.0mm (kg)
R² = 0,0149
k-sd
Universal

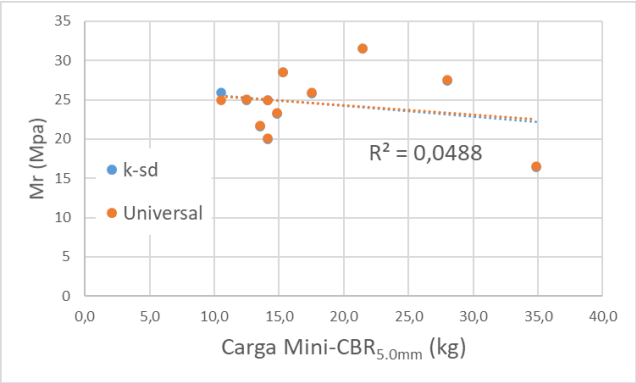

Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR2.5mm (kg)
R² = 0,0231
k-sd
Universal


Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR3.0mm (kg)
R² = 0,0279
k-sd
Universal

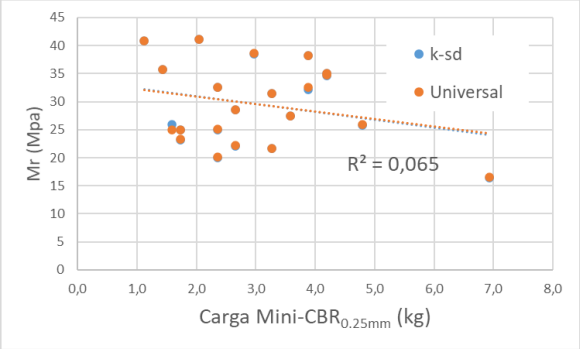

Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR3.5mm (kg)
R² = 0,0412
k-sd
Universal

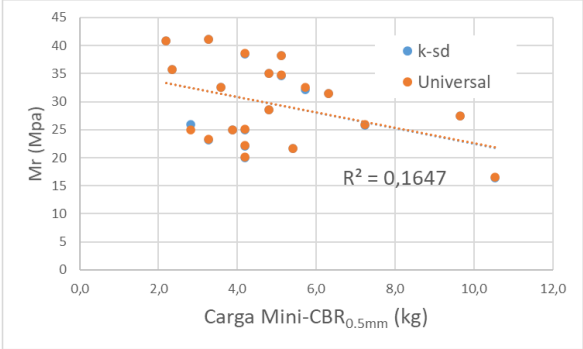

Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR4.0mm (kg)
R² = 0,044
k-sd
Universal

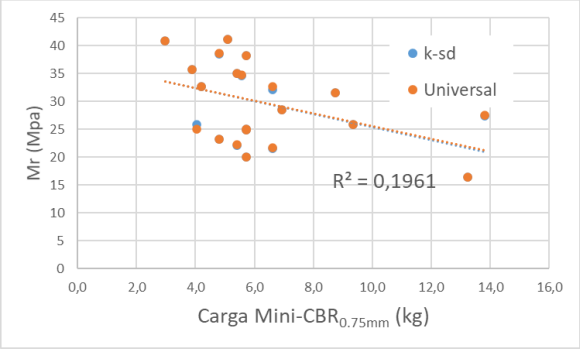

Mr (Mpa)
Carga Mini-CBR4.5mm (kg)
R² = 0,0511
k-sd
Universal

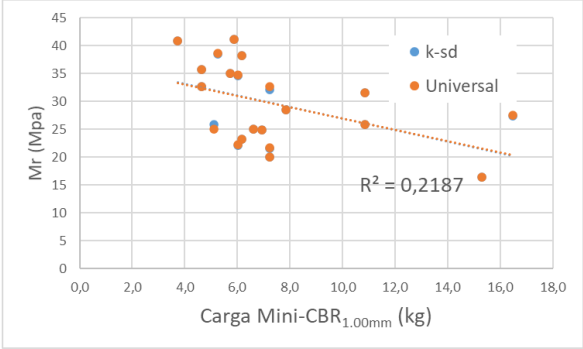


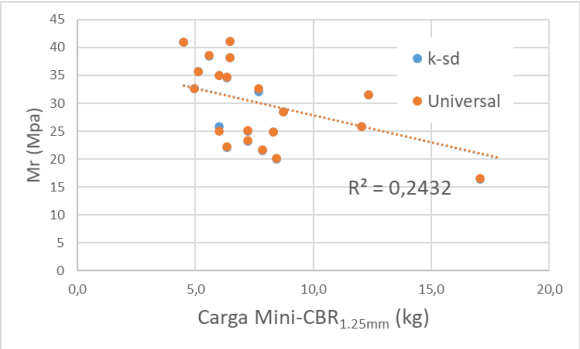
Todas las muestras (MH y CH)

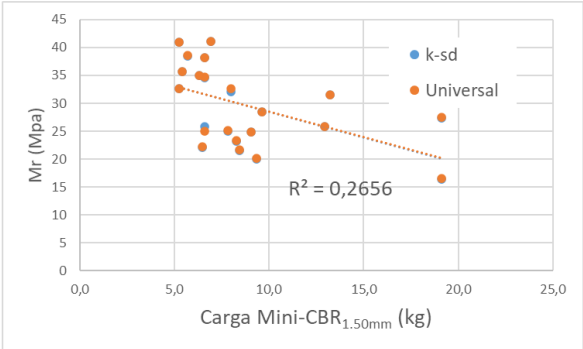


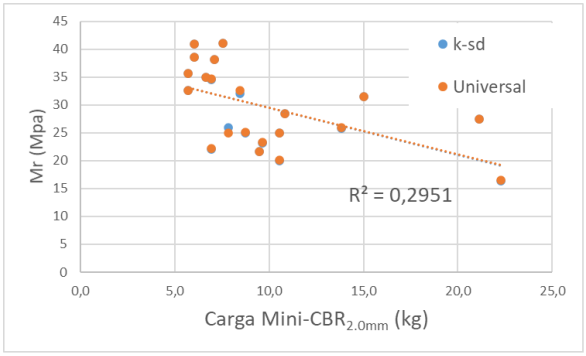


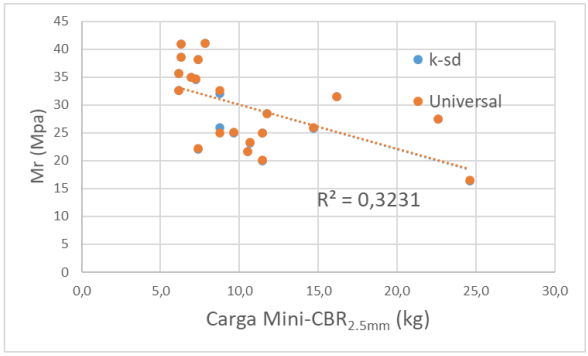


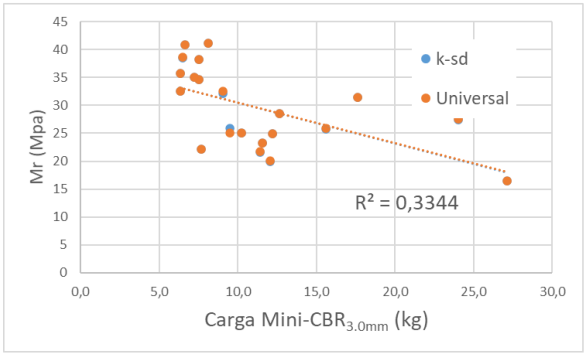


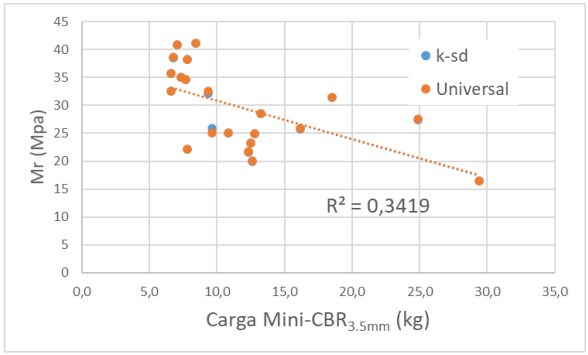


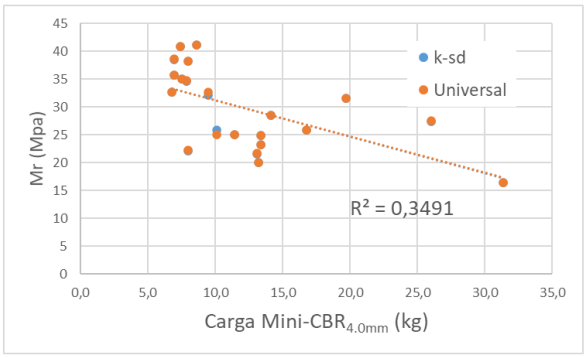


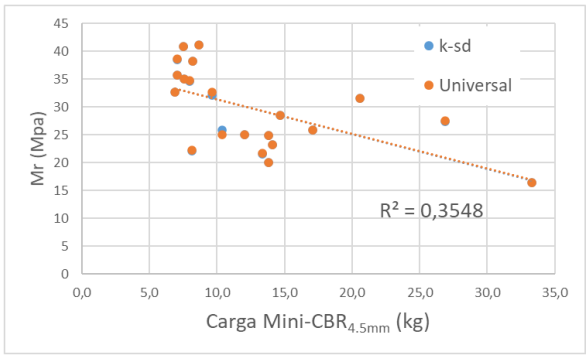

Mr (Mpa)
k-sd
Universal
R² = 0,2951
Carga Mini-CBR2.0mm (kg)

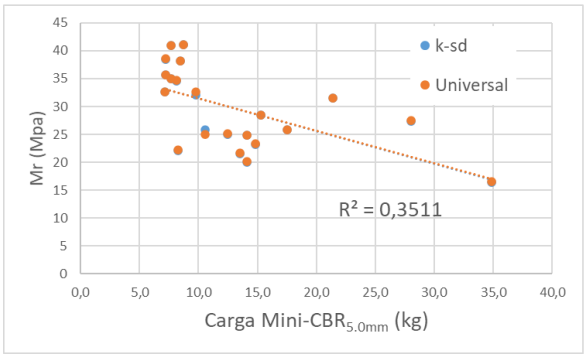

Mr (Mpa)
k-sd
Universal
R² = 0,3231
Carga Mini-CBR2.5mm (kg)


Mr (Mpa)
k-sd
Universal
R² = 0,3344
Carga Mini-CBR3.0mm (kg)


Mr (Mpa)
k-sd
Universal
R² = 0,3419
Carga Mini-CBR3.5mm (kg)


Mr (Mpa)
k-sd
Universal
R² = 0,3491
Carga Mini-CBR4.0mm (kg)


Mr (Mpa)
k-sd
Universal
R² = 0,3548
Carga Mini-CBR4.5mm (kg)


Mr (Mpa)
k-sd
Universal
R² = 0,3511
Carga Mini-CBR5.0mm (kg)

ANEXO 5: Guía para el desarrollo del ensayo Mini-CBR.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Laboratorio de Suelos y Pavimentos

Ensayo de Mini-CBR sobre muestra inalterada

1. OBJETO

1.1 Esta guía describe el procedimiento de ensayo para la determinación de la Relación de Soporte de California (CBR) a partir del ensayo Mini-CBR.

1.2 Este método de prueba se emplea para evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante de estructuras de pavimento. El valor de CBR correlacionado de esta prueba es un insumo de varios métodos de diseño de pavimentos.

2. RESUMEN DEL MÉTODO

Se penetra con un pistón de diámetro conocido y a una velocidad estándar, a un espécimen de ensayo que se encuentra dentro de un molde con unas medidas prestablecidas y sometido a una sobrecarga estándar.

Se mide la carga necesaria para lograr en la muestra unas penetraciones establecidas y a partir de esa carga se calcula el CBR.

3. IMPORTANCIA Y USO

3.1 El ensayo proporciona una relación básica entre el esfuerzo y la deformación de los materiales bajo una carga estática.

3.2 Proporciona una alternativa más rápida y con menor cantidad de muestra para la determinación del CBR comparado con el ensayo tradicional.

3.3 El ensayo solamente presenta correlaciones aceptables para las arcillas de alta compresibilidad de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

4. EQUIPO

4.1 Equipo para la inmersión que consta de una base metálica perforada con 4 varillas que conectan a la tapa, una tapa metálica hueca para asegurar la base, una placa perforada con barra central para colocar la sobrecarga (ver Figura 1 a Figura 5).

4.2 Pistón en acero de 16mm de diámetro y penetración mínima de 15cm, acoplable a un anillo dinamométrico o dispositivo equivalente que permita mantener la verticalidad durante el ensayo. (Figura 7)

4.3 Cronómetro

4.4 Prensa similar a la del ensayo CBR compuesta de:

4.4.1 Marco de engranaje con velocidad variable, acompañado de un plato reforzado ajustable al marco.

4.4.2 Conjunto dinamométrico constituido por: anillo de acero con dimensiones compatibles con la carga presentada, con dispositivo para fijar; extensómetro graduado en 0.01 mm fijo al centro del anillo para medir reducciones diametrales; pistón de penetración de acero.

4.4.3 Dispositivo para medición de penetración del pistón, dotado de un extensómetro que permita la lectura directa en 0.01mm y tacómetro, acoplable al pistón de penetración mediante un soporte como el presentado en la Figura 9.

4.5 Tanque de agua que satisfaga las siguientes condiciones:

4.5.1 Colocación del molde con la muestra y su respectivo armado en posición vertical.

4.5.2 Permita mantener una lámina de agua de 5 mm encima de la placa superior del armado.

4.5.3 Almacenamiento continuo de agua.

4.6 Sobrecarga anular, metálica, con diámetro externo de 49mm, alma central de 18mm de diámetro y masa de 500g, de acuerdo con la Figura 8.

4.7 Guía anular, metálica, de las mismas dimensiones de la sobrecarga.

4.8 Extractor de muestras en moldes de 50 mm de diámetro.

4.9 Horno capaz de mantener una temperatura de 110°C ± 5°C.

4.10 Balanza con capacidad de 1kg y sensibilidad de 0.1 g.

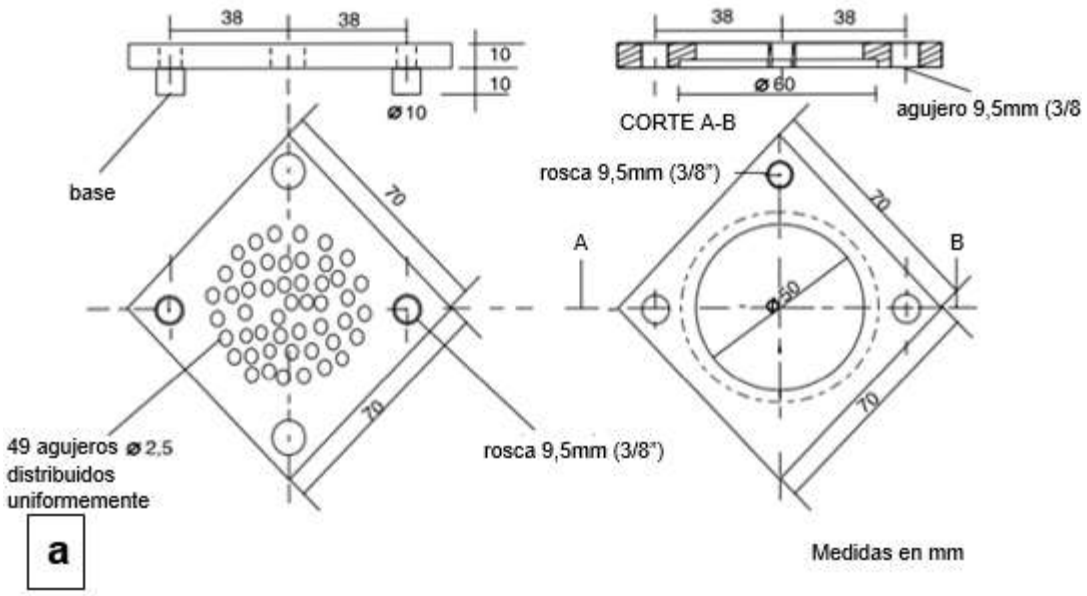


Figura 1: Base y tapa dispositivo miniatura para la inmersión de muestras. Adaptado de DNER 254 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

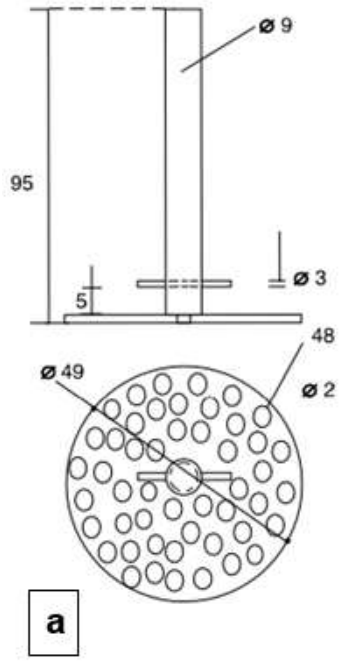


Figura 2: Placa perforada para sobrecarga dispositivo miniatura para la inmersión de muestras. Adaptado de DNER 254 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

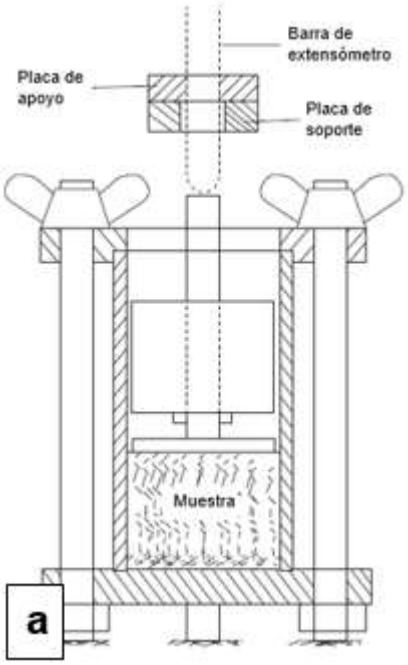


Figura 3: Montaje esquemático dispositivo miniatura para la inmersión de muestras. Adaptado de DNER 254 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

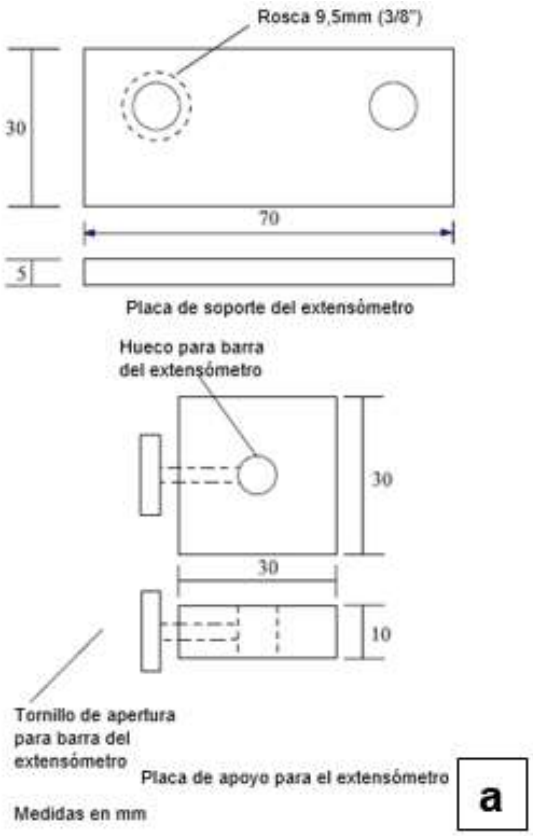


Figura 4: Placa de soporte y de apoyo del extensómetro para la inmersión de muestras. Adaptado de DNER 254 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

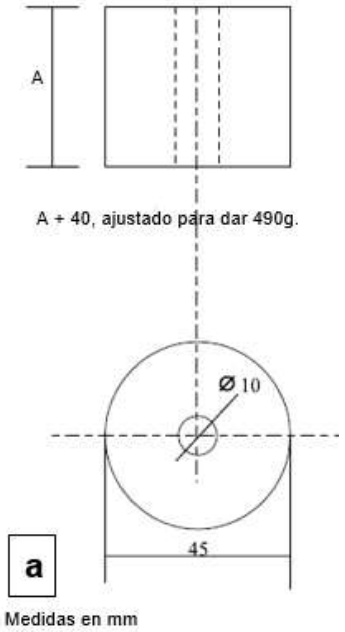


Figura 5: Sobrecarga anular para inmersión de 490g. Adaptado de DNER 254 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

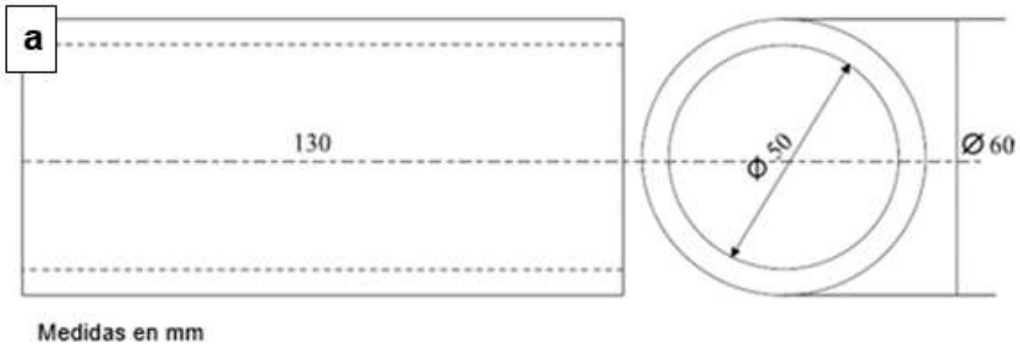


Figura 6: Molde Mini-CBR.

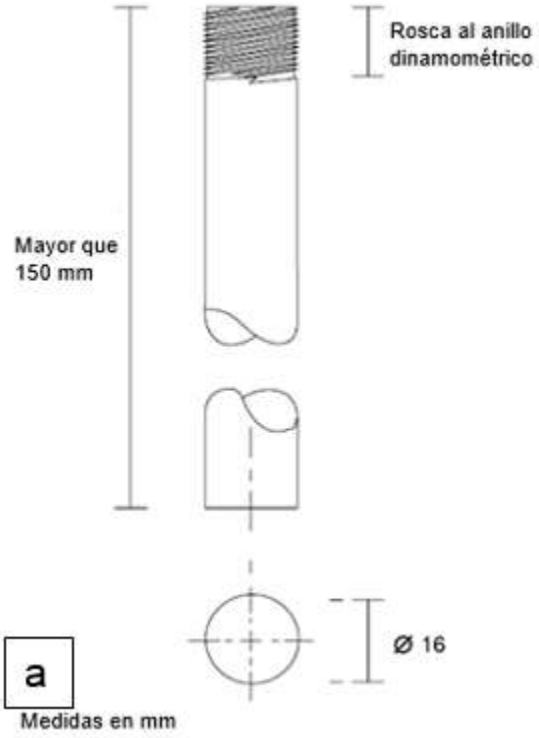


Figura 7: Pistón de penetración. Adaptado de DNER 254 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

Figura 8: Sobrecarga anular para ensayo de penetración. Adaptado de DNER 254 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

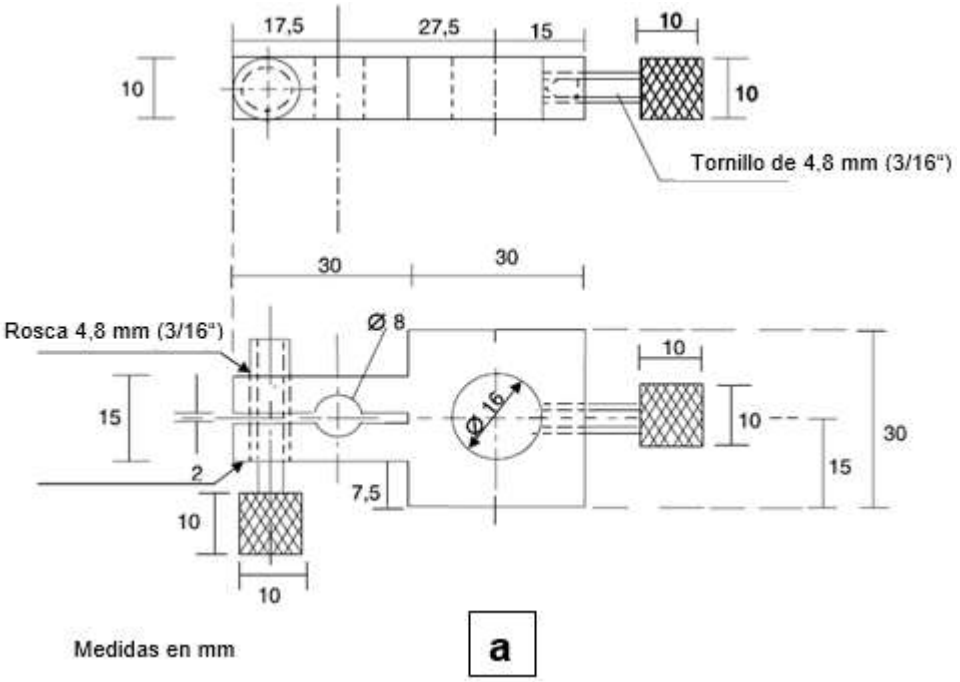


Figura 9: Dispositivo de acople del extensómetro. Adaptado de DNER 254 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

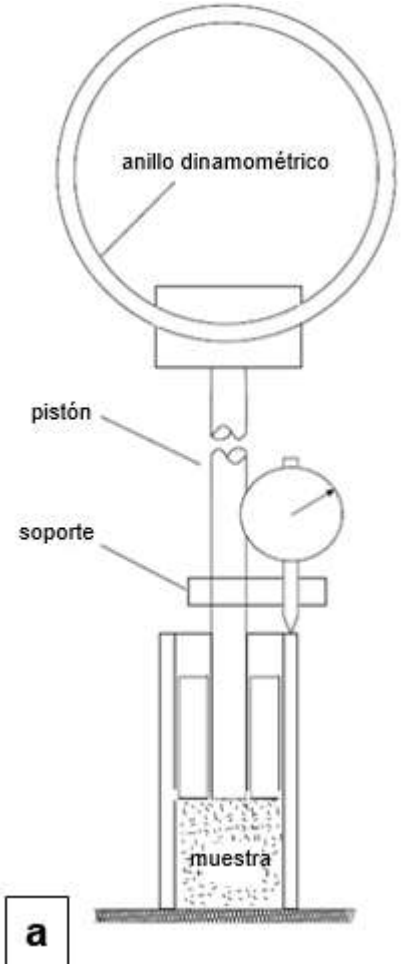


Figura 10: Montaje ensayo mini-CBR. Adaptado de DNER 254 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997).

5. PROCESO DE TOMA DE MUESTRAS.

Teniendo en cuenta que las muestras no son extraídas in-situ con el molde del Mini-CBR directamente, es necesario emplear un tubo de pared delgada tipo Shelby y posteriormente tallar la muestra para el molde del ensayo. A continuación se describe el proceso:

5.1 Nivelar la superficie del terreno y presionar el tubo Shelby contra el suelo por el filo cortante, insertando el tomamuestras sin rotación, mediante un movimiento continuo y relativamente rápido.

5.2 Inmediatamente después de extraído se deberá remover el material suelto o perturbado en el extremo superior del tubo y aplicar la parafina en ambos extremos para conservar su humedad y propiedades. En caso de que el tiempo de espera entre la extracción y el ensayo sea muy corto, se podrá cubrir los extremos del tubo con papel vinipel cubriendo muy bien la muestra.

5.3 Una vez se tenga la muestra en el laboratorio, se extrae del tubo y se repite el proceso con el molde de Mini-CBR: nivelar la superficie, presionar el molde contra la muestra por el filo cortante sin rotación.

5.4 Una vez se tenga una muestra de 5cm de diámetro y altura, se procede a la realización del montaje y posterior ensayo.

6. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

6.1 Mini-CBR con inmersión y sobrecarga

6.1.1 Colocar papel de filtro en la base del armado para inmersión y colocar sobre este el molde con la muestra. Sobre la muestra, dentro del molde, colocar otro papel de filtro y encima el disco perforado equipado con el eje vertical, sobre éste añadir la sobrecarga anular. Colocar la placa superior del armado de inmersión y ajustar los tornillos.

6.1.2 Llevar el conjunto al tanque de inmersión vacío y medir la altura inicial (0.01 mm).

6.1.3 Llenar el tanque de inmersión hasta que la lámina de agua esté 5 mm por encima de la placa superior del conjunto. Registrar la hora exacta luego de la inmersión.

6.1.4 Dejar en inmersión por lo menos durante 20 horas, posteriormente efectuar la lectura final en el extensómetro.

6.1.5 Nota: En la medida de lo posible, se recomienda que se efectúe adicionalmente la lectura a la hora, 4 horas y 6 horas.

6.1.6 Retirar el conjunto del tanque y desmontarlo. Colocar el molde levemente inclinado de manera que pueda escurrir el agua por un periodo de 15 minutos.

6.1.7 Dejar en reposo la muestra por cerca de 1 hora para disipar la presión neutra, evitando variaciones de temperatura y condiciones que propicien la pérdida de humedad. Retirar los discos de polietileno y colocar el disco de acero de la sobrecarga sobre el molde.

6.1.8 Llevar el molde a ensayar con la sobrecarga a la prensa de acero y ajustar el pistón.

6.1.9 A continuación, ajustar el extensómetro del dispositivo de medida de penetración, de manera que el puntero, que lee 0,01 mm, coincida con cero.

6.1.10 Configurar la velocidad de penetración a 1.27 mm/min

6.1.11 Efectuar medidas en el extensómetro del anillo dinamométrico, correspondientes a las siguientes penetraciones: 0,25 mm, 0,50 mm, 0,75 mm, 1,00 mm, 1,25 mm, 1,50 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 3,5 mm, 4,0 mm, 4,5 mm y 5,0 mm.

6.1.12 Bajar el plato de la prensa, quitar el molde mediante un extractor apropiado, con el fin de extraer el cuerpo de prueba.

6.1.13 Tomar una porción de la muestra de aproximadamente 5 mm de la parte superior, de la parte central y de la base, para determinar el contenido de humedad.

6.2 Mini-CBR sin inmersión y con sobrecarga

6.2.1 Retirar los discos de polietileno de la base y el extremo superior de la muestra.

6.2.2 Colocar papel de filtro en la base de la prensa y colocar sobre este el molde con la muestra. Sobre la muestra, dentro del molde, colocar otro papel de filtro y encima el disco perforado equipado con el eje vertical y la sobrecarga para penetración.

6.2.3 Realizar los procedimientos descritos en los pasos 6.1.8 a 6.1.13 del proceso con inmersión.

7. CÁLCULOS

7.1 Expansión:

Con los valores obtenidos en los puntos 6.1.2 A 6.1.4 en condición de inmersión, calcula lar expansión “E” de acuerdo con la ecuación (19**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$E = \frac{(L_i - L_f) * 100}{A_i}$$

Ecuación 1

Donde,

L_i: Lectura inicial del extensómetro, en milímetros, con aproximación de 0.01 mm.

L_f: Lectura final del extensómetro, en milímetros, con aproximación de 0.01 mm.

A_i: Altura inicial de la muestra, en milímetros, con aproximación de 0.01 mm.

Nota: en los suelos arcillosos altamente expansivos (E mayor a 5%) se recomienda realizar el gráfico tiempo vs expansión, las expansiones parciales se determinan con la misma ecuación y correspondientes a las lecturas intermedias.

7.2 Mini-CBR (para las condiciones con inmersión (E) y sin inmersión (S) y con sobrecarga):

7.2.1 Calcular las cargas, en kilogramos de fuerza, correspondientes a las lecturas del anillo dinamométrico (u otro dispositivo de medida de carga), marcar los puntos respectivos en el gráfico, con las penetraciones en abscisas y las cargas en ordenadas y trazar por ellos la curva media correspondiente.

7.2.2 Dependiendo de la forma de la curva obtenida, corregirla de acuerdo con lo siguiente:

7.2.2.1 Por punto de inflexión cerca al origen, Figura 11.

- Cuando presente un punto de inflexión cerca del origen, trazar una tangente a la curva en ese punto, hasta que la misma intercepte el eje de las abscisas.
- La curva corregida se formará por esta tangente hasta el punto de inflexión y por el tramo original de la curva después de ese punto.
- Desplazar el cero de las abscisas a la intersección antes mencionada.

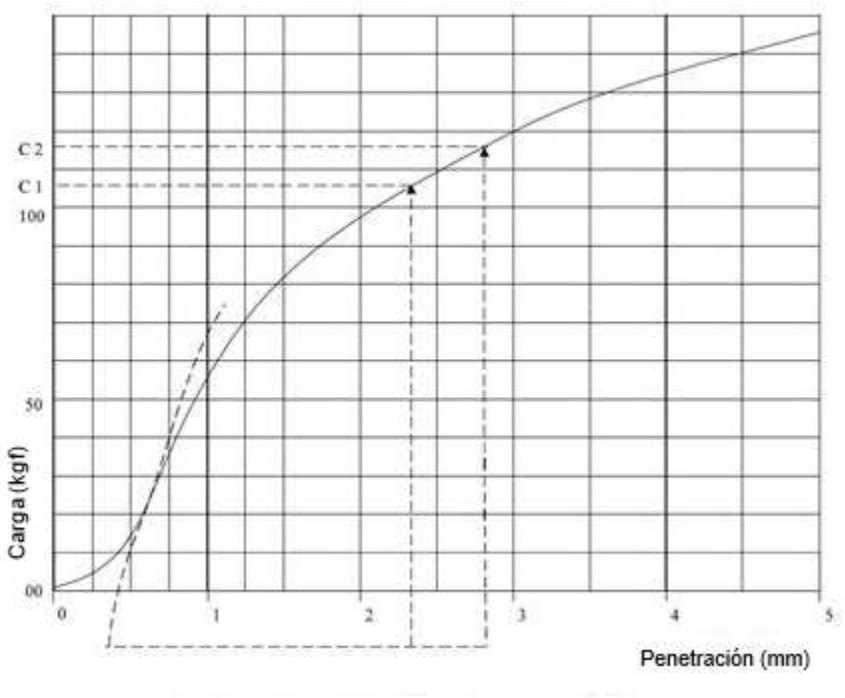


Figura 11: Corrección curva de mini-CBR por punto de inflexión cerca al origen.

7.2.2.2 Por comportamiento decreciente (cizallamiento), Figura 12.

- Cuando el tramo más allá de la penetración de 2,00 mm sea decreciente, indicando la ocurrencia de cizalla del cuerpo de prueba, corregirla prolongándola con la misma tendencia de la curvatura, desde un punto justo antes del valor de la carga máxima observada.
- Determinar las cargas en kilogramos de fuerza correspondientes a las penetraciones de 2,0 mm y 2,5 mm, luego de realizada la corrección de la gráfica (en caso de ser necesario).

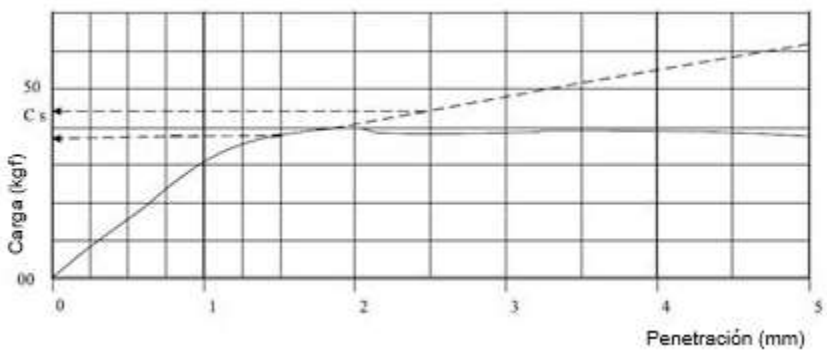


Figura 12: Corrección curva de mini-CBR por comportamiento decreciente (cizallamiento).

7.2.3 Determinar las cargas en kilogramos fuerza de la curva del ensayo o luego de las correcciones descritas, correspondientes a la penetración de 1.25 mm.

7.2.4 Calcular el CBR0.1" y el CBR0.2" por las siguientes fórmulas:

$$CBR_{0.1"}\ (\%) = 5.0713 * \log(carga_{1.25mm}) - 0.594, R^2 = 0.8334$$

Ecuación 2

$$CBR_{0.2"}\ (\%) = 4.6209 * \log(carga_{1.25mm}) - 0.8108, R^2 = 0.8837$$

Ecuación 3

8. INFORME

Los datos y resultados que deberá incluir como mínimo son los siguientes:

8.1 Identificación de la muestra (Proyecto, número de la perforación, número de la muestra, profundidad, etc.).

8.2 Descripción de los ensayos de caracterización física realizados: Descripción visual (INV E-102); granulometría (INV E-123); límites de Atterberg (normas INV E-125 e INV E-126); clasificación formal (INV E-180 e INV E-181).

8.3 Humedad natural y humedad luego de la inmersión.

8.4 Sobrecarga de saturación y penetración.

8.5 Expansión de la muestra.

8.6 Curvas esfuerzo – penetración.

8.7 Valor de la Relación de Soporte de California (CBR) para cada muestra.

8.8 Formatos de recolección de datos:

Tabla 1: Formato datos de laboratorio

Penetración de la muestra	
Humedad natural	
Masa inicial del sistema (kg)	
Masa sobrecargas (kg)	
Diámetro del pistón (mm)	
Área del pistón (mm^2)	
Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	
Altura inicial de la muestra (mm)	
Lectura inicial (mm)	
Lectura final (mm)	
Expansión (%)	
Humedad después de inmersión	

Pen (")	Pen (mm)	Carga (kg)	Esfuerzo (MPa)
0.000	0.000		
0.010	0.250		
0.020	0.500		
0.030	0.750		
0.039	1.000		
0.049	1.250		
0.059	1.500		
0.079	2.000		
0.098	2.500		
0.118	3.000		
0.138	3.500		
0.157	4.000		
0.177	4.500		
0.197	5.000		

9. NORMAS DE REFERENCIA

9.1 DNER-ME 254/97 *Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão...*

9.2 INV E-102 Descripción e identificación de los suelos (Procedimiento visual y manual).

9.3 INV E-123 Determinación de los tamaños de partículas de los suelos.

9.4 INV E-125 Determinación del límite líquido de los suelos.

9.5 INV E-126 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.

9.6 INV E-148 CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.

9.7 INV E-180 Clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (sistema AASHTO).

9.8 INV E-181 Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería.