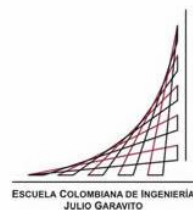


Maestría en Ingeniería Civil

Módulo resiliente de suelos blandos de subrasante de la zona lacustre de Bogotá a partir del ensayo CBR cíclico

Diana Carolina Bojacá Torres

Bogotá, D.C., 03 de agosto de 2020



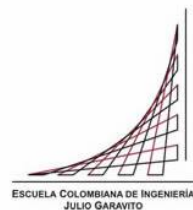
Módulo resiliente de suelos blandos de subrasante de la zona lacustre de Bogotá a partir del ensayo CBR cíclico

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

Sandra Ximena Campagnoli Martínez

Director

Bogotá, D.C., 03 de agosto 2020



La tesis de maestría titulada “**Módulo resiliente de suelos blandos de subrasante de la zona lacustre de Bogotá a partir del ensayo CBR cíclico**”, presentada por Diana Carolina Bojacá Torres, cumple 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

Oscar Reyes Ortiz

Jurado

Bogotá, D.C., agosto 2020

*“Even when I have all I need, You still call for me,
And when I can hardly see, when I can barely stand,
You will always carry me, I won't forget”
- WC*

*A mi más grande superhéroe, mi padre,
a mi más preciado refugio, mi madre,
a mi más valiosa compañía, mi hermano,
a mi ángel de la guarda, mi abuela Emma,
quienes, junto a Dios,
siempre serán la razón de mis más grandes victorias*

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a la Ingeniera Sandra Campagnoli, por su compromiso, incondicional apoyo y cariño, este trabajo y gran parte de mi desarrollo profesional no hubiesen sido posibles sin ella como guía y ejemplo.

Al Ingeniero Sebastián Ruiz, quien, con su compromiso, conocimiento, compañía y principalmente su amistad, fue fundamental en el desarrollo de este proyecto.

A los laboratoristas Marco Contreras y Osmar Tolosa, por su constante apoyo y colaboración en todo el proceso de obtención de muestras y ejecución de ensayos de campo y laboratorio.

A la compañía LFO Ingenieros de Suelos S.A.S., de manera especial a los Ingenieros Luis Fernando Orozco y Marcela Salcedo, quienes colocaron a disposición todos los recursos y apoyo necesarios para la obtención de permisos y ejecución de exploraciones.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por ofrecerme siempre un segundo hogar, permitirme enamorarme de lo que hago y darme un propósito en la vida.

Resumen

Los métodos empíricos para el diseño de pavimentos, basados en valores de CBR (California Bearing Ratio) como estimativo de resistencia, fueron desarrollados a partir de las experiencias en vías existentes o en proyectos de investigación de gran envergadura como el *AASHO Road Test*, mientras que los métodos mecanicistas, los cuales usan el módulo resiliente (M_r) como parámetro de diseño, requieren un entendimiento teórico para lograr extender su aplicación a diferentes condiciones. Se ha demostrado que el diseño con métodos empíricos da generalmente como resultado estructuras que no cumplen necesariamente con los requerimientos reales de la vía.

No obstante lo anterior, muchos países, particularmente los países en desarrollo, todavía utilizan métodos de diseño que tienen un gran componente empírico, debido a que los procedimientos de diseño analíticos o mecanicistas más sofisticados requieren a menudo suposiciones con respecto al comportamiento del material, y los ensayos para obtener los parámetros de diseño no son de uso rutinario, ya que los equipos para su ejecución no son fácilmente asequibles. Es decir, los ensayos cíclicos que permiten determinar el M_r son relativamente complejos, los equipos son costosos, su disponibilidad es limitada y su ejecución consume una cantidad de tiempo considerable, además de requerir personal capacitado.

Es por lo anterior que el avance en la investigación sobre la respuesta de los suelos ante cargas cíclicas ha impulsado el deseo y la necesidad de obtener el valor de M_r de manera relativamente económica y sencilla, con el objetivo de generar menor incertidumbre en el diseño de pavimentos con respecto a las metodologías de base empírica. Una de las alternativas encontradas para estimar el M_r de los suelos blandos de subrasante es el CBR cíclico (cCBR).

Con el fin de validar su potencial aplicabilidad, en el presente documento se presenta una comparación de los resultados obtenidos de M_r , siguiendo la norma de ensayo del Instituto Nacional de Vías, INV-156-13 "Módulo resiliente de suelos y agregados", con el Módulo Equivalente (E_{equi}) de muestras de arcilla inalterada de la zona lacustre de la ciudad de Bogotá, obtenido en el ensayo cCBR, el cual fue adaptado principalmente de la propuesta presentada por investigadores de la Universidad de Delft. Dicha comparación se realizó mediante el uso de diferentes herramientas estadísticas.

Se tomaron 19 muestras representativas de la zona lacustre de la ciudad de Bogotá, el criterio utilizado fue contar con muestras cuyo valor de CBR no superara el 5%. En la

investigación se incluyeron muestras de arcilla y de limo de alta compresibilidad (CH-MH) y limos de baja compresibilidad (ML) sin potencial de expansión, los cuales, en algunos casos, presentaban raíces y trazos de materia orgánica. En general, los suelos analizados tienen valores de G_s comprendidos entre 2.68 y 2.72, un grado de saturación entre el 86% y 96%, y bajos valores de peso unitario que corroboran la presencia de materia orgánica detectada con la simple observación.

Se utilizaron los modelos $k - \sigma_d$ y *universal* para analizar el comportamiento del M_r y del E_{equi} . En ambos casos fue posible observar el buen ajuste de los modelos (En la mayoría de los casos $R^2 > 0.7$), independientemente de cambios en las diferentes características del suelo, como lo son la humedad, el peso unitario, la granulometría y la plasticidad. En lo que respecta al M_r , existió un ajuste ligeramente mayor con el *modelo universal*, puesto que en promedio su valor de R^2 fue de 0.841, mientras que el del *modelo $k - \sigma_d$* fue 0.774. En cuanto al E_{equi} , el R^2 promedio de ambos modelos fue el mismo, 0.879.

Una vez establecida la buena correlación entre el módulo (Resiliente o equivalente) y el estado de esfuerzos (σ_d o τ_{oct}), se sabe que es viable el siguiente paso del análisis, que es determinar los intervalos de predicción, el cual es un ejercicio que consiste en la estimación de un intervalo de valores en el que se producirá una observación futura con determinada probabilidad, dado lo que ya se ha observado.

Para este caso particular, se realizó el análisis para determinar los intervalos de predicción con un 95% de confiabilidad a partir de los resultados del ensayo de M_r ; posteriormente, utilizando el modelo constitutivo ($k - \sigma_d$ o *universal*) obtenido del ensayo de cCBR, se calculan los módulos resilientes a los mismos niveles de esfuerzo del ensayo M_r . Se considera que el modelo constitutivo presentado en el cCBR es adecuado para determinar el M_r a bajos niveles de esfuerzo, si dichos valores calculados caen dentro de los intervalos de predicción

Existieron en general buenas estimaciones del M_r a partir de las ecuaciones constitutivas del ensayo de cCBR, no obstante, también fue posible observar que se presenta un mejor ajuste a partir de *modelo $k - \sigma_d$* , puesto que todos estos modelos están dentro de los intervalos de predicción, en contraste con algunos del *modelo universal*.

A partir de los resultados obtenidos, se puede establecer que las ecuaciones constitutivas obtenidas a partir del ensayo de cCBR permiten obtener un estimado del M_r , en diferentes condiciones de humedad, peso unitario, plasticidad y granulometría de los suelos blandos de subrasante. Lo anterior demuestra que la prueba de cCBR se puede presentar como una opción viable para estimar M_r , ante la carencia de una infraestructura adecuada para ejecutar este ensayo.

No obstante lo anterior, cabe resaltar que no fue posible establecer un único modelo constitutivo para los suelos de subrasante de Bogotá, ya que los valores de las constantes experimentales están en rangos muy amplios debido a la variabilidad en humedades, pesos

unitarios, plasticidades y granulometrías de las muestras. En cuanto al *modelo* $k - \sigma_d$ del M_r , los valores de k_1 varían entre 16.99 y 42.68 y de la constante k_2 entre -0.441 y -0.116; en el *modelo universal*, k_1 varían entre 0.295 y 1.025; k_2 entre -0.166 y 0.270, y k_3 entre 4.56 y -1.32. Por su parte, en cuanto al E_{equi} , en el *modelo* $k - \sigma_d$ los valores de k_1 se encuentran entre 15.95 y 43.68 y los de k_2 entre -0.356 y -0.155; y en el *modelo universal* k_1 varía entre 0.270 y 1.435; k_2 entre -0.171 y 0.799, y k_3 entre -4.16 y -0.99.

Adicionalmente, tampoco fue posible establecer correlaciones entre el M_r y E_{equi} con valores de resistencia obtenidos mediante ensayos empíricos como lo son el CBR, el PDC y la resistencia al corte no drenada, lo cual se atribuye principalmente a la omisión de la influencia del estado de esfuerzos en la resistencia por parte del segundo grupo de ensayos.

Todo lo anterior indica que la prueba de cCBR se presenta como una opción viable para estimar el M_r a partir del E_{equi} de arcillas blandas, con una confiabilidad del 95%, y que el valor de módulo resiliente, además de ser influenciado por el nivel de esfuerzos, es un valor que también depende de las características físicas y mecánicas de los suelos de subrasante, lo cual invita al buen uso del juicio y criterio ingenieril al momento de determinarlo para el diseño de pavimentos.

Palabras clave: CBR cíclico, módulo equivalente, módulo resiliente, subrasante, suelos blandos.

Índice general

	Pág.
Capítulo 1. Introducción	20
1.1. Antecedentes	21
1.2. Objetivos.....	24
1.2.1. Objetivo general.....	24
1.2.2. Objetivos específicos.....	24
1.3. Organización de la tesis	24
1.4. Referencias	25
Capítulo 2. Revisión bibliográfica	29
2.1. Rol de la subrasante en los pavimentos	29
2.2. Cargas sobre el pavimento	31
2.3. Diseño de pavimentos flexibles.....	33
2.3.1. Métodos de diseño empíricos.....	33
2.3.1. Métodos de diseño mecanicistas	36
2.3.2. Métodos de diseño empírico-mecanicistas	37
2.3.3. Diseño de pavimentos en Colombia.....	39
2.4. Parámetros de diseño de pavimentos.....	40
2.4.1. Relación de soporte de California (CBR)	40
2.4.1.1. Ensayo estándar de CBR	41
2.4.1.2. Factores que influyen el valor de CBR en los suelos.....	43
2.4.1.3. Correlaciones del CBR con propiedades índice	48
2.4.1.4. Limitaciones del ensayo de CBR	49
2.4.2. Penetrómetro dinámico de cono (PDC)	50
2.4.2.1. Ensayo estándar de PDC	53
2.4.2.2. Factores que influyen el valor de DN en los suelos	54
2.4.2.3. Correlaciones del DN con el CBR	55
2.4.2.4. Limitaciones del ensayo de PDC	57
2.4.3. Módulo resiliente (Mr)	58
2.4.3.1. Comportamiento resiliente de los suelos	60
2.4.3.2. Comportamiento resiliente de los suelos blandos de subrasante.....	62
2.4.3.3. Modelos constitutivos para suelos finos de subrasante.....	71
2.4.3.4. Ensayo estándar de Mr	77
2.4.3.5. Correlaciones del Mr con el CBR y el DN	78
2.4.4. Ensayo CBR cíclico (cCBR)	79
2.4.4.1. Principio del ensayo cCBR.....	80
2.4.4.2. Desarrollo del ensayo cCBR	80
2.5. Referencias	96
Capítulo 3. Ensayo CBR cíclico (cCBR).....	108
3.1. Consideraciones generales.....	108
3.2. Técnica de la prueba de cCBR	110
3.2.1. Toma de muestras inalteradas	110

3.2.2.	Equipo de ensayo cCBR	112
3.2.3.	Procedimiento del ensayo de cCBR	114
3.3.	Modelación en elementos finitos para la determinación del E_{equi}	117
3.4.	Referencias	119
Capítulo 4.	Metodología y materiales.....	121
4.1.	Metodología de la investigación	121
4.1.1.	Delimitación de la zona de estudio.....	121
4.1.1.1.	Zonificación sísmica	122
4.1.1.2.	Zonificación geotécnica.....	123
4.1.1.3.	Zonificación geológica.....	123
4.1.1.4.	Superposición de las zonas	124
4.1.1.5.	Valores de CBR de la zona seleccionada	125
4.1.2.	Etapas de la investigación.....	126
4.1.2.1.	Etapa 1. Calibración de ensayos de laboratorio	128
4.1.2.2.	Etapa 2. Extracción de muestras inalteradas y ensayos de campo	129
4.1.2.3.	Etapa 3. Caracterización y clasificación de las muestras	134
4.1.2.4.	Etapa 4. Ensayos de resistencia y rigidez	134
4.1.2.5.	Etapa 5. Análisis de resultados y determinación de correlaciones.....	136
4.2.	Clasificación y caracterización de los materiales.....	136
4.3.	Referencias	139
Capítulo 5.	Resultados experimentales y análisis.....	142
5.1.	Resultados ensayos de resistencia al corte.....	142
5.1.1.	Relación entre CBR sin saturar y DN.....	145
5.1.2.	Relación entre CBR sin saturar y resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$).....	147
5.1.3.	Relación entre DN y resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$)	148
5.2.	Resultados ensayo M_r	149
5.2.1.	Ecuaciones constitutivas	150
5.2.1.1.	Modelo $k - \sigma_d$	151
5.2.1.2.	Modelo Universal.....	158
5.2.2.	Cálculo M_r a un nivel de esfuerzos	165
5.2.2.1.	Modelo $k - \sigma_d$	167
5.2.2.2.	Modelo Universal.....	169
5.2.2.3.	Comparación entre los modelos constitutivos.....	172
5.2.3.	Influencia de las características físicas del suelo en el valor de M_r	174
5.2.4.	Resistencia al corte – Prueba rápida de corte	176
5.3.	Resultados ensayo cCBR	179
5.3.1.	Ecuaciones constitutivas	180
5.3.1.1.	Modelo $k - \sigma_d$	180
5.3.1.2.	Modelo Universal.....	187
5.3.2.	Cálculo E_{equi} a un nivel de esfuerzos.....	194
5.3.2.1.	Modelo $k - \sigma_d$	194
5.3.2.2.	Modelo Universal.....	196
5.3.2.3.	Comparación entre modelos constitutivos	199
5.3.2.4.	Comparación con los resultados del ensayo M_r	200
5.3.3.	Influencia de las características físicas del suelo en el valor de E_{equi}	202
5.4.	Verificación y validación del módulo equivalente (E_{equi})	204
5.4.1.	Determinación del ajuste estadístico.....	204
5.4.2.	Evaluación mediante intervalos de predicción	210
5.4.2.1.	Modelo $k - \sigma_d$	210
5.4.2.2.	Modelo Universal.....	213
5.5.	Relaciones entre el M_r y E_{equi} con parámetros de resistencia	216

5.6.	Estudio de costos de la prueba cCBR	218
5.6.1.	Rendimiento y precios del mercado	218
5.6.2.	Tarifa horaria	219
5.6.2.1.	Costos de propiedad o posesión	219
5.6.2.2.	Costos de operación	221
5.6.2.3.	Costo de producción del ensayo	224
5.7.	Referencias	225
Capítulo 6.	Conclusiones y recomendaciones	229
6.1.	Conclusiones	229
6.1.1.	Características físicas y mecánicas de los suelos estudiados	229
6.1.2.	Influencia del esfuerzo desviador y cortante octaédrico en los valores de módulo ...	230
6.1.3.	Relación entre el módulo resiliente y equivalente con demás valores de resistencia	231
6.1.4.	Uso del ensayo cCBR para estimar el módulo resiliente	231
6.2.	Recomendaciones	233
Anexos.	234

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2.1 Comparación de las estructuras típicas de pavimentos en países industrializados (Izquierda) y países en vía de desarrollo (Derecha).....	30
Figura 2.2 Régimen de esfuerzos experimentado por un elemento de pavimento bajo una cara de rueda en movimiento.....	32
Figura 2.3 Desarrollo de la deformación permanente en la pista de prueba en Alconbury Hill.....	35
Figura 2.4 Curvas de diseño para espesor de capa a partir del CBR-method.....	36
Figura 2.5 Equipo de ensayo de CBR en laboratorio.....	42
Figura 2.6 Influencia de la humedad óptima y el contenido de grava en el valor de CBR con inmersión en suelos peruanos.....	44
Figura 2.7 (a) Influencia de la densidad seca máxima (en t/m^3) y (b) del contenido de humedad óptimo (en %) en el valor de CBR sin inmersión en suelos granulares.....	44
Figura 2.8 Relación entre el valor de CBR con: (a) contenido de gravas y (b) contenido de limos/arcillas	45
Figura 2.9 Influencia del contenido de humedad óptimo (OMC) y la densidad seca máxima (MDD) en el valor de CBR sumergido de suelos finos de baja plasticidad	46
Figura 2.10 Comportamiento del CBR sumergido con el cambio en el índice de plasticidad en suelos finos de baja plasticidad	46
Figura 2.11 Influencia del índice de plasticidad en el CBR sin saturar y saturado para arcillas de alta plasticidad	47
Figura 2.12 Influencia de la densidad seca máxima (MDD) y el contenido de humedad óptimo (OMC) en el CBR sin saturar y saturado en suelos finos de alta plasticidad.....	47
Figura 2.13 Esquema equipo PDC	51
Figura 2.14 Límites teóricos de una falla plástica	52
Figura 2.15 Resultados típicos de un ensayo PDC.....	53
Figura 2.16 Correlación entre DN confinado y no confinado de: (a) una capa granular y (b) una capa arcillosa	54
Figura 2.17 Correlaciones en la literatura CBR-DN (Latinoamérica y el resto del mundo)	57
Figura 2.18 Esquema sobre el principio de carga cíclica triaxial.....	59
Figura 2.19 Esquema del comportamiento resiliente de un material bajo carga cíclica.....	60
Figura 2.20 Esfuerzos en el suelo bajo un ciclo de carga.....	60
Figura 2.21 Cambio del módulo resiliente con el incremento del esfuerzo desviador.....	63
Figura 2.22 Influencia de la presión de confinamiento sobre el módulo resiliente	63
Figura 2.23 Comportamiento de la deformación permanente a diferentes niveles de esfuerzo desviador y frecuencias de carga.....	64
Figura 2.24 Comportamiento del módulo resiliente con cambio en el esfuerzo desviador bajo diferentes métodos de compactación (En condiciones de humedad por encima del óptimo)	65
Figura 2.25 Comportamiento del Mr a diferentes porcentajes de compactación del ensayo Proctor	66
Figura 2.26 Representación del comportamiento del módulo resiliente con cambios en densidad y humedad simultáneamente.....	66
Figura 2.27 Comportamiento del Mr con el grado de saturación	66
Figura 2.28 Variación del Mr a lo largo de un año	67

Figura 2.29 Resultados de Mr para muestras de arcilla con humedad debajo del OMC (a) y por encima del OMC (b)	67
Figura 2.30 Mr en función del esfuerzo desviador para una muestra CL.....	68
Figura 2.31 Módulo resiliente bajo diferentes esfuerzos desviadores y contenidos de humedad.....	68
Figura 2.32 Influencia de la succión total y matricial en el Mr.....	69
Figura 2.33 Relación entre la succión matricial y el Mr de una muestra CH a un 96% de compactación	70
Figura 2.34 Influencia de la succión matricial y del esfuerzo desviador en el Mr.....	70
Figura 2.35 Efecto de los ciclos hielo-deshielo en el módulo resiliente en un suelo de subrasante cohesivo ..	71
Figura 2.36 Representación esquemática del modelo bilineal.....	73
Figura 2.37 Esquema de aplicación de las cargas en un ensayo de Mr.....	77
Figura 2.38 Deformación cónica y cilíndrica en la solución aproximada para calcular el módulo mediante el cCBR	81
Figura 2.39 Patrón de carga-deformación (Izquierda) y deformaciones (Derecha) en el ensayo de cCBR.....	83
Figura 2.40 Molde estándar de CBR y molde usado para material granular	84
Figura 2.41 Comparación entre el módulo resiliente y el módulo equivalente	85
Figura 2.42 Ensayo de cCBR con medidores de deformación lateral.....	86
Figura 2.43 Correlación entre el Mr y el E_{equi} mediante cCBR con medidores de deformación	86
Figura 2.44 Valores de CBR convencional y obtenidos a partir del Mr reportado en el cCBR a diferentes tiempos de estabilización	87
Figura 2.45 Desplazamiento total con el número de ciclos para diferentes tiempos de estabilización	88
Figura 2.46 Componentes de la deformación total de los últimos 15 ciclos de una de las muestras utilizadas	88
Figura 2.47 Correlación entre la información recolectada y modelada usada para la predicción de ahuellamiento, obtenida durante el ensayo cCBR	89
Figura 2.48 Representación esquemática del ensayo cCBR (a) a esfuerzo controlado y (b) a deformación controlada	91
Figura 2.49 Esquema de ejecución de ensayos	91
Figura 2.50 Comportamiento de uno de los materiales ensayados bajo el procedimiento de cCBR	92
Figura 2.51 Valores de CBR durante los 4 ciclos para una de las muestras ensayadas: Penetración hasta 0.1" (Arriba) y hasta 0.2" (Abajo).....	93
Figura 2.52 Valor del Mr tomado luego de 50 ciclos de carga con el modelo Mr- θ para los tres ensayos.....	95
Figura 3.1 Variación del Mr con la profundidad del molde de CBR bajo el centro del pistón.....	109
Figura 3.2 Variación del Mr a lo ancho del molde de CBR a 4 diferentes profundidades (en mm).....	109
Figura 3.3 Dimensiones del molde para obtención de muestras inalteradas (Medidas en mm)	111
Figura 3.4 Prensa de carga utilizada en ensayo de cCBR y sistema de manual de toma de datos	112
Figura 3.5 Sistema de y adquisición de datos.....	113
Figura 3.6 Celda de carga y transductor de desplazamiento.....	113
Figura 3.7 Esquema del montaje del ensayo de cCBR (Medidas en mm).....	114
Figura 3.8 Ensayo cCBR (a) Deformación en función del tiempo, (b) Carga en función del tiempo.....	116
Figura 3.9 Ensayo cCBR (a) Deformación en función de la carga, (b) Desarrollo de las deformaciones con los ciclos de carga	117
Figura 3.10 Visualización en 3D de la simulación en elementos finitos de la muestra del suelo y el molde rígido usada por Araya (2011)	118
Figura 4.1 Proyectos ejecutados por LFO en la ciudad de Bogotá desde 2009 hasta 2019.....	121
Figura 4.2 Zona lacustre 200 (Morado) y lacustre 300 (Azul)	122
Figura 4.3 Zona Lacustre A (Verde) y Lacustre B (Naranja)	123
Figura 4.4 Geología de la zona Q1-l.....	124
Figura 4.5 Zona de estudio definitiva (Amarillo).....	124
Figura 4.6 Ubicación de los 23 proyectos ejecutados por LFO en la zona de estudio.....	125
Figura 4.7 Diagrama de las etapas de la investigación.....	127
Figura 4.8 Equipo DYNAPAVE utilizado para ensayo de Mr	128
Figura 4.9 Equipo de ensayo y adquisición de datos para el ensayo cCBR	129
Figura 4.10 Exploración para obtención de muestras y ensayo de campo (PDC)	130

Figura 4.11 Extracción y almacenamiento de muestras tubo Shelby.....	131
Figura 4.12 Almacenamiento muestra inalteradas de CBR	131
Figura 4.13 Ubicación de las zonas de exploración ejecutadas	132
Figura 4.14 Ubicación de las 7 exploraciones ejecutadas en la ECI.....	133
Figura 4.15 Ubicación de las 7 exploraciones ejecutadas en SJB.....	133
Figura 4.16 Preparación y montaje de la muestra para ensayo de Mr.....	135
Figura 4.17 Ensayo de CBR	135
Figura 4.18 Muestras utilizadas con presencia importante de raíces y materia orgánica	137
Figura 4.19 Carta de Casagrande con las muestras estudiadas	138
Figura 5.1 Muestras luego de la prueba rápida de corte del ensayo de Mr	144
Figura 5.2 Correlaciones CBR sin saturar y DN de (a) Todas las muestras (●) , (b) Muestras ECI (■) y (c) Muestras SJB (◆)	145
Figura 5.3 Comparación de correlaciones encontradas en la literatura con la obtenida en la investigación ..	147
Figura 5.4 Correlaciones CBR sin saturar y ($\Delta\sigma_f$) de (a) Todas las muestras (●) , (b) Muestras ECI (■) y (c) Muestras SJB (◆)	148
Figura 5.5 Correlaciones DN y resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$) de (a) Todas las muestras (●) , (b) Muestras ECI (■) y (c) Muestras SJB (◆)	149
Figura 5.6 Resultados individuales de Mr Vs σ_d para todas las 19 muestras de estudio	153
Figura 5.7 Comparación Mr obtenido en el laboratorio Vs Mr calculado mediante el modelo k - σ_d para todas las 19 muestras de estudio.....	156
Figura 5.8 Resultados en conjunto de Mr Vs σ_d para todas las 19 muestras de estudio: (a) Todas las muestras, (b) Muestras arcilla y (c) Muestras limo.....	157
Figura 5.9 Resultados individuales de Mr Vs τ_{oct} para todas las 19 muestras de estudio.....	160
Figura 5.10 Comparación Mr obtenido en el laboratorio Vs Mr calculado mediante el modelo universal para todas las 19 muestras de estudio	163
Figura 5.11 Resultados en conjunto de Mr Vs τ_{oct} para todas las 19 muestras de estudio: (a) Todas las muestras, (b) Muestras arcilla y (c) Muestras limo	164
Figura 5.12 Representación de los intervalos de predicción y del valor de Mr al nivel de esfuerzo representativo	166
Figura 5.13 Resultados individuales de intervalos de predicción y Mr con 95% de confiabilidad para todas las 19 muestras de estudio mediante el <i>modelo k-σ_d</i>	169
Figura 5.14 Resultados individuales de intervalos de predicción y Mr con 95% de confiabilidad para todas las 19 muestras de estudio mediante el <i>modelo universal</i>	172
Figura 5.15 Comparación de los valores de Mr mediante el modelo k- σ_d y el modelo universal	173
Figura 5.16 Valores de Mr (mediante ambos modelos) Vs (a) peso unitario y (b) relación de vacíos de las muestras	174
Figura 5.17 Valores de Mr (mediante ambos modelos) Vs Humedad.....	175
Figura 5.18 Valores de Mr (mediante ambos modelos) Vs % arena de (a) todas las muestras y (b) muestras cono elevados contenidos de arena	175
Figura 5.19 Valores de Mr (mediante ambos modelos) Vs (a) Límite líquido (LL) e (b) Índice de plasticidad (IP) de las muestras.....	176
Figura 5.20 Resultados resistencia al corte de todas las muestras	177
Figura 5.21 Curvas esfuerzo-deformación prueba rápida de corte para las muestras de (a) Arcilla (CH) y (b) Limo (MH/ML)	178
Figura 5.22 Resultados individuales de E_{equi} Vs σ_d para todas las 19 muestras de estudio	183
Figura 5.23 Comparación E_{equi} obtenido en el laboratorio Vs E_{equi} calculado mediante el modelo k - σ_d para todas las 19 muestras de estudio	186
Figura 5.24 Resultados en conjunto de E_{equi} Vs σ_d para todas las 19 muestras de estudio: (a) Todas las muestras, (b) Muestras arcilla y (c) Muestras limo	187
Figura 5.25 Resultados individuales de E_{equi} Vs τ_{oct} para todas las 19 muestras de estudio.....	189

Figura 5.26 Comparación E_{equi} obtenido en el laboratorio Vs E_{equi} calculado mediante el modelo universal para todas las 19 muestras de estudio	193
Figura 5.27 Resultados en conjunto de E_{equi} Vs τ_{oct} para todas las 19 muestras de estudio: (a) Todas las muestras, (b) Muestras arcilla y (c) Muestras limo	193
Figura 5.28 Resultados individuales de intervalos de predicción y E_{equi} con 95% de confiabilidad para todas las 19 muestras de estudio mediante el <i>modelo k-σ_d</i>	196
Figura 5.29 Resultados individuales de intervalos de predicción y E_{equi} con 95% de confiabilidad para todas las 19 muestras de estudio mediante el <i>modelo universal</i>	199
Figura 5.30 Comparación de los valores de E_{equi} mediante el modelo k- σ_d y el modelo universal	199
Figura 5.31 Comparación valor de M_r y E_{equi} con 95% de confiabilidad mediante modelo k- σ_d	201
Figura 5.32 Comparación valor de M_r y E_{equi} con 95% de confiabilidad mediante modelo universal	201
Figura 5.33 Valores de E_{equi} (mediante ambos modelos) Vs (a) peso unitario y (b) relación de vacíos de las muestras	202
Figura 5.34 Valores de E_{equi} (mediante ambos modelos) Vs Humedad	203
Figura 5.35 Valores de E_{equi} (mediante ambos modelos) Vs % arena de (a) todas las muestras y (b) muestras cono elevados contenidos de arena	203
Figura 5.36 Valores de E_{equi} (mediante ambos modelos) Vs (a) Límite líquido (LL) e (b) Índice de plasticidad (IP) de las muestras.....	204
Figura 5.37 M_r (●) y E_{equi} (●) Vs esfuerzo desviador para las 19 muestras de estudio	207
Figura 5.38 M_r (●) y E_{equi} (●) Vs cortante octaédrico para las 19 muestras de estudio	209
Figura 5.39 Ejemplo gráfico de (a) Intervalos de predicción y regresión, (b) Ajuste de predicción de la ecuación constitutiva de cCBR.....	210
Figura 5.40 Intervalos de predicción y validación del modelo k- σ_d del ensayo cCBR de las muestras.....	213
Figura 5.41 Intervalos de predicción y validación del modelo universal del ensayo cCBR de las muestras ...	216
Figura 5.42 Relación entre el M_r (al 95%) respecto a (a) DN, (b) CBR sin saturar y (c) Resistencia al corte no drenada mediante ambos modelos constitutivos	217
Figura 5.43 Relación entre el E_{equi} (al 95%) respecto a (a) DN, (b) CBR sin saturar y (c) Resistencia al corte no drenada mediante ambos modelos constitutivos	217
Figura 5.44 Cuadro general de costos en administración de maquinaria	220
Figura 5.45 Ítems para tener en cuenta para la determinación del recargo por prestaciones sociales.....	221
Figura 5.46 Vatímetro utilizado en la máquina multiensayos (Prensa)	222

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2.1 Valores de esfuerzo de muestra patrón para cálculo de CBR	41
Tabla 2.2 Correlaciones y parámetros estadísticos de modelos propuestos para suelos granulares y finos de Perú	43
Tabla 2.3 Algunas correlaciones DN (mm/golpe) y CBR encontradas en la literatura	55
Tabla 2.4 Secuencia de ensayo para suelos de subrasante.....	78
Tabla 2.5 Correlaciones Mr-CBR y Mr-DN (in/golpe).....	78
Tabla 2.6 Cálculo del módulo resiliente a partir del ensayo cCBR y del ensayo estándar de módulo	90
Tabla 2.7 Valores de módulo obtenidos a partir de cCBR y norma estándar a diferentes contenidos de humedad	90
Tabla 2.8 Resumen de los rangos de módulo equivalente y módulo resiliente para materiales individuales y mezclados.....	92
Tabla 2.9 Resumen de todos los ensayos de CBR ejecutados	93
Tabla 2.10 Valores de Mr para los tres tipos de ensayos cíclicos.....	94
Tabla 4.1 Rango de CBR de proyectos en la zona establecida de estudio	125
Tabla 4.2 Ubicación de las exploraciones realizadas	132
Tabla 4.3 Clasificación por sistema SUCS y granulometría de las muestras estudiadas	137
Tabla 5.1 Resultados de caracterización física y mecánica de las muestras utilizadas.....	143
Tabla 5.2 Consistencia de los suelos en función de resultados de compresión inconfiada	145
Tabla 5.3 Criterio de buen ajuste estadístico	146
Tabla 5.4 Mr (en MPa) para diferentes condiciones de esfuerzos de las 19 exploraciones realizadas	149
Tabla 5.5 Valor constantes experimentales modelo k- σ_d ensayo Mr.....	157
Tabla 5.6 Valor constantes experimentales modelo universal ensayo Mr	161
Tabla 5.7 Resultados de Mr con 95% de confiabilidad mediante modelo k- σ_d y modelo universal	173
Tabla 5.8 E_{equi} (en MPa) a diferentes penetraciones objetivo de las 19 exploraciones realizadas	179
Tabla 5.9 Valor constantes experimentales modelo k- σ_d ensayo cCBR	183
Tabla 5.10 Valor constantes experimentales modelo universal ensayo cCBR	190
Tabla 5.11 Resultados de E_{equi} con 95% de confiabilidad mediante modelo k- σ_d y modelo universal	200
Tabla 5.12 Tiempo requerido, en minutos, en la ejecución de los ensayos de cCBR realizados	218
Tabla 5.13 Costos equipo/herramienta para ejecución del ensayo cCBR	219
Tabla 5.14 Costos de propiedad equipos/herramientas ensayo cCBR.....	223
Tabla 5.15 Costos de operación equipos/herramientas ensayo cCBR	223
Tabla 5.16 Valor tarifa horaria equipos/herramientas ensayo cCBR	223
Tabla 5.17 Costo de producción del ensayo	224

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A. Propuesta protocolo ensayo CBR cíclico para muestras inalteradas A – 01.....	234
Anexo B. Cotizaciones maquinaria y herramienta B – 01	243
Anexo C. Descripción procedimientos de caracterización y clasificación de las muestras (Etapa 3) C – 01..	255
Anexo D. Formatos ensayos de campo y laboratorio	264

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>AASHTO</i>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<i>CBR</i>	California Bearing Ratio
<i>cCBR</i>	CBR cíclico
<i>CCI</i>	Cámara Colombiana de la Infraestructura
<i>CSIR</i>	South African Council on Scientific and Industrial Research
<i>DANE</i>	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
<i>DN</i>	Número Dinámico
<i>DPN</i>	Departamento Nacional de Planeación
<i>ECI</i>	Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
<i>INVIAS</i>	Instituto Nacional de Vías
<i>ITF</i>	International Transport Forum
<i>LTPPR</i>	Long Term Pavement Performance Research
<i>MEPDG</i>	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
<i>MINTRANSPORTE</i>	Ministerio de Transporte de Colombia
<i>Mr</i>	Módulo Resiliente
<i>NCHRP</i>	National Cooperative Highway Research Program
<i>PDC</i>	Penetrómetro Dinámico de Cono
<i>PIB</i>	Producto Interno Bruto
<i>SUCS</i>	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
<i>TRRL</i>	Transport and Road Research Laboratory
<i>UCT</i>	Uniaxial Cyclic Test
<i>USACE</i>	U.S. Army Corps of Engineers

Capítulo 1. Introducción

Asegurar la eficiencia y la competitividad del sector del transporte, así como la calidad del servicio, es una de las tareas claves para el desarrollo de la economía y la sociedad de una nación (Araya, 2011; Matijošius et al., 2016). Una apreciable cantidad de dinero ha sido invertida en la construcción de carreteras, y grandes gastos han sido requeridos para asegurarse que dichas carreteras cumplan continuamente con su función de una manera adecuada (Araya, 2011).

Estadísticas presentadas por el *International Transport Forum (ITF)*, muestran que anualmente los países invierten entre el 1% y 2% de su PIB en infraestructura relacionada con carreteras (ITF, 2013). Aunque a simple vista esto pareciera mostrar un panorama equitativo a nivel mundial, la realidad es que existe una gran brecha si dichas estadísticas se trabajan en términos de gastos reales. Para ilustrar dicha situación, basta con comparar el PIB anual de Estados Unidos y Colombia: el primero reportó un valor aproximado de USD 19.390.600 millones para el 2017, mientras que el del segundo fue de apenas USD 314.458 millones para el mismo año (The World Bank, 2017).

Cabe resaltar que, dentro de dichos gastos en la infraestructura vial a nivel mundial, el diseño de pavimentos juega un papel fundamental para el buen aprovechamiento de las inversiones realizadas. Pavimentos pobremente diseñados sufrirán una falla prematura, lo cual implicará unos costos elevados de rehabilitación o reconstrucción, así como grandes pérdidas económicas. Por el contrario, una estructura sobrediseñada implica el desperdicio de unos recursos limitados (Araya, 2011).

En el caso particular de Colombia, según cifras del Departamento Nacional de Planeación (DNP), el gobierno tiene proyectada una inversión hasta el año 2020 de cerca de \$112 billones de pesos para el mejoramiento de la infraestructura del país; de esta cifra el sector transporte recibe \$63.7 billones (57% del total de la inversión), lo que representa cerca de un 0.8% del PIB. Este dinero está clasificado en (i) mantenimiento vial (\$9.8 billones), (ii) grandes proyectos (\$32 billones), (iii) conectividad regional (\$13 billones) y (iv) transporte férreo, fluvial, aéreo y portuario (\$8.7 billones).

Teniendo en cuenta todos aquellos imprevistos ignorados por el gobierno nacional y los estándares esperados (Clavijo et al. 2013) determinaron que existe un déficit considerable entre lo que realmente necesita el país y esta inversión presentada por el gobierno, este

déficit se estima en más de \$26 billones de pesos, donde la mayor parte proviene del sector del transporte (\$18.5 billones).

Adicional a este déficit en la inversión, de acuerdo con recientes estadísticas entregadas por el DANE (2018), en el primer trimestre del año 2018, el sector de la construcción presentó el mayor decrecimiento de todos los sectores del país: 8.2% con respecto al año anterior. Esta entidad explica que el mal desempeño de este sector fue consecuencia de una baja en la construcción de edificaciones residenciales y no residenciales (registró una caída de 9.2%), de una disminución en actividades especializadas para la construcción de edificaciones y obras de ingeniería (caída del 8.2%) y de un déficit en la construcción de carreteras (caída del 6.4%).

Este panorama nacional, aunque algo desalentador, debe promover la búsqueda e implementación de nuevas tecnologías, métodos de diseño, ensayos e investigaciones cuyo objetivo sea la generación de obras más económicas, sostenibles y de calidad; ya que de esta manera se lograrán soluciones eficaces y eficientes con los recursos limitados que se tienen. En el caso de la ingeniería de pavimentos, los diferentes métodos de diseño deben buscar la combinación más económica de espesores de capas y tipos de materiales, teniendo en cuenta las propiedades del suelo de subrasante, el tráfico al cual estará sometida la estructura durante su vida de servicio y las condiciones climáticas (Araya, 2011). Esto implica realizar cada una de las actividades necesarias de la manera correcta y anticiparse adecuadamente a aquellos factores que no se pueden controlar (Molenaar, 2013).

1.1. Antecedentes

Un examen de la evolución de los métodos de diseño de pavimentos revela un proceso de cambio que comenzó con procedimientos de prueba-error, los cuales gradualmente fueron evolucionando a ecuaciones de diseño empíricas basadas en la experiencia y en estudios sobre ensayos de desempeño de pavimentos.

Esta transformación ha estado acompañada del desarrollo del conocimiento sobre el comportamiento de los materiales, el entendimiento de los esfuerzos en el pavimento ante las cargas y la interacción con el entorno. La llegada de computadores de gran capacidad y su introducción incluso en lugares remotos, ha creado la posibilidad del uso práctico de soluciones analíticas para determinar esfuerzos y deformaciones en los pavimentos.

No obstante lo anterior, muchos países, particularmente los países en desarrollo, todavía se basan en los métodos de diseño con un gran componente empírico, esto debido a que los procedimientos de diseño analíticos o mecanicistas más sofisticados a menudo requieren demasiadas suposiciones con respecto al comportamiento del material y ensayos sobre los materiales complicados para ser de uso práctico directo.

Otra gran limitación que se ha encontrado en la literatura con respecto a la adopción de métodos mecanicistas, es la existencia de una brecha entre las actividades de investigación y la industria, esto debido a que las propuestas generadas por la investigación presentan limitaciones prácticas y económicas para ser utilizadas por las compañías (Edwards, 2007; Araya et al., 2011).

Los métodos de diseño empíricos, basados en valores de CBR (California Bearing Ratio) como estimativo de resistencia, fueron desarrollados a partir de la experiencia en vías existentes o en proyectos de investigación de gran envergadura como el *AASHTO Road Test*; mientras que los métodos mecanicistas, los cuales usan el módulo resiliente (Mr) como parámetro de diseño, requieren un entendimiento teórico para lograr extender su aplicación a diferentes condiciones. Estos dos métodos se deben considerar complementarios: los métodos empíricos requieren de una comprensión teórica para lograr ser extrapolados y aplicados en diferentes condiciones, mientras que los métodos mecanicistas requieren de información empírica para ser calibrados. Ninguno de ellos es ideal por sí solo, pero su combinación provee un componente básico para el diseño de pavimentos llamado método empírico-mecanicista (Araya, 2011).

Estudios realizados por diferentes autores como Uzan (1985, 2004) , Carvalho & Schwartz (2006), Mashayekhi et al. (2011) y Boone (2013), han evaluado las ventajas de emplear métodos que parten de la determinación del Mr para el diseño de pavimentos. Estos estudios han demostrado que el diseño mediante métodos con valores empíricos dan generalmente como resultado estructuras más robustas de lo necesario, en otras palabras, existe un sobredimensionamiento de la misma; Mashayekhi et al. (2011) demostró que los valores de espesores de capas pueden llegar a ser hasta 33% mayores.

En Colombia, las normas que fundamentan el diseño y la construcción de pavimentos tienen como fuente el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), el cual presenta un enfoque principalmente empírico. Cambios en las condiciones del clima y del tránsito a lo largo del tiempo, así como una inadecuada caracterización de los materiales, pueden hacer que este tipo de metodologías pierdan confiabilidad en la predicción de las dimensiones de la estructura de pavimento y, por consiguiente, generar costos adicionales e innecesarios. Lo crítico de esta situación, es que el tráfico y el clima en el país son dos factores muy cambiantes, y la caracterización de los materiales sigue siendo empírica (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007, 2015).

A pesar de la gran importancia ya resaltada de la compresión del Mr para el buen análisis de la estructura de pavimento (Li & Selig, 1994), los ensayos cíclicos que permiten determinar dicho módulo son complejos, los equipos son costosos y su ejecución consume una considerable cantidad de tiempo (Sas et al., 2015), además de requerir personal altamente entrenado; razones por las cuales el ensayo de Mr no se encuentra ampliamente disponible.

Es por lo anterior, que se han establecido correlaciones típicas entre el Mr y las propiedades índice de los suelos (George, 2004; Rahim, 2005), o con las propiedades de resistencia como el CBR (Heukelom & Klomp, 1962) o la resistencia a la compresión confinada (Hossain & Kim, 2014); incluso ensayos triaxiales estáticos han sido utilizados, como en los casos de Kim et al. (2001) y Patel et al. (2011). Este tipo de correlaciones proveen un nivel medio de exactitud (Ji et al., 2014).

El avance en la investigación sobre la respuesta de los suelos ante cargas cíclicas ha impulsado el deseo y la necesidad de obtener el valor de Mr de manera directa y no a partir de correlaciones, con el objetivo de generar menor incertidumbre en el diseño de pavimentos (Sas et al., 2015). Este problema ha sido estudiado con el fin de desarrollar métodos alternativos para determinar el Mr (Chaney et al., 1996; Smolen et al., 2006; Araya, 2011; Sas & Głuchowski, 2013; Sas et al., 2017).

Dentro de estos métodos, se encuentra uno que propone la modificación o extensión del ensayo de CBR, ajustado para simular las cargas cíclicas a las que está sometido un pavimento, mediante la realización de la prueba de CBR con aplicación de ciclo de carga; el cual se conoce como ensayo *CBR cíclico (cCBR)*. (Uzan, 1985, 2004; Araya, 2011; Sas & Głuchowski, 2013; Sas et al., 2017).

El principio del ensayo cCBR es usar el equipo tradicional de CBR y ejecutar un número de ciclos con respecto a los estándares básicos de la prueba original (Diámetro del pistón, volumen del molde, velocidad de aplicación de la carga, uso de sobrecargas, entre otras) (Sas et al., 2015). Investigaciones realizadas con este ensayo, han demostrado que el cCBR es útil para estimar el módulo resiliente, el cual puede ser usado en métodos con enfoque mecanicista de diseño de pavimentos, en ausencia de la infraestructura para ejecutar ensayos triaxiales cíclicos o estándares para módulo. Dicho de otro modo, la ventaja de integrar el ensayo de CBR tradicional en el enfoque de diseños mecanicistas mediante la implementación del ensayo cCBR, es que éste último se puede ejecutar en la mayoría de laboratorios donde se realizan ensayos de rutina (Araya et al., 2011).

Es por todo lo anterior que, se considera indispensable, para el buen ejercicio del diseño de pavimentos, la obtención directa del Mr. Esto permitirá el uso de métodos de diseño mucho más apropiados, que darán como resultado una optimización de los recursos. Adicionalmente, como se conoce que este ensayo es costoso y que son pocos los laboratorios que cuentan con la infraestructura para ejecutarlo en el país, se cree conveniente evaluar el ensayo de cCBR para obtener un Módulo Equivalente que pueda ser relacionado con el Mr, que de ser viable, sería un ensayo de menor costo y con un equipo que se puede encontrar en todos los laboratorios donde se realizan ensayos de rutina.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar, desarrollar y validar el ensayo de CBR cíclico (cCBR) como procedimiento de laboratorio para estimar el Módulo Resiliente (M_r) de suelos de subrasante de consistencia blanda de la zona lacustre de la ciudad de Bogotá.

1.2.2. Objetivos específicos

- Implementar de manera detallada el ensayo de CBR cíclico, para hallar el Módulo Equivalente (E_{equi}) en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Cuantificar los recursos (materiales, servicios, mano de obra, tiempo y equipo) requeridos para ejecutar el ensayo CBR cíclico, a fin de establecer su costo.
- Caracterizar y clasificar los suelos de subrasante de estudio de la ciudad de Bogotá, mediante ensayos granulométricos, límites de consistencia, CBR, PDC, módulo resiliente y E_{equi} .
- Establecer la relación entre el E_{equi} obtenido a través del CBR cíclico y el M_r del suelo de estudio.
- Establecer, de ser posible, correlaciones entre el CBR sin saturar, el número dinámico, el módulo resiliente, el módulo equivalente y la resistencia al corte no drenada, obtenida mediante la prueba rápida de corte del ensayo de M_r , para el suelo de estudio.

1.3. Organización de la tesis

El presente trabajo está organizado en 6 capítulos descritos a continuación:

Capítulo 1. Introducción: Se presenta un preámbulo al problema de investigación, partiendo de cifras internacionales y nacionales sobre inversión en infraestructura vial, así como de las ventajas y desventajas de los métodos de diseño de pavimentos existentes con el propósito de resaltar la relevancia y potencial de la investigación, al igual que su alcance y los principales objetivos.

Capítulo 2. Revisión bibliográfica: Contiene una revisión de la literatura referente al rol de la subrasante en los pavimentos y como ésta se caracteriza mecánicamente, se genera un resumen respecto a los métodos de diseño existentes y las variables de entrada, resaltando sus ventajas y desventajas; así como una línea de tiempo detallada de cómo se ha ideado y desarrollado el ensayo de CBR cíclico (cCBR) como alternativa para la obtención del módulo resiliente (M_r) de materiales de construcción de carreteras.

Capítulo 3. Ensayo CBR cíclico (cCBR): El capítulo presenta la propuesta detallada de la implementación del ensayo de cCBR para suelos de subrasante inalterados en el laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, allí se presentan los recursos utilizados para la ejecución de dicho ensayo.

Capítulo 4. Metodología y materiales: Como primera medida, se enseña la metodología manejada, partiendo de la zona de estudio, continuando con la mención de los ensayos ejecutados, y finalizando con la presentación de la caracterización y clasificación (mediante sistema SUCS) de los materiales de subrasante obtenidos de las exploraciones.

Capítulo 5. Resultados experimentales y análisis: Se presentan los resultados de los ensayos de resistencia y rigidez ($\Delta\sigma_f$, CBR, PDC, cCBR y Mr), así como sus respectivas observaciones, con el fin de determinar posibles correlaciones entre dichos resultados. Incluye un análisis estadístico, mediante intervalos de predicción, que permite validar la buena estimación del Mr a partir de los modelos constitutivos $k - \sigma_d$ y universal determinados a partir de los resultados del ensayo cCBR. Finalmente, se presenta el análisis de costos del ensayo cCBR.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones: Este capítulo corresponde a las conclusiones y recomendaciones más relevantes derivadas del estudio; se presenta un análisis sobre la viabilidad de la obtención del Mr a partir del ensayo cCBR en diferentes niveles de esfuerzo. Finalmente, se dan recomendaciones a tener en cuenta en futuras investigaciones sobre el tema, con las cuales sea posible extender este estudio a materiales para carreteras diferentes a los aquí estudiados.

Anexos: En esta sección se incluyen formatos de toma de datos y resultados de ensayos de laboratorio y campo ejecutados sobre todas las muestras analizadas, la descripción de los ensayos de caracterización y clasificación utilizados, así como la guía de laboratorio propuesta para la ejecución del ensayo de cCBR sobre muestra inalterada y las cotizaciones que se obtuvieron para establecer su respectivo precio comercial.

1.4. Referencias

- Araya, A. A. (2011). *Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements*. Delft University of Technology. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:1d964e6f-e7e5-4d2a-834b-db9b3504745f/datastream/OBJ/download>
- Araya, A. A., Huurman, M., & Molenaar, A. A. A. (2011). Integrating Traditional Characterization Techniques in Mechanistic Pavement Design Approaches. In *Transportation and Development Institute Congress 2011* (pp. 596–606). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41167\(398\)57](https://doi.org/10.1061/41167(398)57)
- Boone, J. (2013). *Comparison of Ontario Pavement Designs Using the AASHTO 1993 Empirical Method and the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Method*.

University of Waterloo. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10012/8047>

- Carvalho, R., & Schwartz, C. (2006). Comparisons of Flexible Pavement Designs: AASHTO Empirical Versus NCHRP Project 1-37A Mechanistic-Empirical. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1947(36), 167–174. <https://doi.org/10.3141/1947-16>
- Clavijo, S., Vera, A., & Vera, N. (2013). *La inversión en infraestructura en Colombia 2012-2020. Asociación Nacional de Instituciones Financieras (ANIF)*. Retrieved from [http://www.cvc.com.ve/docs/2016219124559Inversion en infraestructura Colombia 2013-2020.pdf](http://www.cvc.com.ve/docs/2016219124559Inversion%20en%20infraestructura%20Colombia%202013-2020.pdf)
- DANE. (2018). *Comunicado de prensa-PIB Primer trimestre del 2018*. Retrieved from http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/cp_PIB_ltrim18_produccion.pdf
- Drumm, Li, Reeves, & Madgett. (1996). Alternative Test Method for Resilient Modulus of Fine-Grained Subgrades. *Geotechnical Testing Journal*, 19(2), 141. <https://doi.org/10.1520/GTJ10337J>
- Edwards, J. P. (2007). *Laboratory Characterisation of Pavement Foundation Materials*. Loughborough University. Retrieved from https://www.lboro.ac.uk/media/wwlboroacuk/content/cice/downloads/publications/34_thesis.pdf
- George, K. P. (2004). *Prediction of resilient modulus from soil index properties*. Retrieved from https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/24156/dot_24156_DS1.pdf?
- Heukelom, W., & Klomp, A. (1962). Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. In *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements* (pp. 495–510). Ann Arbor. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/717112>
- Hossain, M. S., & Kim, W. S. (2014). *Estimation of Subgrade Resilient Modulus Using the Unconfined Compression Test*. Richmond.
- ITF. (2013). *Spending on transport infrastructure 1995-2011: Trends, policies, data*. Retrieved from <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/13spendingtrends.pdf>
- Ji, R., Siddiki, N., Nantung, T., & Kim, D. (2014). Evaluation of resilient modulus of subgrade and base materials in Indiana and its implementation in MEPDG. *The Scientific World Journal*, 2014, 14. <https://doi.org/10.1155/2014/372838>
- Kim, D.-S., Kweon, G.-C., & Lee, K.-H. (2001). Alternative method of determining resilient modulus of subgrade soils using a static triaxial test. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(1), 107–116. <https://doi.org/10.1139/cgj-38-1-107>
- Li, D., & Selig, E. T. (1994). Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(6), 939–957. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:6\(939\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:6(939))

- Mashayekhi, M., Amini, A. A., Behbahani, H., & Nobakht, S. (2011). Comparison of Mechanistic-Empirical and Empirical Flexible Pavement Design Procedures of AASHTO: a Case Study. In *5th International conference bituminous mixtures and pavements* (pp. 319–328).
- Matijošius, J., Vasiliauskas, A. V., Vasilienė-Vasiliauskienė, V., & Krasodomskis, Ž. (2016). The Assessment of Importance of the Factors that Predetermine the Quality of a Service of Transportation by Road Vehicles. *Procedia Engineering*, *134*, 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.034>
- Molenaar, A. A. A. (2013). Durable and sustainable road constructions for developing countries. *Procedia Engineering*, *54*, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.007>
- Patel, A., Kulkarni, M. P., Gumaste, S. D., Bartake, P. P., Rao, K. V. K., & Singh, D. N. (2011). A Methodology for Determination of Resilient Modulus of Asphaltic Concrete. *Advances in Civil Engineering*, *2011*, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2011/936395>
- Rahim, A. M. (2005). Subgrade soil index properties to estimate resilient modulus for pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, *6*(3), 163–169. <https://doi.org/10.1080/10298430500140891>
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *17*(2), 41–65. <https://doi.org/10.18359/rcin.1074>
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. (Ecoe Ediciones, Ed.) (1ra ed.). Bogotá D.C.
- Sas, W., & Gluchowski, A. (2013). Application of cyclic cbr test to approximation of subgrade displacement in road pavement. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, *12*, 51–61.
- Sas, W., Gluchowski, A., Gabrys, K., & Szymanski, A. (2015). Application of cyclic CBR test for the estimation of resilient modulus in the pavement construction. In *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development* (pp. 3747–3752). Institution of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1680/ecsmge.60678>
- Sas, W., Głuchowski, A., & Miturski, M. (2017). Studies on resilient modulus value from cyclic loading tests for cohesive soil. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation*, *49*(2), 117–127. <https://doi.org/10.1515/sggw-2017-0010>
- Smolen, J. M., Drumm, E. C., & Thomas, K. G. (2006). An Alternative Test for the Resilient Modulus of Fine Grained Subgrades. In *Pavement Mechanics and Performance* (Vol. 19, pp. 271–278). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40866\(198\)34](https://doi.org/10.1061/40866(198)34)
- The World Bank. (2017). GDP (current US\$). Retrieved January 30, 2019, from <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>
- Uzan, J. (1985). Extension of CBR Method to Highway Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, *111*(5), 561–569. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-)

947X(1985)111:5(561)

Uzan, J. (2004). Permanent Deformation in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 130(1), 6–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:1\(6\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:1(6))

Capítulo 2. Revisión bibliográfica

El desarrollo de una región a nivel general no es únicamente el resultado de factores de la producción privada como el empleo y el capital, sino también de su infraestructura (Rietveld, 1989). La habilidad de la economía de dicha región para crecer esta fundamentalmente determinada por los recursos disponibles para la sociedad y la eficiencia para usarlos (Ivanova & Masarova, 2013). Además, se sabe que una infraestructura vial de calidad también contribuye a mejorar las perspectivas de la economía de la región y de las firmas y organizaciones que allí se encuentren (Bryan et al., 1997).

Tal como lo plantean Haas et al. (2011), uno de los puntos destacados para una buena gestión vial, específicamente de los pavimentos, han sido los avances en los métodos de diseño de estas estructuras, con la inclusión de métodos mecanicistas y empírico-mecanicistas. El objetivo de los avances presentados en estos métodos de diseño es encontrar la combinación más económica y sostenible de espesores de capa y de tipos de materiales utilizados, teniendo en cuenta las variables del entorno como lo son las propiedades del subsuelo, el tránsito y el clima (Araya, 2011).

De acuerdo con Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015), la mayor parte de las estructuras que se diseñan y se construyen en Colombia y en el mundo son flexibles o cuentan con superficies construidas con capas asfálticas. Según estos autores, más del 90% de las vías del mundo y más del 65% de las vías en Bogotá son pavimentos asfálticos. Es por lo anterior que el uso de métodos de diseño de pavimentos flexibles cobra un papel fundamental en la infraestructura vial.

2.1. Rol de la subrasante en los pavimentos

El pavimento es una estructura multicapa de materiales seleccionados, colocados y compactados sobre el suelo de fundación, el cual puede ser el terreno natural o material de préstamo. Esta estructura debe comportarse como una plataforma de construcción en el corto plazo y como una estructura duradera en el largo plazo. Los requisitos que debe cumplir se pueden dividir en cuatro:

- Resistencia a la acumulación de deformación permanente dentro de cada capa.
- Capacidad para distribuir la carga aplicada por un vehículo a una magnitud que no dañará las capas subyacentes, particularmente la subrasante.
- Provisión de una base rígida adecuada sobre la cual se puedan compactar las capas superiores.

- Provisión de una base duradera para soportar las capas superpuestas a largo plazo en las condiciones de servicio.

La estructura de pavimento debe cumplir estas cuatro funciones principales sin fatiga excesiva, deformaciones permanentes significativas o deterioros debidos a factores ambientales como la temperatura y el agua (Edwards, 2007).

Una estructura de pavimento flexible esta generalmente compuesta por tres capas sobre la subrasante: una subbase granular, una base granular y una carpeta asfáltica. La mayoría de los pavimentos en países en vía de desarrollo, estan compuestos por unas capas gruesas de subbase y base sobre la subrasante (Figura 2.1). Por razones económicas, la carpeta asfáltica es delgada con una limitada función estructural en el pavimento, su principal función es dar protección contra el agua, e incluso en algunas ocasiones esta capa se omite por completo (Araya, 2011).

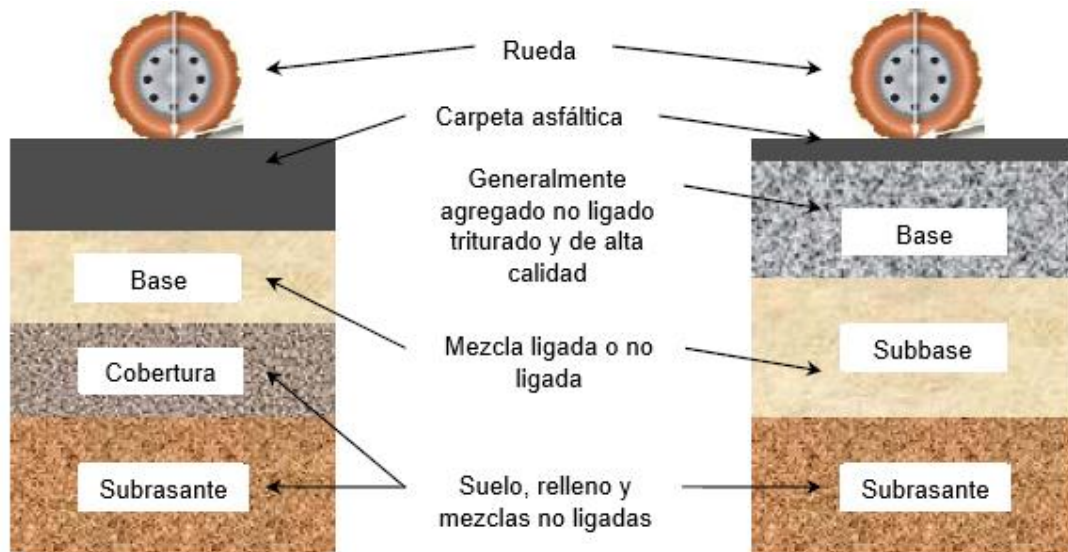


Figura 2.1 Comparación de las estructuras típicas de pavimentos en países industrializados (Izquierda) y países en vía de desarrollo (Derecha)

Fuente: Adaptado de Araya (2011)

La subrasante, por su parte, es la capa superior de la explanación (Sánchez & Campagnoli, 2016). De la calidad de esta capa depende, en gran medida, el espesor de las capas superiores de pavimento. Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las posibles variaciones de volumen (Montejo, 2006).

De acuerdo con Ahmed et al. (2008), la subrasante debe:

- Proveer una plataforma estable en la cual se podrá construir la vía.
- Limitar los asentamientos progresivos debidos a las cargas repetitivas del tráfico.

- Limitar los asentamientos por consolidación.
- Prevenir fallas masivas en pendientes.
- Restringir la contracción e hinchamiento debido a cambios de humedad.

La construcción de pavimentos flexibles sobre subrasantes de arcilla, como generalmente sucede en Bogotá, ha sido una tarea desafiante debido al mayor costo de la construcción y al bajo desempeño. Los suelos arcillosos tienen un drenaje pobre y poca resistencia en condiciones de elevada humedad. Las subrasantes conformadas principalmente por arcillas, al debilitarse por la presencia de una considerable cantidad de agua, tienden a permitir la penetración de los materiales granulares de la subbase y base dentro de ella cuando el pavimento es sometido a las cargas vehiculares. Como resultado de esto, los pavimentos diseñados exhiben superficies onduladas y grietas a lo largo de las zonas donde las ruedas pasan, produciendo asentamientos excesivos y/o diferenciales.

La deformación permanente es el resultado de la densificación y las deformaciones repetitivas de las capas de pavimento, a esta deformación los suelos de subrasante hacen una contribución importante, especialmente las arcillas (Satyanarayana Reddy & Rama Moorthy, 2005).

La gran mayoría de agencias viales incorporan las propiedades del suelo de subrasante en el proceso de diseño de pavimentos; no obstante, es importante resaltar que dichas propiedades y el contenido de agua no están directamente consideradas en la evaluación del desempeño y la capacidad de servicio de los pavimentos.

El módulo resiliente del suelo es la propiedad principal que representa la capacidad de soporte o resistencia de la subrasante. Una de las grandes diferencias entre métodos mecanicistas y empírico-mecanicistas con respecto a los métodos empíricos, es la adopción del módulo resiliente como el parámetro idóneo para caracterizar la calidad de soporte de la subrasante (Ahmed et al., 2008).

Es por lo anterior que una adecuada caracterización, mediante el módulo resiliente de los suelos de subrasante, especialmente aquellos arcillosos, permitirá un diseño de pavimento más eficiente en cuanto a espesores de capas y con mejor desempeño debido a una menor acumulación de deformación permanente que puedan llevar al ahuellamiento y posterior falla de la estructura.

2.2. Cargas sobre el pavimento

El efecto de las cargas sobre una estructura de pavimento ya sea durante su construcción o su servicio, puede ser evaluado desde dos perspectivas clave: la primera de ellas es la magnitud de la carga, y la segunda es el número de aplicaciones. Para propósitos de diseño, estos dos factores son simplificados de tal manera que pueden ser expresados como el número de pasadas de un eje estándar equivalente (Edwards, 2007; Araya, 2011). No obstante, desde un punto de vista más profundo, los esfuerzos a los que está sometido un pavimento son más complejos, ya que factores como como la duración, la frecuencia y

la magnitud no necesariamente son consistentes a lo largo de toda la vida útil de la estructura. Cuanto más profundo se esté dentro del pavimento, más tiempo durará el pulso de carga para un vehículo determinado que viaja a la misma velocidad, además, la magnitud del esfuerzo varía según el tráfico y las propiedades de las capas superiores del pavimento.

Las cargas de las ruedas en movimiento resultan en unos patrones de esfuerzo relativamente complejos. Tal como se puede observar en la Figura 2.2, el movimiento de la rueda hace que el elemento de pavimento experimente una combinación de esfuerzos verticales (σ_v), horizontales (σ_h) y de corte (τ), los cuales cambian en magnitud y sentido con el tiempo, y causan una rotación de los esfuerzos principales. Se ha encontrado que dicha rotación de los esfuerzos no genera una influencia significativa en el módulo de rigidez, pero sí la tiene en la deformación permanente (Brown, 1996; Kim & Tutumluer, 2005; Edwards, 2007; Araya, 2011).

A pesar de que la rotación de los esfuerzos principales no es esencial para poder medir directamente el módulo de rigidez del material, existen algunos ensayos que buscan la comprensión de dicho fenómeno (Edwards, 2007; Araya, 2011). La capacidad de algunos equipos utilizados en ensayos para reproducir la combinación de esfuerzos antes descrita por el paso de una rueda se describe más adelante.

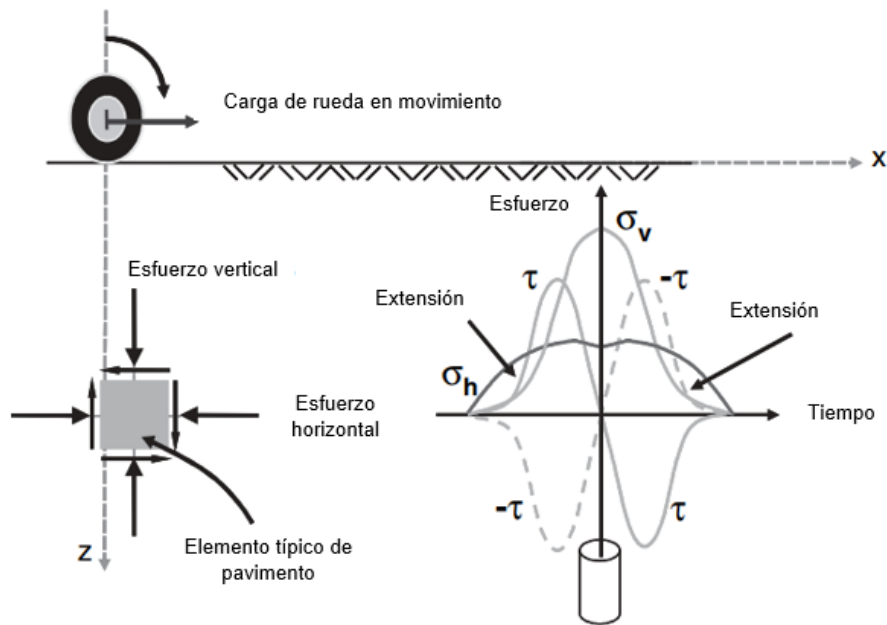


Figura 2.2 Régimen de esfuerzos experimentado por un elemento de pavimento bajo una cara de rueda en movimiento

Fuente: Adaptado de Kim & Tutumluer (2005)

2.3. Diseño de pavimentos flexibles

Antes de 1920, el diseño de pavimentos consistía básicamente en definir unos espesores de las capas de materiales que aportaran resistencia y protección a una subrasante blanda y débil; los pavimentos eran diseñados para evitar la falla por corte de ésta. Los ingenieros utilizaban su experiencia, basada en las fallas y éxitos de proyectos previos, y a medida que dicha experiencia evolucionaba, fueron desarrollados una gran cantidad de diseños de pavimentos fundamentados en la resistencia al corte de la subrasante.

Desde entonces, el volumen de tráfico a lo largo del tiempo ha aumentado y los criterios de diseño han cambiado. Así como proporcionar un soporte adecuado a la subrasante era importante, evaluar el desempeño del pavimento a través de la calidad de servicio al usuario y otros factores que incrementan la tasa de deterioro de la estructura, cobraron igual importancia. El desempeño se convirtió en el foco del diseño de pavimentos, métodos basados en servicialidad fueron desarrollados, basados en pistas de prueba y en datos de ensayos de laboratorio. Un ejemplo seminal de esto fue el proyecto “*AASHTO Road Test*”, realizado en la década de 1960, a partir del cual se desarrolló la guía de diseño AASHTO (Carvalho, 2006).

A pesar de que proyectos como el de la AASHTO fueron ejecutados mediante investigaciones que justifican los juicios de ingeniería, y que se han realizado varias modificaciones a los procesos de diseño originalmente propuestos, estos métodos están basados en ecuaciones empíricas de desempeño obtenidas de las condiciones propias del lugar de investigación, en otras palabras, las correlaciones obtenidas son el resultado de proyectos ejecutados en una sola localización geográfica, con lo cual se dificulta incorporar diferentes condiciones climáticas en la interpretación de los resultados; además, las pruebas se limitan a un tipo de subrasante en todas las secciones y sólo a un número limitado de materiales granulares y de rodadura diferentes. Estas limitaciones, junto con otros factores como el desarrollo de las técnicas de construcción, las diferentes condiciones de drenaje y los efectos a largo plazo en los pavimentos, causados por el clima y el envejecimiento, hacen que el enfoque de diseño empírico sea confuso y difícil de aplicar, lo cual conllevó a la creación de algunos enfoques diferentes para el diseño (Erlingsson, 2004).

2.3.1. Métodos de diseño empíricos

En el caso de los métodos de diseño empíricos, se correlaciona el comportamiento del pavimento in-situ, mediante mediciones y observaciones en campo, con aquellos factores que causan la degradación de la estructura de pavimento. Dentro de los factores más influyentes se encuentra la temperatura y la precipitación (a manera general las condiciones ambientales), las cargas producidas por el flujo vehicular, el tipo de subrasante, las deficiencias en el proceso constructivo y los tipos de materiales de construcción utilizados. Estos factores son medidos y controlados durante las fases de estudio, para que puedan

ser correlacionados con los mecanismos de degradación, y de esta manera se crea el método de diseño.

Los mecanismos principales de degradación que se intentan controlar en las metodologías empíricas, de igual validez en las empírico-mecanicistas, son la fatiga y el exceso de deformación permanente. El mecanismo de fatiga se evalúa en la fibra inferior de la capa asfáltica, y se genera cuando se presenta una alta deformación a tracción de dicha capa; por otra parte, la deformación permanente es la deformación vertical residual que se acumula con el paso de los vehículos y que puede generar fallas estructurales y funcionales en el pavimento.

La deformación permanente total de un pavimento flexible se entiende como la suma de las deformaciones producidas en cada una de las capas de la estructura, no obstante, los métodos de diseño empíricos únicamente contemplan que dicha deformación permanente ocurre en la subrasante, lo cual ya presenta una de las primeras limitaciones de esta metodología. Esta suposición se basa en que la subrasante, en comparación con las otras capas de pavimento, presenta la menor rigidez y la mayor probabilidad de exhibir elevados contenidos de agua.

Adicionalmente, es posible establecer que los métodos de diseño empíricos no tienen en cuenta que:

- Dentro de las capas elaboradas con mezclas asfálticas, las cuales presentan un comportamiento viscoso, un incremento en la temperatura disminuye su rigidez, lo cual conlleva a un incremento en las deformaciones presentadas en el pavimento.
- Las capas granulares juegan un papel importante en la deformación permanente que presenta una estructura de pavimento, especialmente cuando la capa asfáltica de rodadura es delgada y no tiene una función estructural, ya que en estos casos las capas granulares son las que reciben casi el total de las cargas (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

Esta última consideración presenta gran relevancia en Colombia, ya que este tipo de estructuras con capas asfálticas delgadas son utilizadas en vías de bajos volúmenes de tránsito, las cuales están incluidas en la red secundaria y terciaria del país, y dichas redes representan aproximadamente el 90% de toda la red nacional de carreteras (MINTRANSPORTE, 2008; Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

Según Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2007), existe evidencia de investigaciones teóricas y experimentales que demuestran que la subrasante no es la única en sufrir deformación permanente. Un ejemplo de lo anterior fue un ensayo ejecutado entre 1968 y 1971 en una pista de prueba en Alconbury Hill (Inglaterra), en la cual se usaron diferentes ejes de cargas con pesos similares a los encontrados en un pavimento. Esta investigación demostró que, tal como se muestra en la Figura 2.3, la deformación permanente se acumuló en cada una de las capas de pavimento ensayado durante los cuatro años de duración de la prueba.

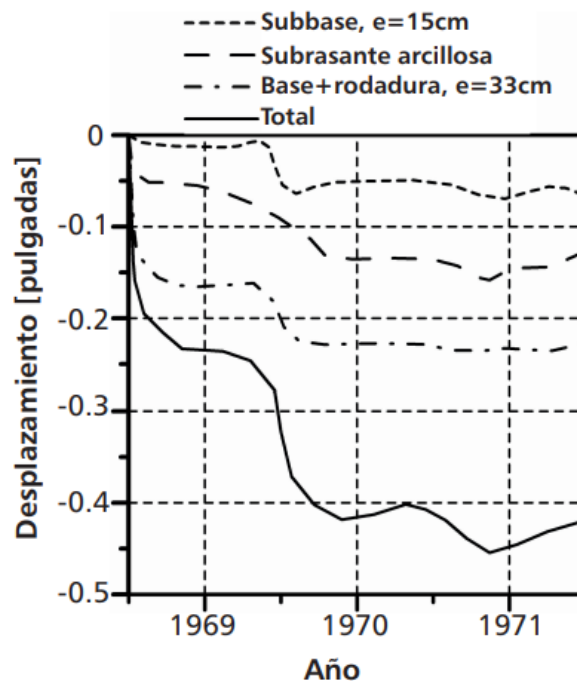


Figura 2.3 Desarrollo de la deformación permanente en la pista de prueba en Alconbury Hill

Fuente: Adaptado por Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2007) de la investigación de Lister (1972)

Además de no tener en cuenta que parte de la acumulación de la deformación permanente puede presentarse en las capas de subbase y base, estas metodologías requieren ser extrapoladas si se requiere la utilización de materiales o estructuras diferentes a las empleadas durante el estudio de campo, lo cual puede resultar costoso y de difícil determinación numérica y experimental. Además, establecer un método de diseño de esta naturaleza, necesita una gran inversión en tiempo y dinero para la realización de los ensayos a gran escala (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

Asimismo, nuevos materiales empezaron a ser utilizados en las estructuras de pavimento, los cuales proveían a la subrasante de una mejor protección, pero cada uno de ellos incorporaba su propio mecanismo de falla, razón por la cual, sumado a las limitaciones ya expuestas, un nuevo criterio de diseño fue requerido para incorporar aquellos parámetros ignorados (Carvalho, 2006).

El método de diseño empírico más conocido es el *CBR-method*, el cual fue desarrollado por la división de carreteras de California a finales de la década de 1930, y consiste en determinar la calidad de los materiales y los espesores de las capas de pavimento a partir el valor de CBR (Figura 2.4) (Araya, 2011). Este enfoque tiene algunas ventajas y desventajas: Una de las ventajas es la simplicidad con la que se puede realizar la prueba de diseño, pero una desventaja del procedimiento es que la prueba es empírica (Mahabubuzzaman, 2001).

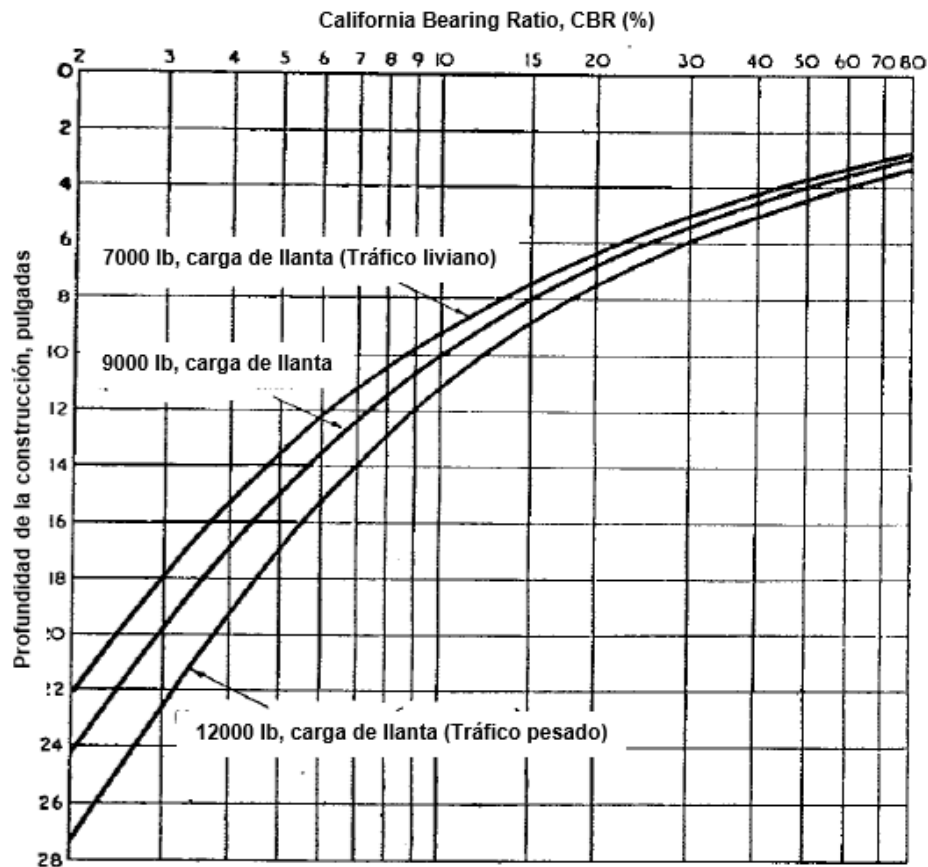


Figura 2.4 Curvas de diseño para espesor de capa a partir del CBR-method

Fuente: Adaptado de Araya (2011)

Aunque dicho valor es posible determinarlo a través de un ensayo estándar, años más tarde se presentó la posibilidad de determinarlo a partir de correlaciones con el ensayo de penetrómetro dinámico de cono (PDC), dada la practicidad de este último en comparación con el primero (Araya, 2011).

2.3.1. Métodos de diseño mecanicistas

A diferencia de los métodos empíricos, los métodos mecanicistas tienen en cuenta como el estado de esfuerzos y de deformaciones que experimentan las capas de pavimento influyen en su comportamiento (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007). Sobre la base de los valores críticos de esfuerzos y deformaciones, se puede estimar el desempeño a largo plazo y, por lo tanto, la vida útil, que es una función de mecanismos de falla como la fatiga y el ahuellamiento (Araya, 2011).

En este enfoque analítico, el pavimento se trata como una estructura y su comportamiento mecánico se evalúa de una manera similar a la utilizada para las estructuras de concreto y acero. Un requisito previo que condiciona el éxito del enfoque mecanicista es que el

comportamiento de los materiales constituyentes se entienda correctamente. En los pavimentos flexibles, particularmente cuando no tienen superficie de rodadura o esta superficie es delgada, las capas granulares desempeñan un papel estructural importante en el comportamiento general del pavimento (Araya, 2011).

Por ende, el enfoque del diseño mecanicista se basa en las teorías de la mecánica para relacionar el comportamiento y el desempeño estructural del pavimento con las cargas del tráfico y la influencia del medio (Carvalho, 2006). Una desventaja de este enfoque es que es estrictamente teórico y no incorpora el desempeño del pavimento observado in-situ. Además, la suposición de un comportamiento elástico-lineal del material es generalmente incompatible con la predicción de las fallas no lineales que se pueden presentar en el pavimento. Otra limitación significativa de estos métodos puramente mecánicos, es que el desempeño del pavimento se define en términos de mecanismos de falla y no de respuestas estructurales (Boone, 2013).

Se ha avanzado en los últimos años en piezas aisladas del problema de la predicción del desempeño mecanicista, pero la realidad es que todavía no se dispone de métodos puramente mecanicistas para el diseño práctico de pavimentos. (Carvalho, 2006).

Es por lo anterior que, los métodos empíricos y mecanicistas se deben considerar complementarios. Los métodos empíricos requieren de una comprensión teórica para lograr ser extrapolados y aplicados en diferentes condiciones, mientras que los métodos mecanicistas requieren de información empírica para ser calibrados. Ninguno de estos dos métodos es ideal por sí solo, pero la combinación de ellos provee un componente básico para el diseño de pavimentos llamados métodos empírico-mecanicistas (Araya, 2011).

2.3.2. Métodos de diseño empírico-mecanicistas

Los métodos empírico-mecanicistas representan un avance de los métodos empíricos. El estado de esfuerzos y deformaciones inducidas en una estructura de pavimento debido a las cargas del tránsito y las condiciones ambientales se predice utilizando la teoría de la mecánica, mientras que los modelos empíricos vinculan estas respuestas estructurales con las predicciones de falla (Carvalho, 2006). Estos métodos ofrecen las ventajas del diseño mecanicista, al tiempo que abordan sus principales limitaciones (Boone, 2013).

A pesar de ser una metodología diferente a la puramente empírica, estos dos enfoques presentan connotaciones similares, un ejemplo de esto, es que el criterio de diseño no cambia: el pavimento puede fallar por acumulación de fatiga o por exceso de deformación vertical en la subrasante. Es decir, este método también ignora el hecho de que las capas de subbase y base igualmente aportan a la deformación permanente total (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

Los primeros métodos de diseño presentados que tuvieron en cuenta los modos de falla por fatiga y deformación permanente fueron el *método de diseño de Shell* en 1977 y el *método del Instituto del Asfalto* en 1982. Estos métodos fueron los pioneros en utilizar la

teoría de la mecánica lineal y elástica para calcular la respuesta estructural en combinación con modelos empíricos, para predecir el número de repeticiones a la falla en pavimentos flexibles.

La principal desventaja de esta metodología, radica en que el cálculo de los esfuerzos y deformaciones se realiza bajo el supuesto de que el pavimento es una estructura multicapa elástico-lineal, isotrópica y homogénea, lo cual se asume de una manera muy simplista, bajo la justificación de que en un ciclo de carga la deformación permanente es muy pequeña en comparación con la resiliente (Carvalho, 2006; Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007). Adicionalmente, este método también presenta limitaciones ya que no tiene en cuenta las diferentes geometrías que puede presentar una estructura de pavimento (se supone una extensión infinita de las capas en sentido horizontal). Los parámetros elásticos aquí usados, pueden ser calculados por medio de ensayos de laboratorio o por retrocálculo (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

Es por lo anterior que, un factor muy importante cuando se utiliza un método de diseño empírico-mecanicista es la necesidad de utilizar equipos de ensayo y configuraciones en el laboratorio que simulen adecuadamente los aspectos más importantes del comportamiento real de un pavimento. De lo contrario, no se puede esperar que las predicciones reflejen los factores y resultados del entorno real o predigan adecuadamente el desempeño. Este enfoque, descarta algunas de las pruebas clásicas que se han utilizado durante mucho tiempo en el diseño estructural de pavimentos, como lo es la prueba CBR, la cual es reemplazada por pruebas que darán resultados más confiables y, por lo tanto, conducirán a decisiones más eficientes con respecto a la construcción vial (Erlingsson, 2004).

Para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones, se puede hacer uso de software especializados, los primeros de ellos desarrollados en los años 60. La metodología consiste en introducir al programa parámetros de entrada como lo son la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (Por ejemplo, el módulo resiliente, el módulo elástico, la relación de Poisson) y un predimensionamiento del espesor de las capas, con el fin de obtener los estados de esfuerzo y deformación. Una vez calculados dichos estados, se comparan con aquellos valores admisibles, y en un proceso iterativo (aumentando o disminuyendo los espesores de las capas) se determinan las dimensiones definitivas que conformarán el pavimento (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

El método de diseño empírico-mecanicista aún está en progreso; existen algunas limitaciones que restringen su aplicación, como el desarrollo de factores de calibración y funciones de transferencia. Sin embargo, en el proceso de desarrollo, existe una necesidad urgente de validación de resultados y comparación de éstos con métodos más antiguos de diseño de pavimentos (Mashayekhi, Amini, Behbahani, & Nobakht, 2011).

Como se mencionó anteriormente, estos métodos requieren propiedades de rigidez de los materiales, siendo la más conocida de todas el módulo resiliente (M_r), el cual es determinado a partir de un ensayo estándar o de correlaciones (normalmente con el CBR).

No obstante, en los últimos años, dada la baja disponibilidad de la infraestructura para la ejecución del ensayo estándar, y con el objetivo de determinar un estimativo del Mr de una manera más económica, práctica y sin correlaciones con ensayos empíricos, se ha comenzado a evaluar la viabilidad de ensayos como el CBR cíclico (cCBR).

2.3.3. Diseño de pavimentos en Colombia

El diseño y construcción de pavimentos en Colombia tiene como fuente las normas de enfoque empírico presentadas por el INVIAS, con las cuales se reconoce que se puede llegar a diseños de pavimentos más robustos de lo requerido, generando costos adicionales e innecesarios, debido a no tener en cuenta cambios en las condiciones del clima y del tránsito a lo largo del tiempo, así como una inadecuada caracterización de los materiales, lo cual es crítico en el país (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

En primera medida, el parque automotor en el país se encuentra en constante incremento, cifras presentadas por el Ministerio de Transporte (2000) muestran que en Colombia, entre 1970 y 2000, se presentó un crecimiento anual promedio de 4.6%; estadísticas más recientes (2004-2015) reportan que, únicamente en Bogotá, este crecimiento promedio anual fue un 6% aproximadamente (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015). Además, según el Ministerio de Transporte (2010), Colombia pasó de tener 12.920 vehículos-kilómetros por año en 1996 a 18.039 vehículos-kilómetros por año en 2009, esto representa un crecimiento anual cercano al 4%. Adicional al incremento del parque automotor, otro factor que influye en la condición cambiante del tránsito en el país es que en muchas ocasiones los pesos máximos permitidos por ley son excedidos (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

En cuanto al clima, estudios realizados por el IDEAM (2001) muestran que la amplitud diaria de la temperatura en Colombia es mucho mayor que la de las medidas mensuales durante el año. También identificaron que se pueden llegar a presentar variabilidades interanuales de 2°C en algunas regiones del país debido a los fenómenos como “El niño” y “La niña”, y que la precipitación puede aumentar, presentándose periodos de lluvia de hasta dos meses más de lo normal por año.

En cuanto a la caracterización de los materiales, debido a la naturaleza empírica de los ensayos utilizados, solo es posible obtener medidas indirectas de “calidad” y en algunos casos valores de resistencia al corte, mas no valores de rigidez y de resistencia a la deformación permanente, los cuales, como ya se mencionó anteriormente, son valores fundamentales para una adecuada caracterización de los materiales y un posterior diseño eficiente de la estructura de pavimento.

En el método de diseño INVIAS, la subrasante se caracteriza por medio del módulo resiliente, no obstante, como en la práctica la obtención de este valor a través de ensayos es de difícil determinación, tanto por lo costoso del ensayo como por la falta de estos equipos en muchos de los laboratorios del país, lo que se hace es determinar el valor del

módulo a través de correlaciones empíricas con el CBR (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007, 2015).

En cuanto al precio, un ensayo de módulo resiliente sobre muestra inalterada cuesta cerca de 1'450.000 COP, mientras que un CBR alrededor de 135.000 COP (Escuela Colombiana de Ingeniería, 2018), lo cual vuelve mucho más atractivo el uso del segundo. Por otra parte, respecto a la disponibilidad en el país de equipos para determinar Mr, ésta es limitada ya que se encuentran principalmente en universidades de prestigio, donde no todas lo prestan como servicio externo, y en algunos laboratorios certificados en las ciudades más grandes del país, sin contar con la posibilidad de desarrollar este ensayo en lugares remotos; esto contrasta con el equipo utilizado para determinar el CBR, el cual es posible encontrarlo en cualquier laboratorio que presente servicio de ensayos de rutina para pavimentos (Universidad Militar Nueva Granada, 2012; Universidad EAFIT, 2017; Escuela Colombiana de Ingeniería, 2018; Universidad de los Andes, 2018; E.I.E Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S., 2018; Pontificia Universidad Javeriana, 2019).

Adicionalmente, es importante resaltar que el uso de correlaciones genera grandes incertidumbres, debido a la naturaleza de la carga monotónica usada, así como por los elevados niveles de esfuerzo a los que es sometida la muestra. Por tanto, para el caso colombiano, donde se cuenta con una gran variedad de tipos de suelos, escoger de manera arbitraria una ecuación empírica puede llevar a un diseño de pavimento inadecuado (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

2.4. Parámetros de diseño de pavimentos

Existen diferentes parámetros de diseño, el uso de ellos depende del método empleado: algunos de ellos tienen un carácter empírico, como el CBR y el PDC, mientras que otros presentan un enfoque más mecanicista, como es el caso del Mr. No obstante, no se puede olvidar que a lo largo de los años se han establecido una gran variedad de correlaciones entre todos ellos.

2.4.1. Relación de soporte de California (CBR)

La relación de soporte de California (CBR) para el diseño de pavimentos fue usada en primer lugar por la División de Carreteras de California, como resultado de algunas investigaciones realizadas entre 1928 y 1929. Dichas investigaciones mostraron que los principales tipos de falla en pavimentos son: (i) Desplazamiento lateral de la subrasante como resultado de la absorción de agua por parte del pavimento, (ii) Asentamientos diferenciales de los materiales que se encuentran debajo de la estructura, y (iii) Deformación excesiva de los materiales. Con el objetivo de predecir el comportamiento de dichos materiales usados en la construcción de pavimentos, el ensayo de CBR fue establecido en 1929. Este ensayo fue ejecutado en una gran cantidad de materiales típicos

(piedra triturada de alta calidad), los cuales se consideraron como la muestra patrón, en otras palabras, el promedio de dichos ensayos fue designado como el 100% del CBR.

Este ensayo es una prueba de penetración, los resultados se expresan como la relación, en porcentaje, del esfuerzo requerido para penetrar cierta profundidad en la muestra evaluada y en la muestra patrón, tal como se muestra en la Ecuación 2-1 (Mahabubuzzaman, 2001). A regla general, el CBR decrece con el aumento de la penetración, no obstante, hay casos en los cuales dicha regla no se cumple (Yoder & Witczak, 1975).

$$CBR = \frac{\text{Esfuerzo en el suelo ensayado}}{\text{Esfuerzo en la muestra patrón}} * 100$$

Ecuación 2-1

Dado que el CBR es el porcentaje de una carga estándar, es posible que en algunos casos el valor reportado supere el 100%. Generalmente, el valor de CBR se calcula a una penetración de 2.54mm (0.1") para propósitos de diseño, no obstante, si la relación a 5.08mm (0.2") es mayor, se usa dicho resultado (Mahabubuzzaman, 2001). Los valores obtenidos en la muestra patrón son los siguientes:

Tabla 2.1 Valores de esfuerzo de muestra patrón para cálculo de CBR

Penetración (pg)	Esfuerzo (psi)
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300
0.5	2600

Fuente: Adaptado de Yoder & Witczak (1975)

2.4.1.1. Ensayo estándar de CBR

Todas las variables de este ensayo se han estandarizado, de acuerdo con INVIAS (2013), el ensayo de *CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada (INV-E-148-13)*, consiste en usar una muestra de suelo en un molde de 152.4mm de diámetro y 177mm de altura, tomada directamente del terreno o preparada en el laboratorio, y penetrarla con un pistón circular de 1935mm², a una velocidad de 1.27mm/min; de dicho ejercicio se toma nota del esfuerzo requerido para penetrar el suelo 2.54mm y 5.08mm; durante la penetración se hace uso de unas sobrecargas, las cuales producen una presión equivalente a la originada por todas las capas de pavimento que se van a construir sobre el suelo de estudio (Figura 2.5), mínimo se requiere la utilización de dos de ellas.

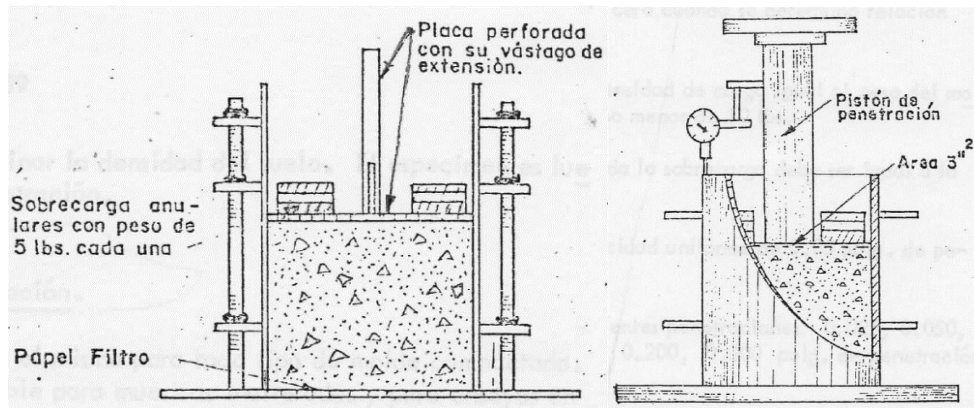


Figura 2.5 Equipo de ensayo de CBR en laboratorio

Fuente: Tomado de Ramírez Gómez (1983)

Adicionalmente, si decide saturarse la muestra, debe permanecer en inmersión por un periodo entre 1 a 10 días, con las respectivas sobrecargas, antes de la penetración (Mahabubuzzaman, 2001; Araya, 2011). Este ensayo, además de permitir el uso de muestras inalteradas tomadas directamente de la subrasante, puede ser ejecutado in-situ (Hight & Stevens, 1982), tal como lo establece la norma *ASTM D4429-09a (Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place)* (ASTM, 2018).

El ensayo de CBR es uno de los procedimientos más populares a nivel mundial y uno de los parámetros de diseño de pavimentos más utilizado en las diferentes metodologías tradicionales existentes, especialmente en países en desarrollo. Algunos de dichos métodos de diseño son el ya mencionado *CBR-method*, el AASHTO y el TRRL, todos son considerados empíricos. Incluso, algunos procedimientos de diseño con un enfoque más mecanicista, tal como el método Shell, se basan en el valor de CBR para obtener, a través de correlaciones empíricas, parámetros fundamentales de resistencia, requeridos como variables de entrada en los cálculos de los esfuerzos y las deformaciones del pavimento (Sweere, 1990).

De acuerdo con Al-Amoudi et al. (2002) y Kumar & Pavithra (2016), la importancia de la prueba de CBR surgió de los siguientes dos hechos: (i) Para casi todas las tablas de diseño, los materiales no ligados se caracterizan básicamente en términos de sus valores de CBR cuando se compactan en capas de pavimento y (ii) El valor de CBR se ha correlacionado con algunas propiedades fundamentales de suelos, además, dado que estas correlaciones están actualmente disponibles para los ingenieros en ejercicio, quienes han adquirido una amplia experiencia con ellas, la prueba CBR sigue siendo una prueba popular.

En cuanto a las correlaciones del CBR con propiedades fundamentales, algunas de ellas son el índice de plasticidad, la distribución granulométrica, la resistencia al corte, la densidad y el contenido de humedad (Yoder & Wiczak, 1975; Choudhary & Joshi, 2014;

Talukdar, 2014; Nguyen & Mohajerani, 2015; Araujo & Ruiz, 2016; Rehman et al., 2017; Dave et al., 2017; Katte et al., 2019).

2.4.1.2. Factores que influyen el valor de CBR en los suelos

La literatura ha mostrado que los principales factores del suelo que afectan el CBR son la textura, la densidad y la humedad, además del tipo de material ensayado. Por ejemplo, los suelos granulares no son afectados considerablemente por cambios volumétricos durante el periodo de inmersión y, por tanto, las sobrecargas no son fundamentales durante la ejecución del ensayo. En contraste, los suelos arcillosos, que son afectados por cambios volumétricos en presencia de agua, presentarán un valor de CBR que dependerá en gran medida de la magnitud de la sobrecarga utilizada (Yoder & Witczak, 1975). Existe evidencia de diferentes investigaciones sobre el comportamiento del CBR, con y sin inmersión, en función de diferentes propiedades del suelo (Talukdar, 2014; Araujo & Ruiz, 2016; y Katte et al., 2019).

Araujo & Ruiz (2016) evaluaron 75 muestras de tres zonas de Perú: La ciudad de Pirua, donde los suelos son predominantemente arcillas, arenas arcillosas, arenas limosas y limos de baja plasticidad; la provincia de Paita, con suelos arcillosos; y la provincia de Morropón, donde los suelos consisten en gravas y arenas arcillosas y limosas.

Para esta gran variedad de suelos, los autores lograron determinar ocho modelos de regresión, con los cuales se observó la influencia de diferentes factores en el valor de CBR saturado. Así como no fue posible encontrar una correlación entre el CBR y factores como el porcentaje de arenas, el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), variables como el porcentaje de finos, el índice de plasticidad (IP), la densidad seca máxima (MDD) y, especialmente, el porcentaje de gravas y el contenido de humedad óptimo (OMC), se consideraron influyentes (Tabla 2.2 y Figura 2.6).

Tabla 2.2 Correlaciones y parámetros estadísticos de modelos propuestos para suelos granulares y finos de Perú

Modelo	Ecuación	R	R ²
1	$CBR = 0.836 * \%Gravas + 11.378$	0.84	0.70
2	$CBR = -0.203 * \%Arenas + 36.687$	0.12	0.02
3	$CBR = -0.785 * \%Finos + 60.185$	0.76	0.58
4	$CBR = -1.588 * LL + 73.734$	0.60	0.35
5	$CBR = -2.796 * LP + 80.146$	0.45	0.21
6	$CBR = -1.778 * IP + 46.502$	0.53	0.28
7	$CBR = 103.34 * MDD - 174.71$	0.74	0.54
8	$CBR = -6.055 * OMC + 91.368$	0.81	0.66

Fuente: Adaptado de Araujo & Ruiz (2016)

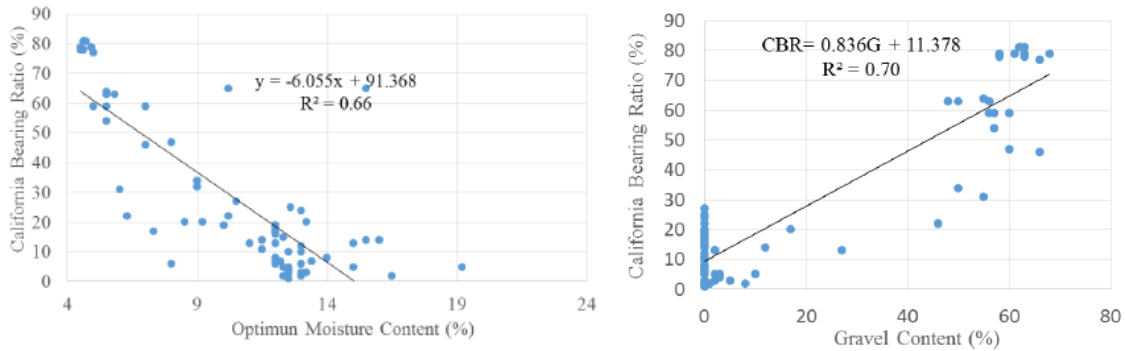


Figura 2.6 Influencia de la humedad óptima y el contenido de grava en el valor de CBR con inmersión en suelos peruanos

Fuente: Tomado de Araujo & Ruiz (2016)

Es importante resaltar que, tal como lo señalan los autores, los modelos presentados no son recomendables para suelos finos sino para suelos granulares, a pesar de presentar elevados valores de correlación.

Por su parte, estudios realizados por Katte et al. (2019), quienes evaluaron gravas lateríticas (suelos típicos de Camerún) sin inmersión, demostraron que el valor de CBR disminuye a medida que también lo hace la humedad óptima, tal como se observa a la derecha de la Figura 2.7. Si se compara el comportamiento de dichas muestras con las evaluadas en Perú (Figura 2.6a), parece que el proceso de inmersión genera una mayor dispersión al correlacionar la humedad con el CBR, en otras palabras, el CBR sumergido tiende a ser más independiente de la humedad óptima que el CBR sin inmersión.

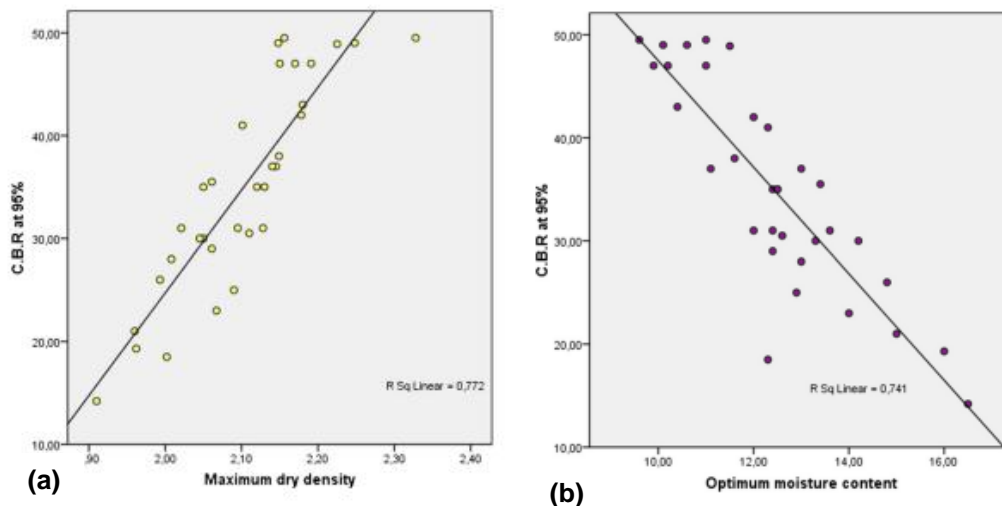


Figura 2.7 (a) Influencia de la densidad seca máxima (en t/m^3) y (b) del contenido de humedad óptimo (en %) en el valor de CBR sin inmersión en suelos granulares

Fuente: Tomado de Katte et al. (2019)

En cuanto a la densidad seca máxima, tal como se observa en la Figura 2.7a, es posible concluir que un aumento en la densidad incrementa el CBR. Este comportamiento es de esperarse, ya que un material con mayor densidad presenta menos vacíos y, por ende, una mayor resistencia.

Adicionalmente, la granulometría también presenta cierta influencia en el valor de CBR, las investigaciones han demostrado que un aumento en el porcentaje de gravas tiende a aumentar el CBR, mientras que un aumento en los limos y las arcillas lo disminuyen, tal como se observa en la Figura 2.6 y Figura 2.8 (Talukdar, 2014; Araujo & Ruiz, 2016; Katte et al., 2019).

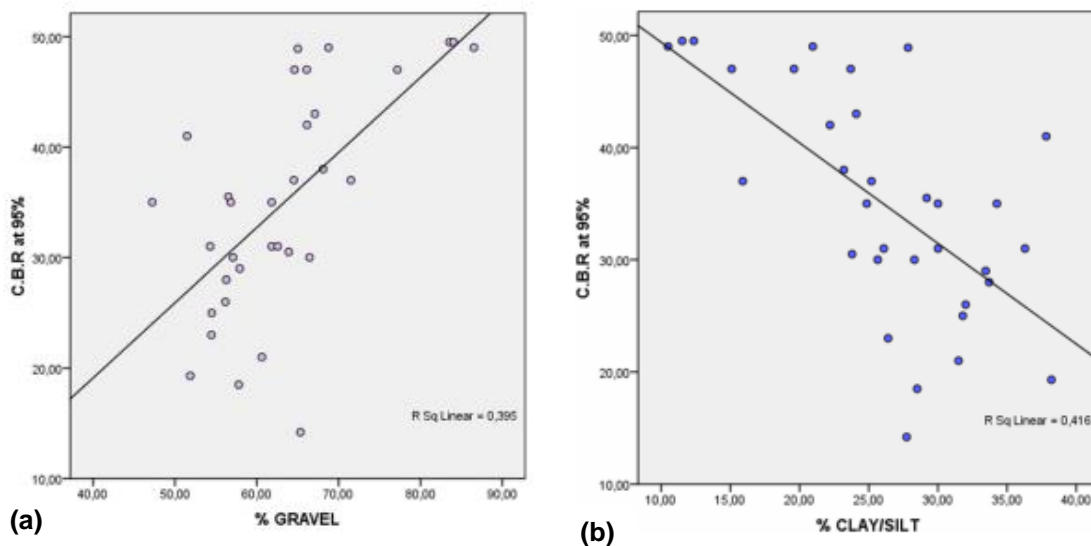


Figura 2.8 Relación entre el valor de CBR con: **(a)** contenido de gravas y **(b)** contenido de limos/arcillas

Fuente: Tomado de Katte et al. (2019)

En cuanto a suelos finos, específicamente limos de baja compresibilidad (ML), Talukdar (2014) reporta que un aumento en el contenido de agua en el suelo, conlleva a la disminución de valor de CBR saturado (Figura 2.9a), tal como sucede en suelos granulares. No obstante, dicho comportamiento, comparado con el obtenido en granulares, presenta una mayor dispersión, lo cual también sucede en el comportamiento del CBR en función de la densidad seca máxima, en donde el CBR aumenta cuando dicho parámetro también lo hace (Figura 2.9b).

En cuanto al índice de plasticidad, cuando los valores son bajos, Talukdar (2014) afirma que existe una buena correlación con el CBR. Su investigación demuestra que el valor de CBR tiende a disminuir a medida que el índice de plasticidad aumenta (Figura 2.10).

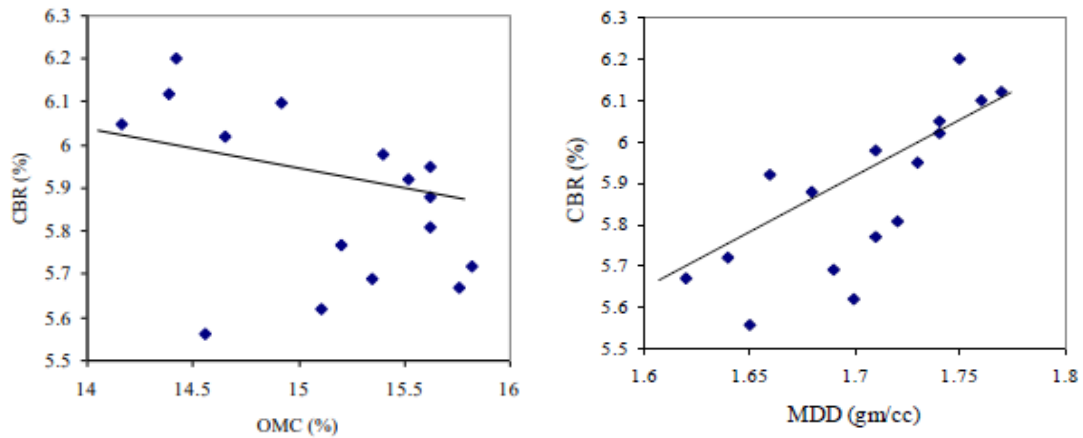


Figura 2.9 Influencia del contenido de humedad óptimo (OMC) y la densidad seca máxima (MDD) en el valor de CBR sumergido de suelos finos de baja plasticidad

Fuente: Tomado de Talukdar (2014)

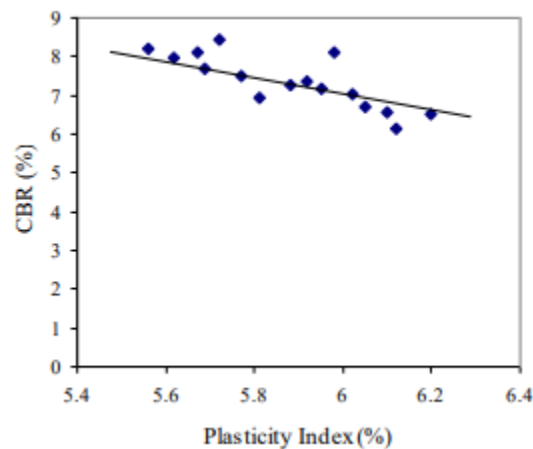


Figura 2.10 Comportamiento del CBR sumergido con el cambio en el índice de plasticidad en suelos finos de baja plasticidad

Fuente: Tomado de Talukdar (2014)

Para suelos finos de alta plasticidad, la cual es una característica típica de los suelos lacustres Bogotanos, la correlación entre el CBR y el índice de plasticidad no es tan clara, este tiende a disminuir con el aumento de la plasticidad, tanto en condiciones saturadas como no saturadas, tal como lo presentan Patel & Desai (2010) en su investigación sobre suelos aluviales del sur de Gujarat, India (Figura 2.11).

Adicional a este comportamiento frente al índice de plasticidad, estos autores también reportaron el comportamiento del CBR frente a la densidad seca máxima y la humedad óptima (Figura 2.12). De allí es posible concluir que: (i) Los valores de CBR disminuyen al

ser obtenidos en condiciones saturadas; (ii) Al igual que en suelos granulares y finos no plásticos, el CBR disminuye con el incremento de humedad, presentando un comportamiento más disperso en los CBR saturados; y (iii) La influencia de la densidad seca máxima en el CBR es prácticamente nula, ya que las líneas de tendencia son casi horizontales, y se presenta una mayor dispersión en los CBR saturados.

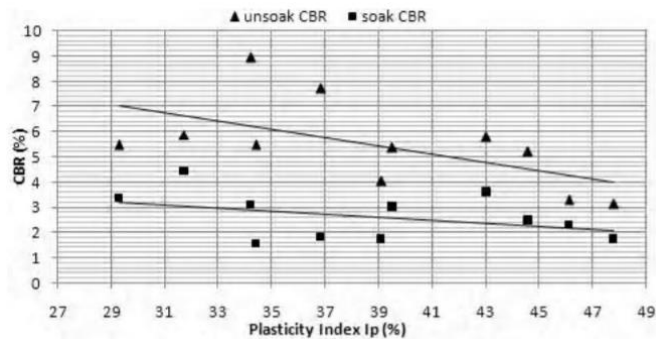


Figura 2.11 Influencia del índice de plasticidad en el CBR sin saturar y saturado para arcillas de alta plasticidad

Fuente: Tomado de Patel & Desai (2010)

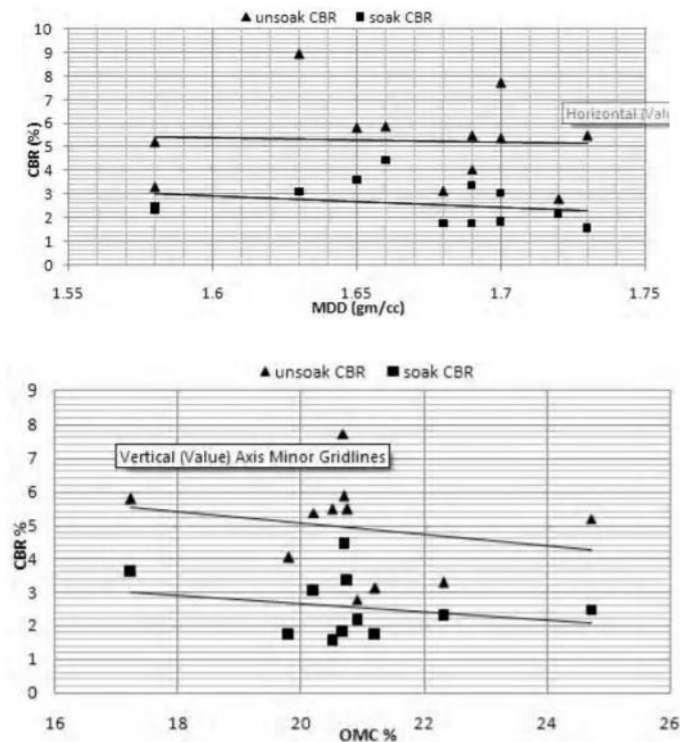


Figura 2.12 Influencia de la densidad seca máxima (MDD) y el contenido de humedad óptimo (OMC) en el CBR sin saturar y saturado en suelos finos de alta plasticidad

Fuente: Tomado de Patel & Desai (2010)

2.4.1.3. Correlaciones del CBR con propiedades índice

Este tipo investigaciones, además de analizar el comportamiento del CBR de diferentes suelos ante múltiples factores influyentes, también han permitido la determinación de ecuaciones a partir de regresiones lineales y no lineales múltiples, con las cuales es posible obtener el valor de CBR a partir de varias de las propiedades índice de los suelos. Algunas de ellas se presentarán a continuación.

La National Cooperative Highway Research Program (2001) presentó una correlación para suelos finos plásticos, a partir del índice de plasticidad (IP) y el porcentaje de finos ($\%Finos$):

$$CBR = 7 * (1 + 0.728 * \%Finos * IP)^{-1}$$

Ecuación 2-2

Por su parte, Talukdar (2014) presentó una correlación para limos de baja plasticidad (ML) basándose en el límite líquido (LL), el IP , la densidad seca máxima (ρ_{dMAX}) y la humedad óptima (ω_{op}), la cual se presenta en la Ecuación 2-3.

$$CBR_{sumergido} = 0.127LL - 0.1598IP + 1.405\rho_{dMAX} - 0.259\omega_{op} + 4.618$$

Ecuación 2-3

Nguyen & Mohajerani (2015) presentaron una correlación para diferentes suelos finos (CL-CH-SC) con el objetivo de hallar el CBR sumergido:

$$\log(CBR_{sumergido}) = 4.767 + 0.843\omega_{op} + 0.02IP - 1.522\rho_{dMAX}$$

Ecuación 2-4

Araujo & Ruiz (2016) presentaron una correlación para todo tipo de suelo a partir de la granulometría (Contenido de gravas, arenas y finos), la ρ_{dMAX} , la ω_{op} , el LL y el IP :

$$CBR = 64.89 + 17.991\rho_{dMAX} - 2.917\omega_{op} + 0.51LL - 0.820IP + 0.681\%Grava + 0.205\%Arena - 0.032\%Finos$$

Ecuación 2-5

Finalmente, Katte et al. (2019) presentan su propia correlación para gravas lateríticas a partir de la cantidad de gravas y finos, la ρ_{dMAX} y la ω_{op} .

$$CBR = -59.297 + 54.293\rho_{dMAX} - 2.342\omega_{op} + 0.138\%Grava + 0.018\%Finos$$

Ecuación 2-6

No obstante lo anterior, Nguyen & Mohajerani (2015) aseguran que algunas de las ecuaciones encontradas en la literatura no presentan un elevado nivel de ajuste (R^2), razón por la cual únicamente permiten una identificación preliminar de los materiales, concluyendo que dichos modelos deben ser reevaluados y en lo posible se debe buscar ejecutar el ensayo de CBR. Adicionalmente, modelos como los mostrados antes, son esencialmente correlaciones estadísticas entre el CBR e información de clasificación y/o propiedades

índice de suelos de una localización o región específica, lo cual limita considerablemente su aplicabilidad y extrapolación.

2.4.1.4. Limitaciones del ensayo de CBR

Aunque, como ya se ha mencionado, el valor de CBR es popular, ampliamente aceptado, se ha investigado profundamente y es un parámetro de entrada para varios métodos de diseño tradicionales, en los últimos años ha sido cuestionado por algunos autores debido a su naturaleza empírica (Brown, 1996; Roy et al., 2010; Kumar & Pavithra, 2016).

Este es un ensayo que, en el mejor de los casos, se trata de una prueba que proporciona información sobre la resistencia al corte relativa del material en relación con su grado de compactación o densidad y contenido de humedad; no tiene en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas aplicadas al pavimento y es un parámetro pensado en prevenir la falla por corte de los materiales, un estado al cual no se lleva a un pavimento debido a la magnitud de las cargas que se le aplican (Yoder & Witczak, 1975; Brown, 1996; Araya, 2011).

Por otra parte, de acuerdo con Hight & Stevens (1982), existen tres grandes limitantes del ensayo: (i) Se desconoce el estado del esfuerzos efectivos en el molde, (ii) No hay control del drenaje y (iii) El CBR es una medida de la resistencia al corte no drenada que no puede distinguir entre rigideces de deformación baja, por lo cual, suelos con diferentes comportamientos esfuerzo-deformación, pueden tener el mismo CBR.

En cuanto al ensayo en campo, es una operación que requiere mucho tiempo, requiere un operador calificado y puede ser nociva para los equipos de evaluación en entornos hostiles. Adicionalmente, cantidades limitadas de datos publicados de CBR están disponibles, por lo que los ingenieros siempre experimentan dificultades para obtener valores CBR representativos para el diseño. Debido a los presupuestos limitados y las malas condiciones de planificación, en muchos casos se obtienen datos insuficientes de investigación de suelos (Roy et al., 2010; Talukdar, 2014; Nguyen & Mohajerani, 2015).

Respecto a la prueba de CBR de laboratorio, no solo es laboriosa y consume mucho tiempo, sino que, a veces, los resultados no son precisos debido a la alteración de la muestra y la mala calidad de las condiciones de las pruebas de laboratorio (Roy et al., 2010; Nguyen & Mohajerani, 2015), en suelos granulares se ha encontrado que su reproducibilidad es baja (Nguyen & Mohajerani, 2015), e incluso algunos autores consideran que llevar un número limitado de muestras al laboratorio no es representativo debido a la variabilidad de las propiedades del suelo a lo largo de la trayectoria de la vía (Katte et al., 2019).

Dada la ya mencionada aceptación y uso del CBR, este valor se emplea para determinar los parámetros de rigidez usados en métodos de diseño con un carácter más analítico. Puesto que dichos métodos requieren propiedades fundamentales de los materiales como el módulo elástico (E) o el módulo resiliente (M_r), una gran variedad de correlaciones se han desarrollado entre estas variables. Sin embargo, la deformación que ocurre en el

ensayo de CBR es una combinación de deformaciones plásticas y elásticas y, dado que estos dos tipos de deformación no se pueden distinguir en la prueba y que la proporción de la deformación elástica y plástica puede diferir de un material a otro, la prueba CBR estándar no es adecuada para determinar un parámetro puramente elástico como E o Mr (Sweere, 1990; Araya, 2011).

Estas falencias identificadas por la literatura revelan la necesidad de mejores métodos de prueba para cuantificar la respuesta real de los materiales ante los factores a los que se ven sometidos en un pavimento, tanto en términos de carga como de la interacción con el entorno.

2.4.2. Penetrómetro dinámico de cono (PDC)

El Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) se ha usado cada vez más en muchas partes del mundo para suelos de subrasante, material granular y suelos ligeramente estabilizados. A lo largo de las últimas dos décadas, se han compilado suficientes datos que relacionan el índice PDC con el CBR, lo que hace posible estimar la resistencia in-situ relativa de las subrasantes y otras capas de pavimento (George & Uddin, 2000).

El primer desarrollo del equipo de PDC se le acredita a Scala en Australia en la década de 1950, quien logró utilizarlo de manera exitosa para la determinación relativa de la resistencia de los suelos (Al-Refeai & Al-Suhaibani, 1997; George & Uddin, 2000; Gill et al., 2010). En aquella época, los procedimientos de diseño de pavimentos en Australia no requerían específicamente pruebas de resistencia in-situ de los suelos de subrasante, debido al tiempo y la complejidad de los métodos de ensayo disponibles (George & Uddin, 2000).

El equipo desarrollado por Scala incluía un martillo de 9.1kg que se dejaba caer de una altura de 508mm, a lo largo de una barra de 15.9 mm de diámetro. La configuración utilizaba una punta cónica de un ángulo de 30°. Scala realizó pruebas que correlacionaban el CBR con datos de PDC y propuso un procedimiento de diseño de pavimentos basado en esta correlación; adicionalmente, introdujo la relación teórica entre la energía aplicada, la resistencia del suelo y la tasa de penetración. El uso de este dispositivo PDC fue adoptado por la *Country Roads Board* de Victoria, y obtuvo una amplia aceptación (George & Uddin, 2000; Wu & Sargand, 2007).

La siguiente generación del equipo PDC, la cual se basó en el equipo de Scala, fue propuesta por Van Vuuren de Sudáfrica en la década de 1960. Básicamente consiste en el mismo equipo desarrollado en Australia, pero con un cambio en la masa del martillo (10kg), en la altura de caída (383.5mm) y en el diámetro de la barra penetrada (16mm); mientras que el ángulo del cono se mantuvo en 30°. El desarrollo fue motivado por la necesidad de aliviar los problemas asociados con la realización de pruebas de CBR de campo. En el estudio realizado con este nuevo dispositivo, la relación CBR-PDC resultó en una mejor

correlación en comparación con la obtenida entre CBR-CPT. Además, Van Vuuren concluyó que el PDC es adecuado en suelos que tienen valores de CBR de 1% a 50%.

En 1973, el *Transvaal Roads Department* de Sudáfrica empezó a utilizar el equipo PDC para investigar sobre pavimentos en el país. Los resultados de dichas investigaciones fueron utilizados por Kleyn, quien estudió las configuraciones de cono de 30° y 60°, para presentar su propio dispositivo PDC, el cual es la versión utilizada actualmente. Este equipo consiste en un martillo de 8kg, una barra de 16mm de diámetro, con una altura de caída de 575mm y con un ángulo de 60° en la punta cónica (Figura 2.13). El trabajo de Kleyn se centró en el desarrollo de la correlación generalizada de PDC-CBR para toda la gama de materiales probados (Al-Refeai & Al-Suhaibani, 1997; George & Uddin, 2000; Wu & Sargand, 2007).

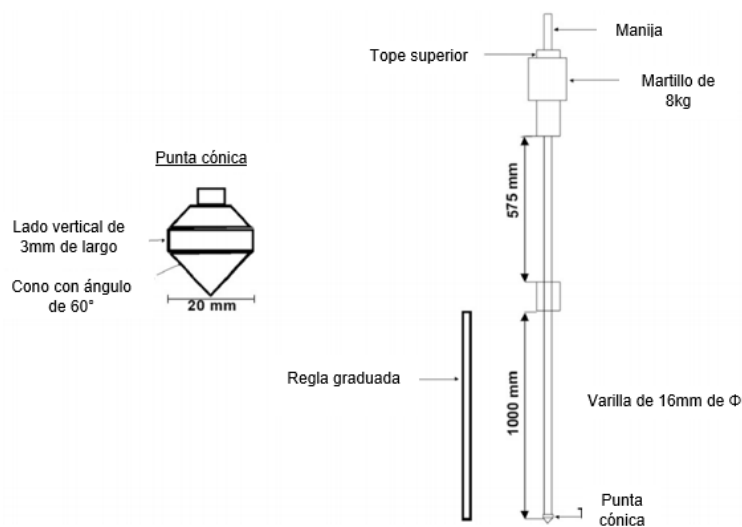


Figura 2.13 Esquema equipo PDC

Fuente: Adaptado de Mohammadi, Nikoudel, Rahimi, & Khamehchiyan (2008)

Una de las razones por las cuales el equipo pasó de tener una punta de 30° a una de 60°, es que ésta última presenta una mejor durabilidad en materiales de consistencia alta (Hamid, 2015), además esta geometría permite la mínima resistencia a la penetración, en otras palabras, permite la máxima penetración con la menor cantidad de empuje requerido (Browning, 2005), lo cual facilita la operación y transporte del equipo y la ejecución del ensayo. En cuanto al material de dicha punta cónica, no se recomienda que sean materiales de alta resistencia o templados, ya que tienden a desprenderse al golpear suelos duros, por otra parte, el uso de puntas cónicas desechables ha aumentado, puesto que el esfuerzo de retirar el aparato del orificio de prueba se reduce considerablemente al dejar el cono atrás (Paige-Green & Plessis, 2009).

Adicionalmente, un factor a tener presente en este ensayo es la llamada “*profundidad del material*”, la cual se define como la profundidad por debajo del nivel de la carretera

terminada en donde las propiedades mecánicas del suelo tienen un efecto significativo en el comportamiento del pavimento, es decir, debajo de este nivel se asume que los esfuerzos inducidos por una llanta tienen un efecto despreciable sobre el suelo. Dicha profundidad varía típicamente entre 700mm a 1000mm (Committee of State Road Authorities, 1996; Gill et al., 2010), razón por la cual el ensayo de PDC está estandarizado a 1000mm, tal como se muestra en la Figura 2.13.

Básicamente el aspecto teórico de las penetraciones sucesivas ocasionadas por la caída de un martillo explica, en términos generales, la falla por corte tanto local como general (Figura 2.14). Inicialmente, antes de ubicar la punta cónica en la superficie del suelo, éste se encuentra en equilibrio elástico. Cuando la punta genera la penetración inicial, al ubicar el aparato en posición, el suelo pasa a un estado de equilibrio plástico, donde la punta se convierte en el elemento que forma toda o al menos parte de la Zona I mostrada en la Figura 2.14.

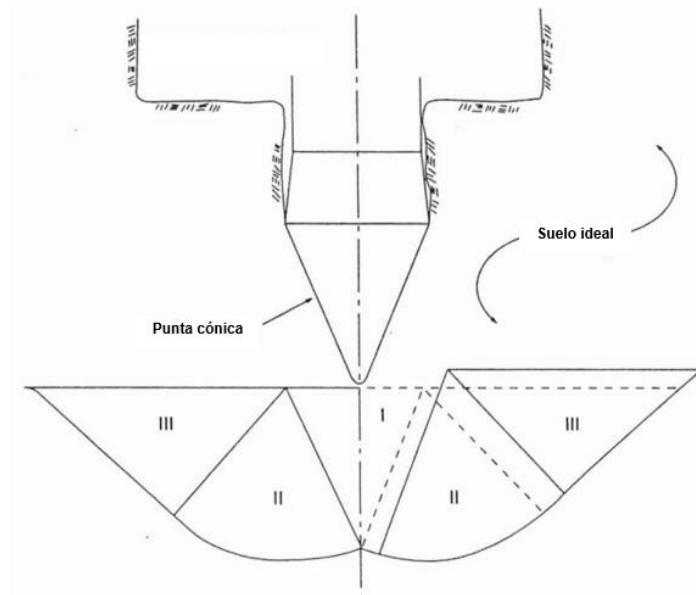


Figura 2.14 Límites teóricos de una falla plástica

Fuente: Tomado de Sowers & Hedge (1966)

Si se asume un suelo ideal, la zona de equilibrio plástico se divide en una zona en forma de cono (posteriormente desplazada por la punta del penetrómetro), una zona anular de corte radial que comienza en los límites extremos de la zona cónica, y una zona anular pasiva de Rankine. Las líneas punteadas a la derecha de la Figura 2.14, indican los límites de las zonas I a III en el instante de la falla o del movimiento del penetrómetro, mientras que las líneas sólidas representan los mismos límites, pero después de que la punta cónica se mueve a nivel del ensayo (Sowers & Hedge, 1966).

2.4.2.1. Ensayo estándar de PDC

De acuerdo con INVIAS (2013), el ensayo de *Penetrómetro Dinámico de Cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad (INV-E-172-13)*, consiste en que el operador dirige la punta del PDC dentro del suelo, luego levanta el martillo deslizante hasta el tope superior y lo deja caer libremente hasta que golpee el yunque. La penetración total para un determinado número de golpes es medida y registrada en milímetros por golpe, y se llama número dinámico (DN) o índice PDC.

Cuando los resultados de este ensayo son graficados, describen el número de golpes para alcanzar una cierta profundidad, lo cual permite una visualización de la resistencia relativa del material in-situ (Figura 2.15). La pendiente de la curva en cualquier punto, expresada en términos de mm/golpe, representa la resistencia ofrecida por el material; cuanto más bajo es el DN, más rígido es el material.

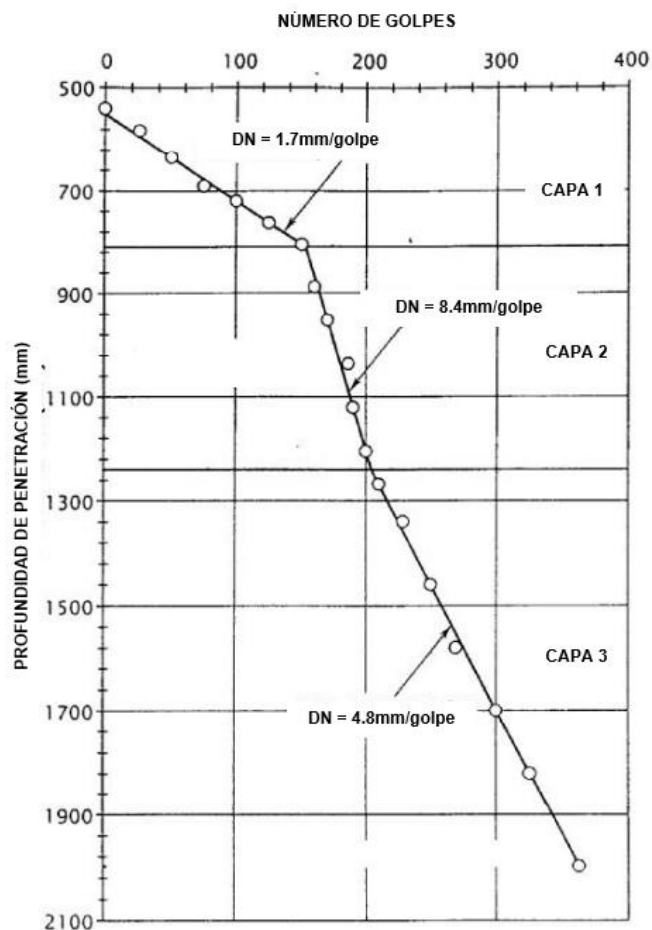


Figura 2.15 Resultados típicos de un ensayo PDC

Fuente: Adaptado de George & Uddin (2000)

2.4.2.2. Factores que influyen en el valor de DN en los suelos

De acuerdo con George & Uddin (2000) y Chukka & Chakravarthi (2012), se han realizado una variedad de estudios con el objetivo de determinar las tendencias generales y el comportamiento del DN con respecto a la variabilidad del suelo y de algunos factores en los materiales para carreteras. Entre estos factores estudiados se encuentran el tipo de suelo, la densidad, la granulometría, el tamaño máximo de partícula, el contenido de humedad, el efecto de confinamiento vertical y la fricción lateral.

En cuanto a la granulometría, un aumento en el porcentaje de finos aumenta el DN para la misma densidad; de manera similar, un aumento en la densidad, para una gradación similar o un tipo de material individual, disminuye el DN. En cuanto al contenido de humedad, un incremento en dicho valor genera un aumento en el índice PDC, ya que el suelo pierde resistencia, especialmente en suelos arcillosos (Chukka & Chakravarthi, 2012). Otros estudios han demostrado que el tamaño máximo de partícula no tiene un efecto significativo en los resultados de este ensayo (Hassan, 1987).

Respecto al confinamiento vertical, estudios realizados por Hassan (1987) y Livneh et al. (1995), afirman que no hay efecto importante de confinamiento vertical por las capas superiores del pavimento en el DN de una subrasante cohesiva; sin embargo, esta influencia si se presenta en capas granulares, tal como se muestra en la Figura 2.16. Esto demuestra la influencia que tiene el esfuerzo desviador en suelos arcillosos y el confinamiento en materiales granulares.

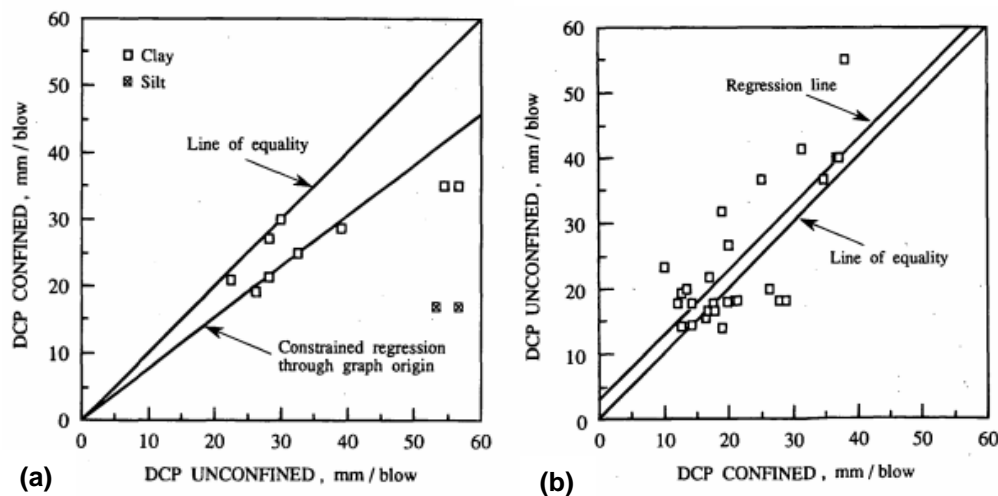


Figura 2.16 Correlación entre DN confinado y no confinado de: (a) una capa granular y (b) una capa arcillosa

Fuente: Tomado de Livneh et al. (1995)

La influencia de la fricción lateral en el ensayo de PDC, factor que es evaluado cuando el dispositivo del ensayo no está del todo vertical, es importante: este escenario genera unos resultados en los cuales se presenta una resistencia a la penetración mayor a la real. Esta

situación es más propensa a presentarse cuando se hace uso del dispositivo manual. Aunque tanto en suelos granulares como arcillosos este fenómeno presenta influencia, es menor en materiales arcillosos, ya que en ellos no es problemático preservar un espacio entre la varilla del PDC y los lados del agujero, dada a la ya mencionada poca influencia del confinamiento en estos suelos (George & Uddin, 2000; Chukka & Chakravarthi, 2012). Investigaciones como las desarrolladas por Livneh (2000), han permitido presentar ecuaciones que permiten la corrección del valor obtenido en los ensayos de PDC debido a este efecto de fricción lateral.

2.4.2.3. Correlaciones del DN con el CBR

Debido a la abundante investigación que se ha realizado, el PDC se ha utilizado para determinar la resistencia relativa de los suelos correlacionando sus resultados con el CBR. Puesto que el ensayo de CBR es relativamente costoso y consume un tiempo considerable, el PDC al ser liviano, portable y rápido, ofrece una opción atractiva para determinar el CBR in-situ de una manera más fácil y económica. Adicionalmente, en cuanto a su repetitividad, el PDC es un ensayo que presenta mejores resultados: el coeficiente de variación del ensayo de CBR en una zona específica puede ser del orden del 60%, comparada con el del PDC que es cercano al 40% (Al-Refeai & Al-Suhaibani, 1997).

Durante las décadas pasadas, el número de correlaciones presentadas entre el DN y el CBR es elevado, algunas de ellas se presentan en la Tabla 2.3 y en la Figura 2.17.

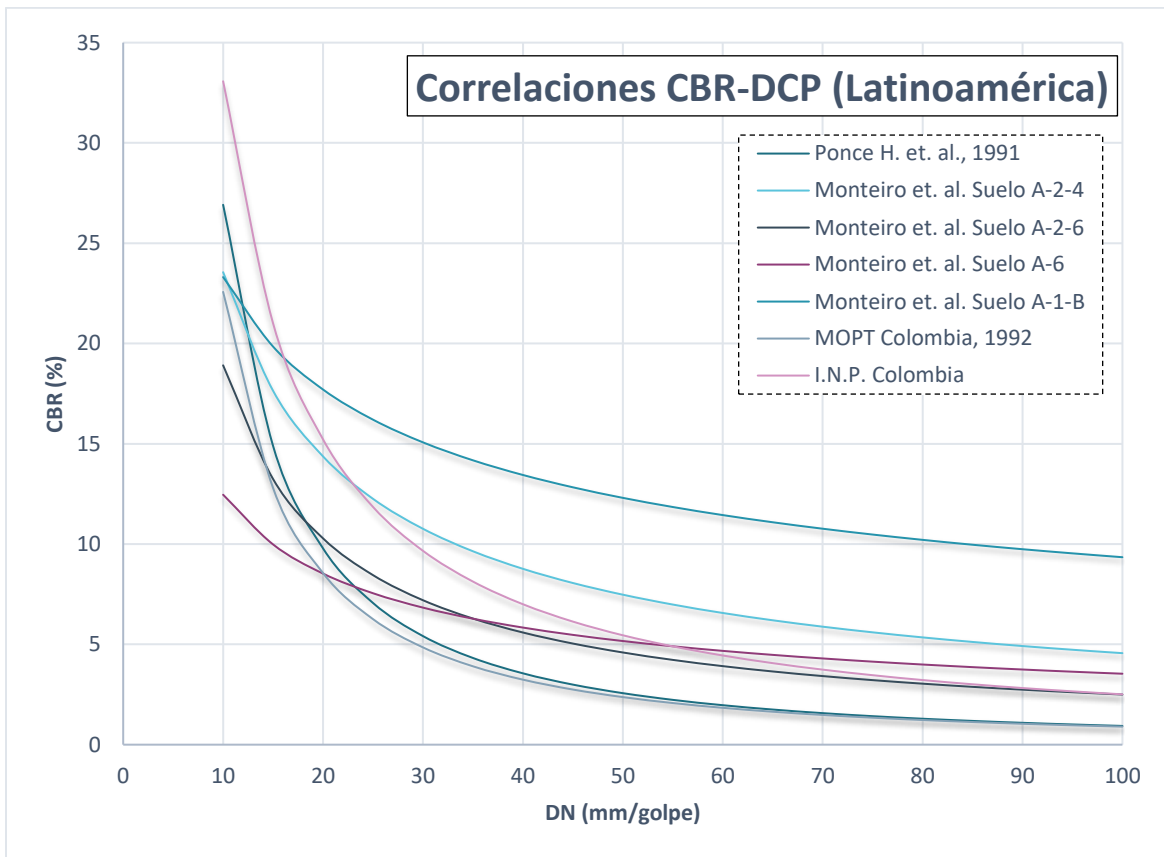
Tabla 2.3 Algunas correlaciones DN (mm/golpe) y CBR encontradas en la literatura

Referencia	Propuesto por	Correlación	Suelos
(Kleyn & Savage, 1982)	Kleyn y Savage, 1982	$\log CBR = 2.63 - 1.28 \log DN$	No se especifica
(Hassan, 1987)	Harrison, 1986	$\log CBR = 2.81 - 1.32 \log DN$	Todo tipo de suelo
	Livneh y Ishai, 1988	$\log CBR = 2.20 - 0.71[\log DN]^{1.5} + 0.075$	Todo tipo de suelo
(Al-Refeai & Al-Suhaibani, 1997)	Al-Refeai y Al-Suhaibani, 1997	$\log CBR = 2.50 - 1.07 \log DN$	Suelos desde arcillas hasta arenas gravosas
(Alves, 2002)	Harrison, 1987	$\log CBR = 2.56 - 1.16 \log DN$	Arcillas
	Ponce et. al., 1991	$\log CBR = 2.89 - 1.46 \log DN$	Suelos finos
(Wu & Sargand, 2007)	Webster et al., 1992	$\log CBR = 2.465 - 1.12 \log DN$	Todo tipo de suelo

Continúa la tabla

(Chukka & Chakravarthi, 2012)	Chukka y Chakravarthi, 2012	$\log CBR = 0.441 - 0.296 \log DN$	Suelo SC de India
(INVIAS, 2013)	MOPT Colombia, 1992	$CBR = 567 * DN^{-1.40}$	No especifica
(Campagnoli, 2014)	I.N.P. Colombia	$CBR = 436 * DN^{-1.12}$	No especifica
(Monteiro et al., 2016)	Monteiro et al., 2016	$CBR = 121.64 * DN^{-0.713}$	Suelo A-2-4
		$CBR = 143.13 * DN^{-0.879}$	Suelo A-2-6
		$CBR = 43.91 * DN^{-0.547}$	Suelo A-6
		$CBR = 58.154 * DN^{-0.397}$	Suelo A-1-B

Fuente: Elaboración propia



Continúa la figura

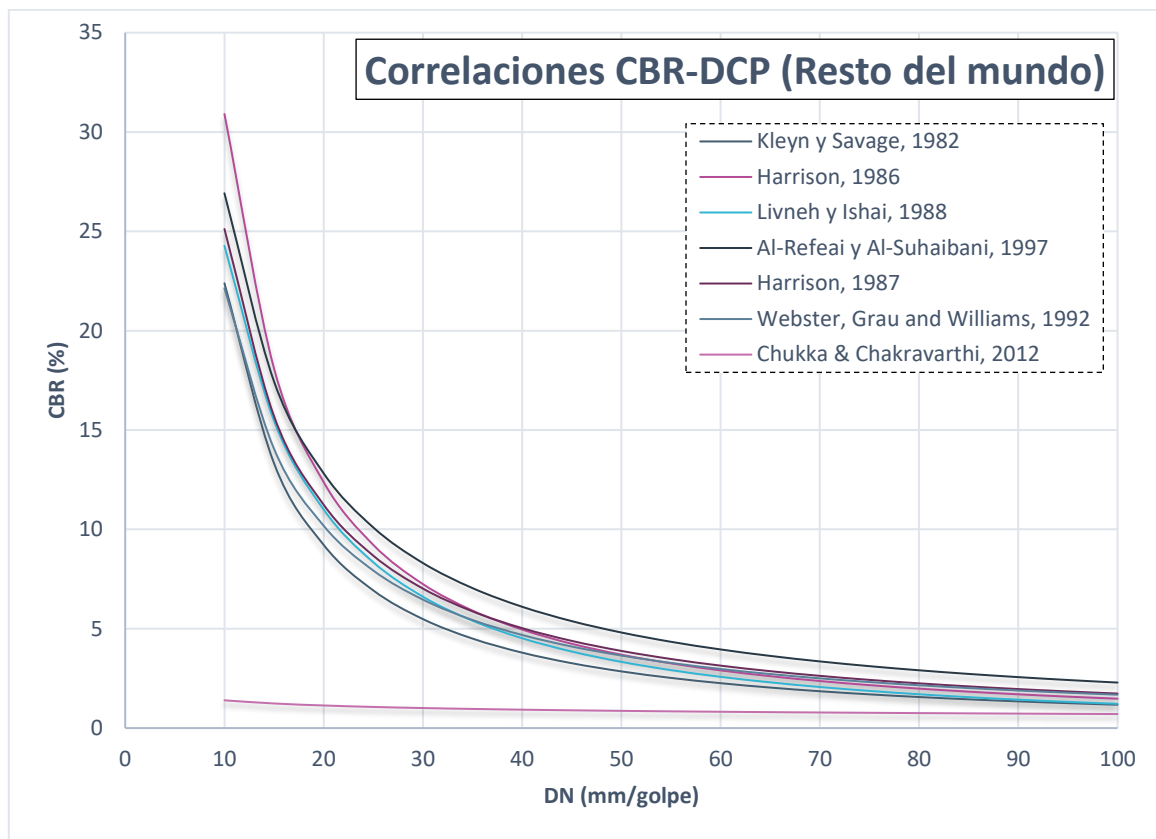


Figura 2.17 Correlaciones en la literatura CBR-DN (Latinoamérica y el resto del mundo)

Fuente: Elaboración propia

Al observar las gráficas de la Figura 2.17, se puede inferir que, de ser necesario usar una correlación presentada en la literatura, debe ser escogida con precaución y criterio, ya que cada una de ellas presenta valores diferentes de CBR para un mismo valor de DN, especialmente entre más pequeño sea el CBR. Siempre será recomendable que para cada suelo de estudio se elabore la curva de correlación del suelo específico, en lugar de usar una propuesta a partir de un estudio ajeno al actual.

Adicionalmente, es importante tener en cuenta que las correlaciones entre el DN y el CBR dependen considerablemente si el ensayo de CBR utilizado fue en campo o en laboratorio, ya que se ha establecido que el valor de CBR in-situ es generalmente el doble del obtenido mediante el procedimiento en laboratorio, debido principalmente al proceso de inmersión (Wu & Sargand, 2007).

2.4.2.4. Limitaciones del ensayo de PDC

A pesar de las ya mencionadas ventajas del ensayo de PDC y de la gran variedad de correlaciones existentes con el valor de CBR, se debe tener presente que el CBR es determinado mediante un ensayo estático, razón por la cual este tipo de correlaciones no

tienen en cuenta el comportamiento dinámico de los pavimentos ante el paso de los vehículos (Mohammad et al., 2007). Adicionalmente, se ha encontrado que el cálculo de la capacidad portante en suelos arcillosos mediante este ensayo ha sido cuestionado, especialmente cuando es utilizado en estratos que se encuentran por debajo del nivel freático, esto se debe a que la fricción lateral se convierte en un componente importante de la resistencia dinámica y en la contribución del efecto de la presión de poros (Hassan, 1987).

De acuerdo con Hassan (1987), existe evidencia de que solo la información relativa a la clasificación y la estratificación debe inferirse del PDC, especialmente para suelos arcillosos. Si la capa está debajo del nivel freático, se considera que es imposible determinar si un aumento en el DN se debe al aumento en la resistencia del punto, a la fricción lateral o a el cambio en la presión de poros. Además, el comité técnico en el *International Symposium on Penetration Testing*, recomendó que la prueba de PDC solo se debe usar como una evaluación general para confirmar la estratificación del suelo, mientras que el tipo de suelo en sí debe ser determinado mediante perforaciones o muestreos. En otras palabras, la prueba de PDC únicamente debería ser usada, para todos los tipos de suelo, en la confirmación de una estratificación alrededor de una posición que se haya determinado por otros métodos.

Las limitaciones presentadas tanto en el ensayo de CBR como en el PDC, ambos de naturaleza empírica, han dado paso en los últimos años a la aceptación y utilización de parámetros y ensayos de carácter ingenieril más acorde con la naturaleza de las cargas y del entorno al cual está sometida una estructura de pavimento, el más conocido de todos es el módulo resiliente.

2.4.3. Módulo resiliente (M_r)

El módulo resiliente (M_r) es uno de los principales parámetros para caracterizar materiales tanto finos como granulares y para diseñar estructuras de pavimentos a partir de enfoques empírico-mecanicistas (Witczak et al., 1995; Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015). El término de M_r fue introducido por Seed et al. (1955) y Seed et al. (1962) como la relación existente entre el esfuerzo desviador cíclico (σ_d) y la deformación vertical recuperable o resiliente (ε_r), tal como se muestra en la Ecuación 2-7. La Ecuación 2-8 presenta el cálculo de la deformación unitaria axial resiliente, donde ΔL es la deformación recuperada a lo largo de la muestra de longitud inicial L_i .

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_r}$$

Ecuación 2-7

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta L}{L_i}$$

Ecuación 2-8

El término “resiliente” describe la fracción de la energía que es aplicada en un material cuando es cargado y se recupera una vez es descargado (Adu-Osei, 2000). Dado que el módulo resiliente es un factor distintivo del suelo que describe la respuesta esfuerzo-deformación bajo carga cíclica, reconociendo su comportamiento elástico no lineal, para obtenerlo se deben ejecutar ensayos sobre el suelo que simulen dicha naturaleza cíclica de las cargas (Razouki & Al-shefi, 2002; Sas & Gluchowski, 2013a; Dione et al., 2015). Un diagrama de este principio de carga se presenta en la Figura 2.18.

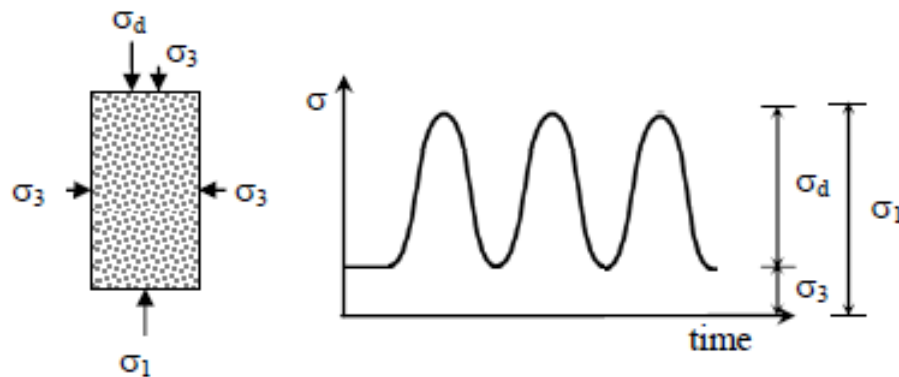


Figura 2.18 Esquema sobre el principio de carga cíclica triaxial

Fuente: Tomado de Araya (2011)

La carga cíclica se genera mediante la aplicación repetida de un esfuerzo desviador, bajo una presión de cámara constante, y midiendo la deformación axial resiliente obtenida. En un ensayo de esta naturaleza, se observa que a medida que el número de ciclos aumenta, el módulo secante también lo hace; y luego de un determinado número de repeticiones, el módulo se vuelve prácticamente constante, y la respuesta del material se puede asumir como elástica, este valor constante de módulo se conoce como el M_r , tal como se observa en la Figura 2.19 (Rahim & George, 2005; Sas, Gluchowski, & Szymansky, 2012).

El empleo del M_r de la subrasante presenta ventajas respecto al uso de ensayos y valores empíricos para el diseño de pavimentos: (i) Alrededor del 60% al 80% de la deflexión de la superficie medida se desarrolla en la subrasante, (ii) El pulso de carga utilizado (duración de la carga de 0,1 segundos y un período de descanso de 0,9 segundos) simula razonablemente la carga del vehículo, y (iii) la mayoría de los materiales de pavimentación experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga (Nam, An, & Murphy, 2014).

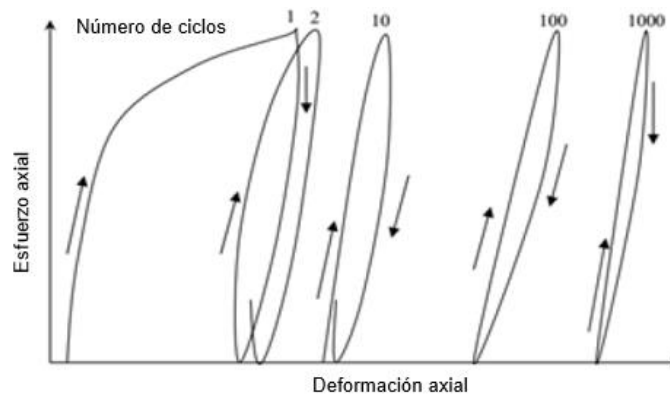


Figura 2.19 Esquema del comportamiento resiliente de un material bajo carga cíclica

Fuente: Adaptado de Sas, Gluchowski, & Szymansky (2012)

2.4.3.1. Comportamiento resiliente de los suelos

En una estructura de pavimento flexible el paso de vehículos representa condiciones de carga repetitiva considerablemente inferiores a la resistencia al corte pico, lo cual genera en las capas de base, subbase y subrasante deformaciones tanto resilientes (Recuperables) como permanentes (Plásticas), tal como se muestra en la Figura 2.20 (Araya, 2011; Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

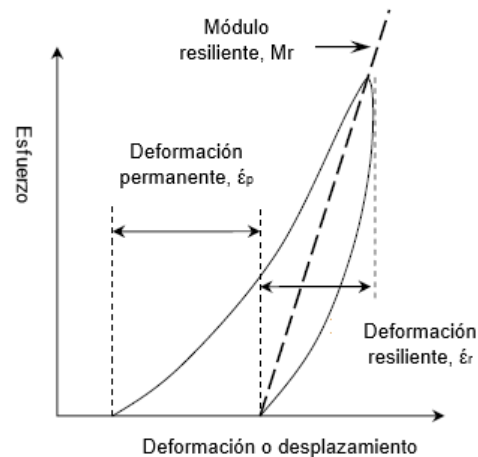


Figura 2.20 Esfuerzos en el suelo bajo un ciclo de carga

Fuente: Adaptado de Araya (2011)

En general, la experiencia ha mostrado que las cargas repetitivas, a un particular nivel de esfuerzos, conlleva a mayores deformaciones que las obtenidas por un único ciclo de carga. Además, se ha encontrado que varios suelos colapsan totalmente bajo niveles de esfuerzo cíclicos por debajo del máximo que pueden soportar al ser sometidos a un único ciclo, así como también se ha demostrado que existen ciertos niveles de esfuerzo en los cuales el

suelo puede ser cargado indefinidamente sin causar una falla en el mismo (Sangrey et al., 1969).

Gran parte de los métodos de diseño existentes emplean ecuaciones elástico-lineales para el cálculo de esfuerzos y deformaciones; esta suposición de que los materiales se comportan de manera completamente elástica conduce únicamente a una respuesta aproximada. Adicionalmente, estas ecuaciones impiden tener en cuenta el módulo de rigidez, el cual es dependiente de los niveles de esfuerzo.

Es por lo anterior, y con el objetivo de tener una mejor comprensión del comportamiento de los materiales bajo cargas cíclicas, que la ingeniería de pavimentos ha desarrollado dos tipos de estudios de manera separada. El primero de ellos, sobre el cual se ha generado el mayor esfuerzo investigativo desde los años 70, se centra en el desarrollo de ecuaciones matemáticas que puedan predecir la evolución de la deformación resiliente y de las variables asociadas a la rigidez elástica del material cuando experimenta diferentes trayectorias de esfuerzo cíclicas. Este tipo de ecuaciones se conocen como *elásticas no lineales* y suponen que cada ciclo de carga genera únicamente una pequeña deformación permanente en comparación con la resiliente. El segundo tipo de estudio busca el desarrollo de ecuaciones matemáticas que permitan predecir la deformación permanente a partir del estado de confinamiento y del número de ciclos de carga a los cuales estará sometido el material; es importante tener en cuenta que estas ecuaciones son de carácter empírico (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Tal como lo plantea Dawson et al. (2000), existe un avance importante en la predicción de la respuesta resiliente, mientras que la predicción de la deformación permanente no ha presentado un avance considerable. En general, a pesar del gran esfuerzo generado en estas áreas, el comportamiento elastoplástico de los materiales aún no es entendido completamente.

De acuerdo con Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015), el comportamiento resiliente está influenciado por diferentes factores, los cuales dependen a su vez del tipo de suelo. La mayor parte de las investigaciones realizadas sobre materiales granulares, utilizados para la construcción de subbases y bases, han demostrado que dicho comportamiento depende principalmente de la magnitud del esfuerzo aplicado (θ : *Esfuerzo bulk*). Otros factores que lo afectan son: el contenido de humedad, la densidad, el número de repeticiones, la duración y la frecuencia de la carga, la granulometría, la mineralogía, el contenido de finos, la forma de las partículas y el tamaño máximo.

Sobre los suelos blandos de subrasante, la gran parte de las investigaciones han demostrado que el módulo resiliente está influenciado por el esfuerzo desviador, el contenido de agua, el grado de compactación, entre otros. Dada la importancia de estos últimos en la presente investigación, a continuación, se describe la influencia de cada uno de estos factores.

2.4.3.2. Comportamiento resiliente de los suelos blandos de subrasante

A lo largo de los años se ha logrado generar un sustancial trabajo experimental que ha permitido un mejor entendimiento del comportamiento de los suelos blandos de subrasante ante cargas cíclicas. Estas investigaciones han incluido variados tipos de suelos, ensayados en diferentes relaciones de sobreconsolidación, y sujetos a diferentes trayectorias de esfuerzo (Nieto Leal & Kaliakin, 2016).

Basados en hallazgos experimentales (Li & Selig, 1994; George, 2004; Kim & Siddiki, 2006; Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007, 2015; Nieto Leal & Kaliakin, 2016), se ha logrado determinar que la respuesta ante cargas cíclicas de estos suelos es afectada por diferentes factores y, por ende, el módulo resiliente no es un valor constante de rigidez. El módulo de un mismo suelo puede cambiar de 14.000kPa a 140.000kPa fácilmente con cambios en el contenido de humedad o en la historia de esfuerzos, lo cual conduce a una dramática diferencia en la respuesta de la subrasante bajo las cargas del tráfico.

Unos de los factores más importantes son el tipo de suelo (relacionado con el índice de plasticidad), los esfuerzos o su historia de consolidación, las condiciones específicas de los ensayos, la condición de humedad y la densidad. No obstante, también se ha encontrado que factores como la tixotropía, la succión, los ciclos hielo-deshielo, la frecuencia de aplicación de la carga y los periodos de drenaje pueden influir en la respuesta resiliente del suelo.

Autores como Li & Selig (1994) agrupan varios de los factores antes nombrados en tres categorías principales: (i) Condición de carga o estado de esfuerzos, la cual incluye la magnitud del esfuerzo desviador, el nivel de confinamiento, el número de cargas repetitivas y su secuencia; (ii) El tipo de suelo y su estructura – la cual depende principalmente del método y grado de compactación de la subrasante; y (iii) El estado físico del suelo, el cual es definido por el contenido de humedad y la densidad seca del material, sujetos a cambios por la interacción del suelo con el entorno.

- Condición de carga o estado de esfuerzos

De la primera categoría, el factor más importante que afecta el módulo resiliente es el esfuerzo desviador. A pesar de que el módulo incrementa con el aumento del nivel de confinamiento, se ha encontrado que éste tiene un efecto poco significativo en comparación con el esfuerzo desviador, especialmente en arcillas (Li & Selig, 1994). Algunos autores reportaron que el módulo resiliente disminuye significativamente a medida que el esfuerzo desviador aumenta (Kim & Siddiki, 2006; Rondón et al., 2012).

Investigaciones desarrolladas por Garnica et al. (2001), Elias et al. (2004) y Rahim (2005) son ejemplos de la fuerte influencia del esfuerzo desviador sobre el módulo resiliente en comparación de la presión de confinamiento, y se presentan en la Figura 2.21 y en la Figura 2.22. Todos estos resultados que se presentan fueron obtenidos mediante diferentes ensayos triaxiales cíclicos.

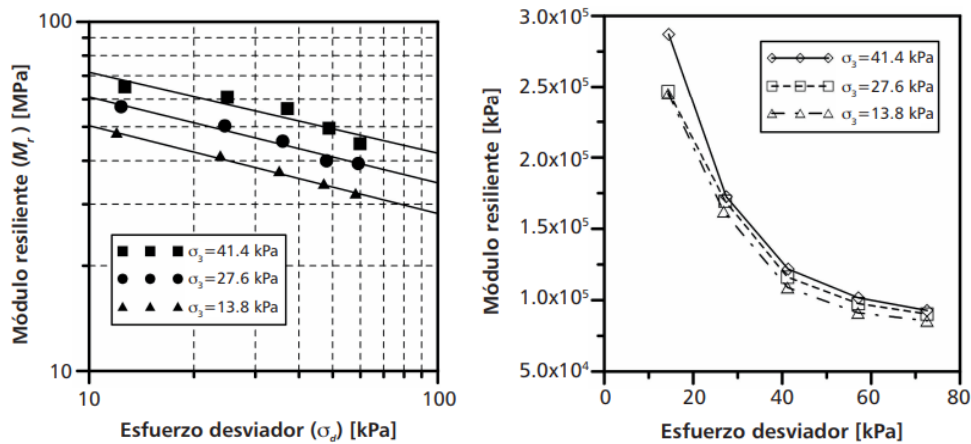


Figura 2.21 Cambio del módulo resiliente con el incremento del esfuerzo desviador

Fuente: Adaptado por Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015) de las investigaciones de Elias et al. (2004) – Derecha y Rahim (2005) – Izquierda

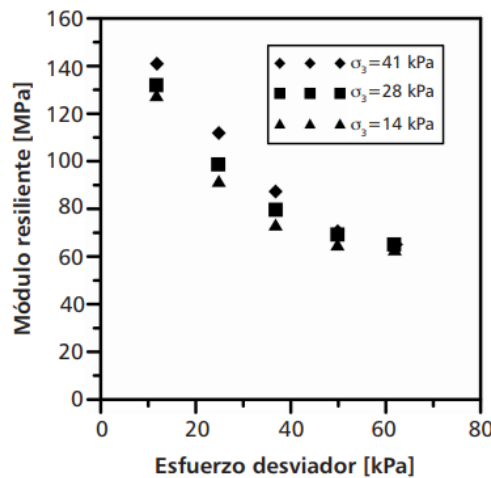


Figura 2.22 Influencia de la presión de confinamiento sobre el módulo resiliente

Fuente: Adaptado por Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015) de la investigación de Garnica et al. (2001)

Adicional al esfuerzo desviador y al confinamiento, otro factor a evaluar en esta categoría es el efecto de la frecuencia de aplicación de la carga. En general, los efectos de la frecuencia tienden a disminuir con el incremento en el número de ciclos. Cuando se cargan a altas frecuencias, los suelos arcillosos exhiben una mayor resistencia al corte cíclico que cuando se cargan a bajas frecuencias. Esto es consistente con la respuesta dependiente de este tipo de suelos a la velocidad, donde la resistencia al corte se incrementa al aumentar las velocidades de carga (Nieto Leal & Kaliakin, 2016).

Por su parte, Liu & Xiao (2010), quienes ejecutaron ensayos sobre muestras de arcilla expansiva para subrasante en vías de trenes, mostraron que el cambio en la respuesta resiliente de este tipo de materiales ante diferentes velocidades de carga (1Hz y 2Hz) es

pequeño si el esfuerzo desviador es bajo, ya que la deformación permanente difiere poco a un mismo valor de esfuerzo desviador, tal como se muestra en la Figura 2.23.

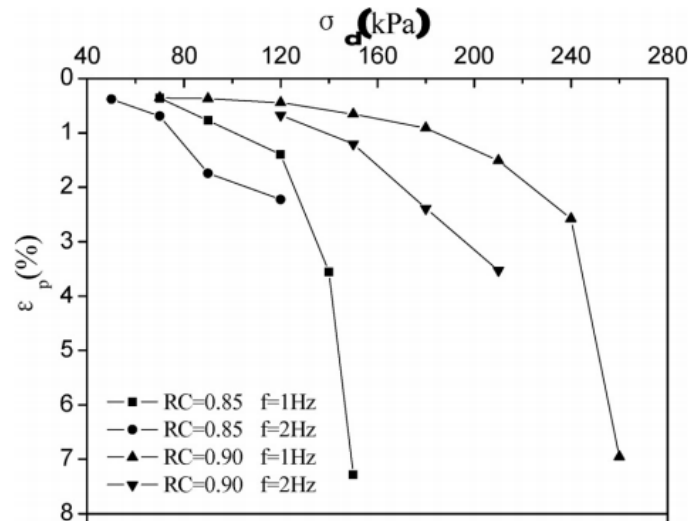


Figura 2.23 Comportamiento de la deformación permanente a diferentes niveles de esfuerzo desviador y frecuencias de carga

Fuente: Tomado de Liu & Xiao (2010)

También se ha encontrado cierto nivel de influencia del módulo con el número de ciclos aplicados, no obstante, este valor tiende a ser constante con el incremento del número de aplicaciones de carga, siempre y cuando el esfuerzo desviador se mantenga por debajo de cierto nivel con respecto a la falla (Li & Selig, 1994).

- Tipo de suelo y su estructura

En esta segunda categoría se tiene en cuenta principalmente la compactación. El ideal de la subrasante, para un ingeniero de pavimentos, es que se encuentre en la humedad óptima y en la densidad seca máxima que éste pueda alcanzar, lo cual se realiza mediante un proceso de compactación (Rondón et al., 2012).

En los especímenes compactados con bajos niveles de saturación, el método de compactación presenta muy poca influencia en el módulo resiliente, debido a la disposición floculada de las partículas de arcilla. En contraste, cuando las muestras son compactadas por encima de la humedad óptima, la compactación produce grandes cambios, los cuales se atribuyen al arreglo disperso de las partículas de arcilla.

Algunos investigadores llegaron a la conclusión de que los métodos de compactación por amasado e impacto generalmente producen una disposición de partículas floculadas para contenidos de agua por debajo de óptimo y una disposición dispersa por encima de este valor, mientras que la compactación estática, a cualquier nivel de humedad, genera una disposición floculada.

La literatura también sostiene que, para arcillas compactadas por la rama seca, la deformación recuperable de muestras preparadas por amasado y compactación estática fueron las mismas. Sin embargo, para las muestras compactadas por la rama húmeda, aquellas compactadas por amasado experimentaron deformaciones recuperables significativamente mayores, tal como se muestra en la Figura 2.24 (Seed et al., 1962; Kim & Siddiki, 2006; Rondón et al., 2012).

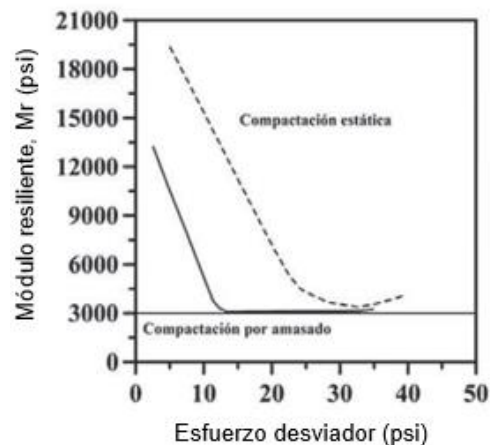


Figura 2.24 Comportamiento del módulo resiliente con cambio en el esfuerzo desviador bajo diferentes métodos de compactación (En condiciones de humedad por encima del óptimo)

Fuente: Adaptado por (Rondón et al., 2012) de la investigación de Seed et al. (1962)

- Estado físico del suelo

En esta última categoría, como se mencionó anteriormente, se tiene en cuenta la densidad, el contenido de humedad y la saturación del suelo.

En cuanto al efecto de la densidad, autores como George (2004), Yang et al. (2005) y Kim & Siddiki (2006), aseguran que a medida que la densidad del suelo aumenta, menos volumen es ocupado por los vacíos, y en consecuencia esto resulta en un incremento en el módulo resiliente, tal como se muestra en la Figura 2.25.

No obstante lo anterior, autores como Li & Selig (1994), George (2004), Rondón et al. (2012) y Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015), sostienen que la evaluación de la influencia de la densidad no puede ser analizada de manera separada a la humedad, ya que al aumentar la densidad no siempre se aumenta el módulo resiliente, tal como se puede evidenciar en la Figura 2.26.

La Figura 2.26 también muestra, como es de esperarse, que el módulo resiliente se ve afectado negativamente con el incremento en el contenido de agua. Un comportamiento similar se presenta con el grado de saturación (Figura 2.27). Andrei et al. (2009) sostienen que un aumento entre el 3% y 5% en la humedad puede llevar a disminuir el módulo resiliente en las arcillas entre el 50% al 70%.

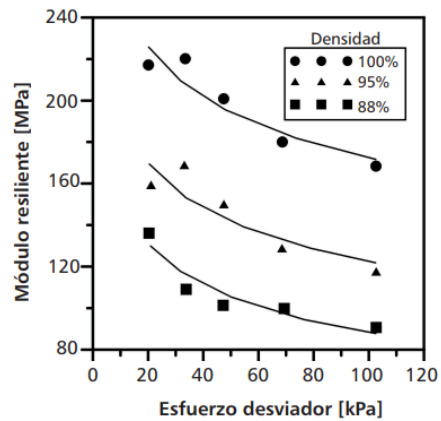


Figura 2.25 Comportamiento del M_r a diferentes porcentajes de compactación del ensayo Proctor

Fuente: Tomado de Yang, Huang, & Tai (2005)

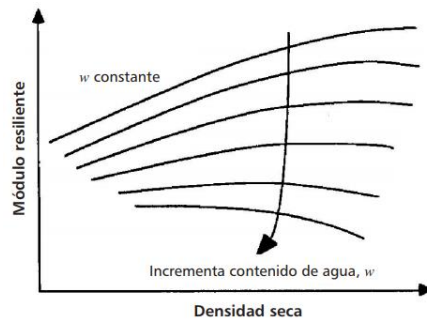


Figura 2.26 Representación del comportamiento del módulo resiliente con cambios en densidad y humedad simultáneamente

Fuente: Adaptado por Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015) de la investigación de Li & Selig (1994)

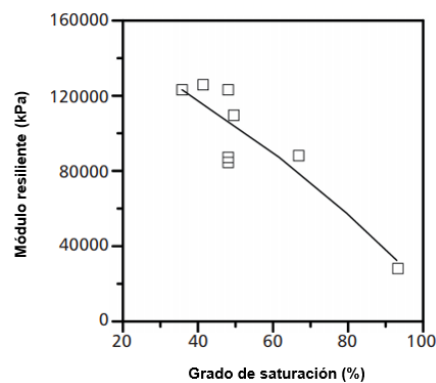


Figura 2.27 Comportamiento del M_r con el grado de saturación

Fuente: Adaptado por Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015) de la investigación de Garnica et al. (2001)

Como se mencionó anteriormente, lo ideal de la subrasante es que se encuentre en el contenido de humedad óptimo determinado por medio del ensayo de compactación, no

obstante, la humedad en la subrasante en campo fluctúa en el tiempo. Es por lo anterior que investigaciones desarrolladas recientemente, se han centrado en el efecto que dichas fluctuaciones pueden causar en el módulo (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Jin et al. (1994) estudiaron el comportamiento del Mr a lo largo de un año para diferentes materiales de construcción de pavimentos, con lo cual llegaron a la conclusión, tal como se observa en la Figura 2.28, que el módulo varía a lo largo del tiempo debido a las variaciones de humedad que se presentan en el terreno causadas por el clima.

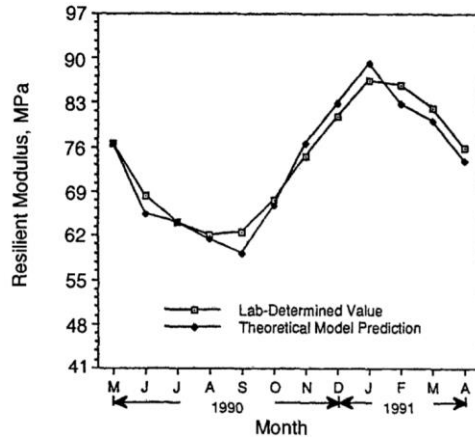


Figura 2.28 Variación del Mr a lo largo de un año

Fuente: Tomado de Jin et al. (1994)

Por su parte, Elias et al. (2004), quienes ejecutaron una serie de ensayos de Mr sobre suelos de subrasante típicos de Wisconsin, concluyeron que éste disminuye cuando el contenido de agua es superior al óptimo (OMC) e incrementa cuando es menor (Figura 2.29).

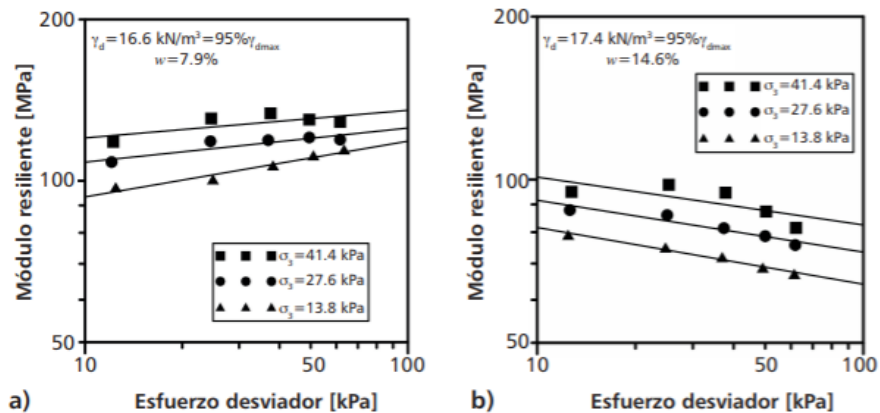


Figura 2.29 Resultados de Mr para muestras de arcilla con humedad debajo del OMC (a) y por encima del OMC (b)

Fuente: Adaptado por Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015) de la investigación de Elias et al. (2004)

La Figura 2.29(a) presentan un comportamiento particular respecto al esfuerzo desviador, ya que en este estado el módulo aumenta con el incremento de dicho esfuerzo, una observación que también presentaron Guzmán-Suárez & Higuera-Sandoval (2016) en su investigación sobre arcillas de la *Loma de los Bernal* en Medellín (Figura 2.30).

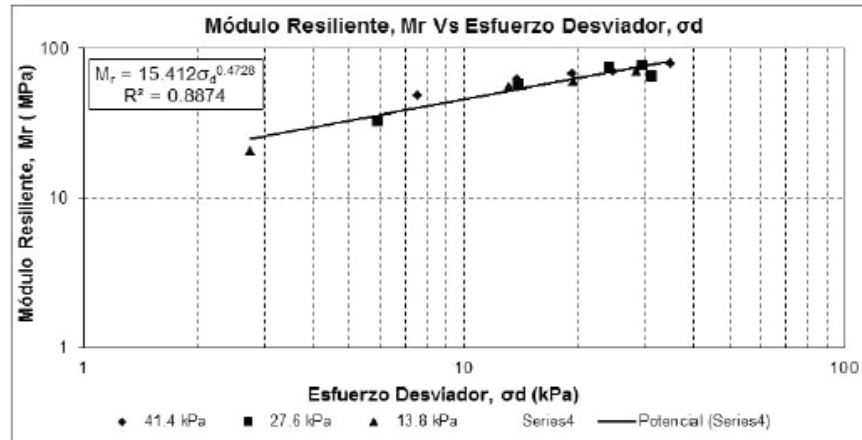


Figura 2.30 M_r en función del esfuerzo desviador para una muestra CL

Fuente: Tomado de Guzmán-Suárez & Higuera-Sandoval (2016)

En la Figura 2.31, se pueden observar los resultados de ensayar arcillas bajo carga triaxial cíclica, algunas fueron fabricadas con el contenido óptimo de humedad (OMC), otras con el contenido de humedad en campo (EMC), el cual era mayor que el óptimo, y otras con una humedad intermedia entre las dos anteriores (TMC). Se puede deducir que el módulo disminuye cuando la humedad óptima es superada, y se pierde dependencia entre las variables cuando se trabaja con dicho contenido en particular (Rondón et al., 2012).

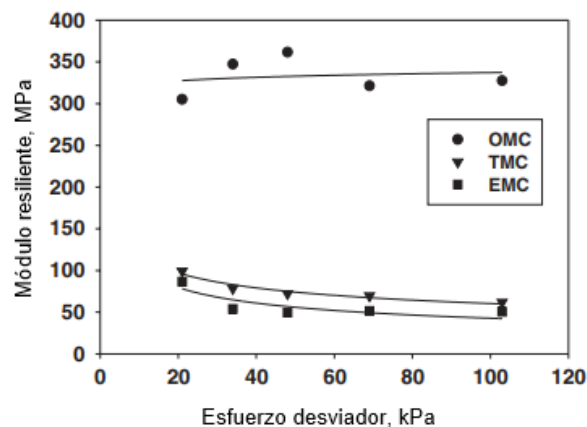


Figura 2.31 Módulo resiliente bajo diferentes esfuerzos desviadores y contenidos de humedad

Fuente: Adaptado por Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015) de la investigación de Yang, Huang, & Tai (2005)

Otros comportamientos que se han evaluado en el módulo resiliente, que tienen en cuenta el agua en el suelo, son los procesos de humedecimiento y secado. Estudios realizados por Khoury et al. (2009) muestran que algunas arcillas pueden aumentar cerca de un 200% su módulo cuando se compactan por encima de la humedad óptima y se dejan secar por debajo de dicho valor antes de ensayo, mientras que el módulo puede aumentar un 80% cuando se preparan a la humedad óptima y se dejan secar. Además, también observaron que cuando se humedece el suelo se presenta una disminución en el M_r , la cual es mayor cuando se humedece desde un contenido de agua por debajo del óptimo que cuando se hace desde el óptimo.

Finalmente, dicha investigación también reportó que el M_r incrementa con el aumento del esfuerzo desviador, algo particular, cuando las muestras se preparan a una humedad por encima de la óptima y luego se dejan secar, especialmente en suelos clasificados como A-4.

Por otra parte, se sabe que la condición de diseño y de evaluación de las propiedades mecánicas de la subrasante es en estado saturado, ya que esta es la condición más crítica. No obstante, se reconoce que en campo la condición del suelo es parcialmente saturado, razón por la cual varios investigadores han generado un gran esfuerzo en comprender el papel de la succión en el M_r (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

De acuerdo con Yang et al. (2005), Sawangsuriya et al. (2009), Han & Vanapalli (2016) y Zhang et al. (2018) la succión matricial es la que presenta una mayor influencia en comparación con la total (Figura 2.32), y el incremento de dicha succión conlleva a un incremento en el M_r (Figura 2.33).

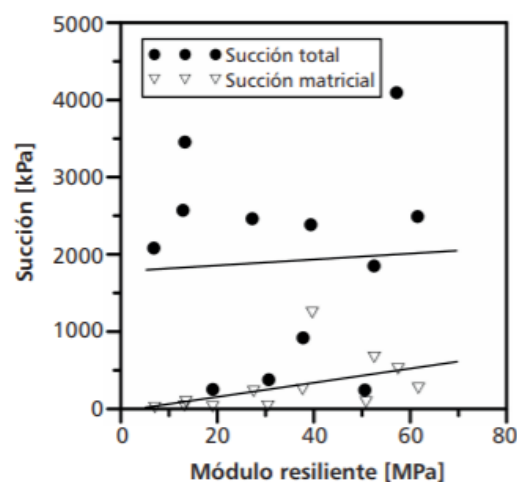


Figura 2.32 Influencia de la succión total y matricial en el M_r

Fuente: Adaptado por Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015) de la investigación de Yang et al. (2005)

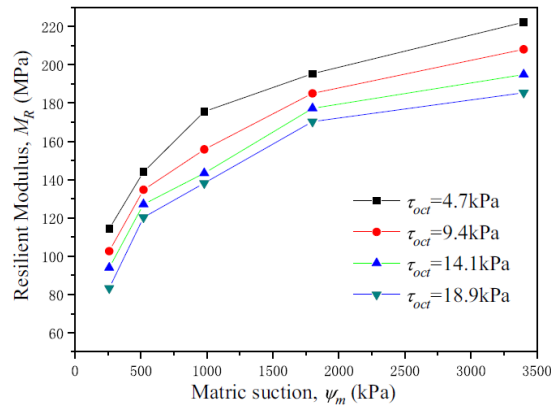


Figura 2.33 Relación entre la succión matricial y el Mr de una muestra CH a un 96% de compactación

Fuente: tomado de Zhang et al. (2018)

Cabe resaltar que, al igual que en algunos de los casos particulares presentados anteriormente, ante elevadas succiones matriciales, el Mr tiende a aumentar con el incremento del esfuerzo desviador, tal como se muestra en la Figura 2.34.

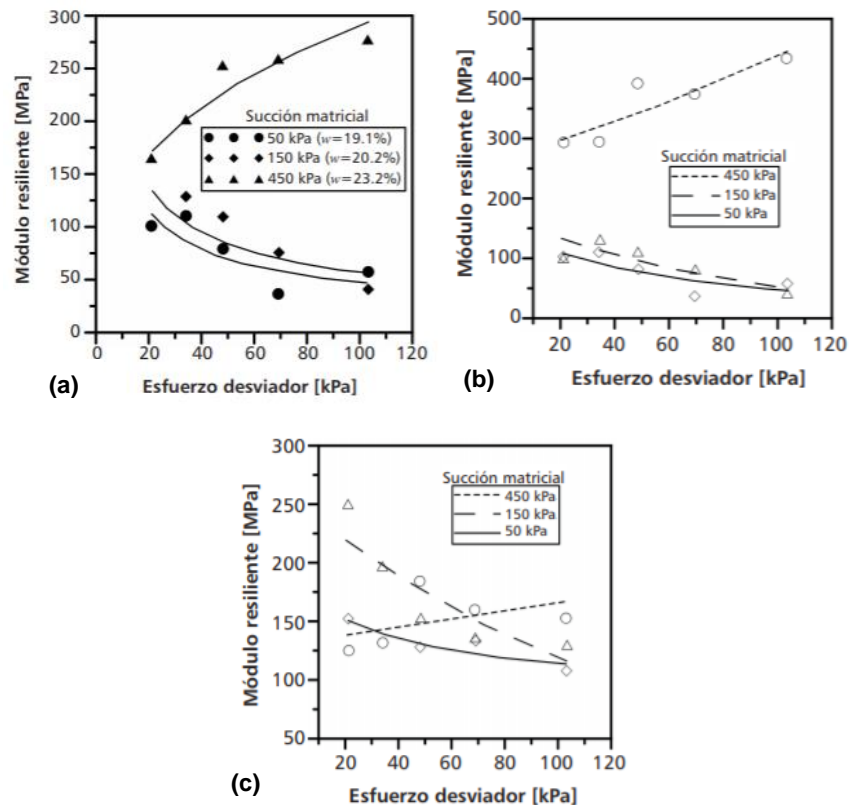


Figura 2.34 Influencia de la succión matricial y del esfuerzo desviador en el Mr

Fuente: Adaptado por Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015) de la investigación de Yang et al. (2005) – (a) y de Kung, Lin, Yang, & Huang (2006) – (b) y (c)

- Otros factores que afectan el comportamiento resiliente

Adicional a los factores mencionados anteriormente, los cuales se consideran los más influyentes, Kim & Siddik (2006) presentan otros factores como la tixotropía y los ciclos hielo-deshielo.

En cuanto a la tixotropía, Seed & Chan, (1957) afirman que cuando las muestras de suelo cohesivo se compactan a un alto grado de saturación, exhiben un aumento significativo en la resistencia si se les permite recuperarse antes de la prueba. Los autores también reportan que después de un cierto número de cargas repetidas (alrededor de 40,000 repeticiones), la tixotropía ya no afectaba las deformaciones recuperables. Esta situación podría atribuirse al hecho de que las deformaciones inducidas en sus ensayos fueron tan grandes, que superaron la resistencia tixotrópica de las muestras.

El efecto de los ciclos hielo-deshielo en el módulo resiliente de un suelo cohesivo de subrasante es significativo (Lee et al., 1995; Kim & Siddiki, 2006). Elliott & Thornton (1988), mencionan la dramática reducción en el módulo resiliente luego de un ciclo hielo-deshielo (Figura 2.35), ellos reportan que dicha reducción puede llegar a ser hasta del 50%. Kim & Siddiki (2006) mencionan que en 1970 se examinó el efecto de estos ciclos sobre las propiedades resilientes de una arcilla glacial de lago de alta plasticidad, lo cual mostró que luego de dos y cuatro ciclos, la reducción del módulo resiliente fue de 63% y 74%, respectivamente.

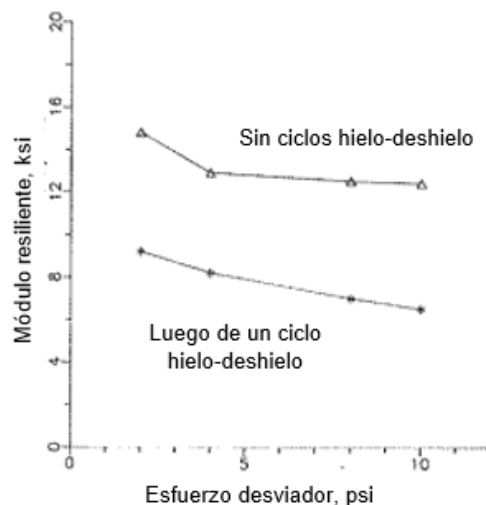


Figura 2.35 Efecto de los ciclos hielo-deshielo en el módulo resiliente en un suelo de subrasante cohesivo

Fuente: Adaptado de Elliott & Thornton, (1988)

2.4.3.3. Modelos constitutivos para suelos finos de subrasante

El concepto de módulo resiliente se ha utilizado para explicar las características no lineales de esfuerzo-deformación de los suelos de subrasante (George, 2004). Durante los últimos

veinte años, varios modelos se han propuesto para predecir este módulo, algunos de ellos dependen del nivel de esfuerzos, mientras que otros, adicionalmente, dependen de las propiedades físicas del material. El objetivo de cualquier modelo matemático propuesto es considerar la mayor cantidad de factores que realmente afecten el material analizado (Li & Selig, 1994; George, 2004; Kim & Siddiki, 2006; Titi & English, 2011).

- Modelos dependientes del estado de esfuerzos

En 1963, Dunlap sugirió la siguiente relación para presentar los datos de módulo resiliente (Dunlap, 1963):

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{k_2}$$

Ecuación 2-9

En la cual σ_3 es la presión de cámara, P_a la presión atmosférica y k_1, k_2 son los coeficientes obtenidos de un análisis de regresión. La limitación de este modelo se encuentra en que no considera el efecto del esfuerzo desviador en el módulo resiliente, factor muy importante en los suelos finos (George, 2004).

Seed et al. (1967) sugirieron una relación en la cual el módulo resiliente es función del esfuerzo "bulk" (θ), $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, éste se conoce como el *modelo k- θ* . Este modelo usa θ como el principal atributo:

$$M_r = k_1 \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2}$$

Ecuación 2-10

El principal inconveniente de este modelo es que no tiene en cuenta los esfuerzos y los cortantes desarrollados durante la carga y, por lo tanto, es aplicable solo en el rango de valores de baja deformación (George, 2004).

Thompson & Robnett (1976) propusieron el *modelo bilineal* que se muestra en la Ecuación 2-11.

$$M_r = k_{19} + k_{21}(k_{20} - \sigma_d) \quad \text{para } \sigma_d < \sigma_{di}$$

$$M_r = k_{19} - k_{22}(\sigma_d - k_{20}) \quad \text{para } \sigma_d > \sigma_{di}$$

Ecuación 2-11

Donde σ_{di} es el esfuerzo desviador en el cual la pendiente de la gráfica M_r Vs. σ_d cambia, y k_i son parámetros de regresión. En la Figura 2.36 se observa esquemáticamente la forma como se obtienen los parámetros k_i (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

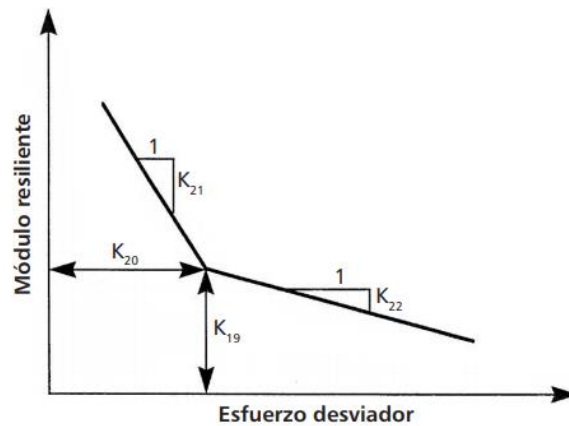


Figura 2.36 Representación esquemática del modelo bilineal

Fuente: Tomado de Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015)

De acuerdo con Li & Selig (1994) y Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015), en 1979, S. F. Brown introdujo la influencia del esfuerzo de confinamiento efectivo (σ'_3) para suelos saturados sobreconsolidados (Ecuación 2-12), donde k y n son parámetros de regresión.

$$M_r = k \left(\frac{\sigma_d}{\sigma'_3} \right)^n$$

Ecuación 2-12

Moossazadeh & Witczak (1981) propusieron una relación conocida como el *modelo del esfuerzo desviador*, recomendada para suelos arcillosos y conocida también como el *modelo $k - \sigma_d$* . Éste usa el esfuerzo desviador como el principal y único atributo del modelo:

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_d} \right)^{k_2}$$

Ecuación 2-13

Aunque este modelo no considera el efecto de la presión de confinamiento en el módulo resiliente, para los suelos arcillosos, este aspecto se considera poco influyente, ya que estos suelos obtienen su resistencia principalmente de la cohesión en lugar de la fricción. Este enfoque de modelación es adecuado para suelos cohesivos que se encuentran a profundidades no muy grandes, para suelos que se encuentran a mayor profundidad bajo cargas de tráfico elevadas, es necesario incluir la presión de confinamiento además del esfuerzo desviador (Yeh & C.K., 1989; George, 2004).

Otro modelo propuesto, utilizado por autores como AASHTO (1993) y Von Quintus & Killingsworth (1997), se presenta para describir el comportamiento no lineal exhibido en la prueba triaxial cíclica (Ecuación 2-14). Este considera los efectos del esfuerzo cortante, la presión de confinamiento y el esfuerzo desviador, con un modelo formulado en términos del esfuerzo "bulk" y desviador:

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3}$$

Ecuación 2-14

La norma AASHTO T 292-91 (*Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrade Soils and Untreated Base/Subbase Materials*) sugiere el uso de la siguiente ecuación, a la cual llama *Power Model* (AASHTO, 1992):

$$M_r = k_1 (\sigma_d)^{k_2}$$

Ecuación 2-15

Andrei et al. (2004) introducen a la Ecuación 2-15 la influencia de la presión de confinamiento:

$$M_r = k_1 (\sigma_3)^{k_2} (\sigma_d)^{k_3}$$

Ecuación 2-16

De acuerdo con George (2004), Uzan introdujo en 1992 el concepto de cortante octaédrico (τ_{oct}) en lugar del esfuerzo desviador, lo que proporcionó una mejor explicación del estado de esfuerzos del material, en el que el esfuerzo normal y cortante cambian durante la carga. El modelo propuesto se conoce como *modelo k1-k3* o *modelo universal*. La universalidad de este modelo se deriva de su capacidad para representar conceptualmente todo tipo de suelos:

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3}$$

Ecuación 2-17

Donde,

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

Si $\sigma_2 = \sigma_3$, como es el caso de los ensayos triaxiales, entonces:

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d$$

Los valores k_1, k_2, k_3 son constantes y dependen del tipo de material y de sus propiedades físicas, son obtenidos mediante un análisis de regresión. Dado que k_1 es proporcional al módulo de Young, éste siempre debe ser positivo, puesto que el módulo resiliente nunca es negativo. El exponente k_2 debe ser positivo debido al incremento del esfuerzo volumétrico que produce el endurecimiento del material. Finalmente, k_3 debe ser negativo (excepto en los casos particulares donde se presenta succión) a consecuencia de que un incremento del esfuerzo cortante debilita el material y, por consiguiente, disminuye el módulo. Si los valores de k_2 y k_3 se establecen en cero, entonces el modelo se puede

simplificar como elástico lineal. Si k_3 es cero, el comportamiento podría ser un endurecimiento no lineal y si k_2 es cero, el comportamiento es un ablandamiento no lineal (George, 2004).

Varias versiones de la ecuación universal están siendo usadas actualmente para predecir/calcular el módulo resiliente. Un ejemplo de lo anterior, y una de las más aceptadas, es la ecuación propuesta por el proyecto NCHRP 1-28A y adoptado por el proyecto NCHRP 1-37A, en los cuales el investigador principal fue Witczak, para su implementación en el diseño empírico-mecanicista de pavimentos. El modelo se puede utilizar para todos los tipos de materiales de subrasante y se define por (Witczak, 2003; Titi & English, 2011):

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta - 3k_6}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + k_7 \right)^{k_3}$$

Ecuación 2-18

Una versión simplificada de la expresión anterior, propuesta por la MEPDG en el 2002, se presenta a continuación:

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Ecuación 2-19

Otro ejemplo de la modificación del modelo universal, es el modelo propuesto por la *Long Term Pavement Performance Research - LTPPR* (Stubstad, 2002), que se presenta en la Ecuación 2-20.

$$\log \left(\frac{M_r}{P_a} \right) = k_1 + k_2 \log \left(\frac{\theta}{P_a} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right) + k_4 * \left(\log \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right) \right)^2$$

Ecuación 2-20

En la expresión anterior, se ha introducido un término adicional de segundo orden del cortante octaédrico. Esta ecuación es recomendada cuando los resultados de dicho cortante presentan un comportamiento no lineal muy marcado (George, 2004).

Es importante resaltar que, en cuanto a la precisión de las diferentes ecuaciones existentes, luego de un análisis realizado por la NCHRP en su proyecto 1-37A, dicha entidad concluyó que aquellos modelos que únicamente usan uno de los dos componentes de la carga (volumétrico o desviador) son menos precisos: Para todos los materiales, independientemente de su comportamiento mecánico (fino o granular), el módulo resiliente es una función de ambos. El efecto de agregar la segunda variable en un modelo, en general, incrementa en un 30% el coeficiente de correlación (R^2) (Witczak, 2003).

- Modelos dependientes de propiedades físicas y el estado de esfuerzos

Tal como se mencionó anteriormente, existen algunos modelos en la literatura que no dependen, o al menos no únicamente, del estado de esfuerzos, sino también de las propiedades físicas del material.

De acuerdo con Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015), en 1985 Gomes Correia introdujo el límite plástico (LP) como un parámetro que afecta el M_r mediante el modelo:

$$M_r = a + b * p'_0 + c * q_r + d + LP$$

Ecuación 2-21

Donde p'_0 es la presión efectiva media inicial medida, q_r el esfuerzo desviador cíclico y a, b, c, d son constantes de regresión.

Por su parte, Thompson & LaGrow (1988), proponen el siguiente modelo, útil para arcillas compactadas al 95% de la densidad seca máxima de Proctor:

$$M_r = a + b * (\%arcilla) + c * (IP)$$

Ecuación 2-22

En la cual $\%arcilla$ es la cantidad de arcilla de la muestra en porcentaje, IP es el índice de plasticidad, y a, b, c son parámetros de regresión (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Farrar & Turner (1991) recomendaron la siguiente ecuación, basada en 13 suelos típicos de Wyoming:

$$M_r = a + b * S + b * \sigma_d + c * \sigma_3 + d * IP + e * (\#200)$$

Ecuación 2-23

En la cual S es el grado de saturación, σ_d el esfuerzo desviador, σ_3 la presión de confinamiento, IP el índice de plasticidad, #200 es el porcentaje de material que pasa el tamiz No 200 en el ensayo de granulometría, y a-e son los parámetros obtenidos por regresión (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Rahim & George (2005) proponen para suelos finos la siguiente expresión:

$$M_r = a \left[\left(\frac{LL}{w_c + 1} \gamma_d \right)^b + \left(\frac{\#200}{100} \right)^c \right]$$

Ecuación 2-24

Donde LL es el límite líquido, w_c es el contenido de agua, γ_d la densidad seca, #200 el porcentaje de material que pasa el tamiz No 200 en el ensayo de granulometría, y a, b, c son parámetros de regresión (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Elias & Titi (2006), basados en un estudio sobre 17 suelos de subrasante de Wisconsin, propusieron obtener las constantes k de la Ecuación 2-16 mediante las siguientes expresiones:

$$k_1 = a + b * IP + c * \gamma_d + d \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)$$

Ecuación 2-25

$$k_2 = e + f * IP + g * \left(\frac{w}{w_{opt}} \right) \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \right)$$

Ecuación 2-26

$$k_3 = h + i * IP + j * \gamma_d + k * \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)$$

Ecuación 2-27

En las cuales IP es el índice de plasticidad, γ_d la densidad seca del suelo, γ_{dmax} es la densidad seca máxima que puede alcanzar el suelo en el ensayo de Proctor, w el contenido de agua y w_{opt} es el contenido de humedad óptimo obtenido en el ensayo de Proctor (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

2.4.3.4. Ensayo estándar de M_r

De acuerdo con INVIAS (2013), el ensayo de *Módulo resiliente de suelos y agregados (INV-E-156-13)*, consiste en aplicar un esfuerzo axial repetido, de magnitud, duración (0.1 s) y frecuencias fijas, a un espécimen cilíndrico de ensayo, debidamente preparado y acondicionado. Durante todo el ensayo la muestra también es sometida a un esfuerzo estático llamado presión de cámara (Figura 2.37). Se mide la deformación axial total resiliente y se calcula el módulo resiliente relacionando dicha deformación con el esfuerzo desviador axial correspondiente. La secuencia de ensayo pedida para suelos de subrasante se presenta en la Tabla 2.4.

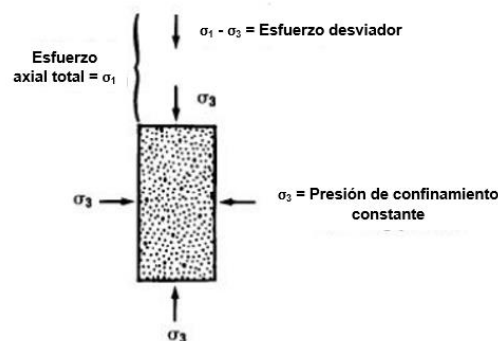


Figura 2.37 Esquema de aplicación de las cargas en un ensayo de M_r

Fuente: Adaptada de Maher, Bennert, & Gucunski (2000)

Tabla 2.4 Secuencia de ensayo para suelos de subrasante

Secuencia No.	Presión de cámara σ_3	Esfuerzo axial máximo σ_{max}	Esfuerzo cíclico $\sigma_{cíclico}$	Esfuerzo constante $0.1\sigma_{max}$	Número de aplicaciones de carga
	(kPa)	(kPa)	(kPa)	kPa	
0	41.4	27.6	24.8	2.8	500-1000
1	41.4	13.8	12.4	1.4	100
2	41.4	27.6	24.8	2.8	100
3	41.4	41.4	37.3	4.1	100
4	41.4	55.2	49.7	5.5	100
5	41.4	68.9	62.0	6.9	100
6	27.6	13.8	12.4	1.4	100
7	27.6	27.6	24.8	2.8	100
8	27.6	41.4	37.3	4.1	100
9	27.6	55.2	49.7	5.5	100
10	27.6	68.9	62.0	6.9	100
11	13.8	13.8	12.4	1.4	100
12	13.8	27.6	24.8	2.8	100
13	13.8	41.4	37.3	4.1	100
14	13.8	55.2	49.7	5.5	100
15	13.8	68.9	62.0	6.9	100

Fuente: Tomado de INVIAS (2013)

2.4.3.5. Correlaciones del M_r con el CBR y el DN

Típicamente, el M_r es determinado usando correlaciones con parámetros empíricos simples (no dependientes del nivel de esfuerzo) como el CBR o el DN obtenido con el PDC, desarrolladas por diferentes investigadores o agencias (Witczak et al., 1995), algunas de ellas se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Correlaciones M_r -CBR y M_r -DN (in/golpe)

Referencia	Autor/año	Correlación
(Witczak et al., 1995)	Heukelom y Klomp, 1962	$M_r(ksi) = 1500 * CBR$
	U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 1975	$M_r(ksi) = 5409 * CBR^{0.711}$
	South African Council on Scientific and Industrial Research (CSIR)	$M_r(ksi) = 3000 * CBR^{0.65}$
	Transport and Road Research Laboratory (TRRL), 1987	$M_r(ksi) = 2555 * CBR^{0.64}$
(Dione et al., 2015)	Heukelom y Foster, 1960	$M_r(ksi) = 1565 * CBR$
	Powell et al., 1984	$M_r(ksi) = 2554 * CBR^{0.64}$
(George & Uddin, 2000)	Hassan, 1987	$M_r(ksi) = 7013.065 - 2040.783 \ln(DN)$

Fuente: Elaboración propia

Esta tendencia de no realizar directamente el ensayo de Mr se debe principalmente a que el aparato triaxial utilizado es costoso, complejo y la ejecución del ensayo requiere de personal calificado, además de necesitar de un número considerable de muestras para llegar a resultados confiables; razones por las cuales el ensayo no está disponible en todos los laboratorios, especialmente en países en vía de desarrollo (Razouki & Al-shefi, 2002; Rahim & George 2005; Nam et al., 2014; Dione et al., 2015).

Con el actual conocimiento en el tema, es evidente que la respuesta típica de la subrasante es no lineal y es una función del estado de esfuerzos, afectado por las secciones transversales de la estructura de pavimento (Cambio en los espesores de las capas) y/o diferentes módulos de cada capa y de las condiciones de humedad y densidad establecidas, por lo que el valor de Mr de una subrasante no es constante, razón por la cual el uso de correlaciones para su determinación es cada vez más cuestionado (Witczak et al., 1995).

Igualmente, Dione et al. (2015) asegura que las correlaciones que se presentan en la literatura son limitadas, muchas de ellas únicamente son aplicables en suelos arcillosos con un muy bajo valor de CBR. En el caso de la correlación presentada por Heukelom y Klomp (Tabla 2.5), por ejemplo, se ha encontrado que no es recomendable para determinar el Mr, ya que subestima el valor cuando el CBR es menor a 5% y lo sobreestima cuando es mayor a dicho porcentaje. Así mismo, Hopkins et al. (2007) reportaron que la dispersión en la predicción de los valores de Mr por la ecuación de Heukelom y Klomp se debe a la ausencia de un esfuerzo desviador en la expresión y que la relación es válida para valores menores de 10% o 20% de CBR.

Por su parte, autores como Hight & Stevens (1982), Drumm et al. (1990), Sukumaran et al. (2002) y Leung et al. (2013), también han presentado evidencia que cuestiona el uso de correlaciones para la obtención de valores de rigidez a partir de procedimientos empíricos. Algunos de ellos nunca lograron establecer una correlación confiable y/o consistente entre el CBR y las propiedades de rigidez del suelo, mientras que otros, aseguran que el valor de módulo depende de muchas más variables adicionales al CBR, las cuales se ignoran por completo en las correlaciones propuestas.

En general, la literatura sostiene que, dado que el CBR es una medida de resistencia y no de rigidez, no es posible correlacionarla adecuadamente con el módulo resiliente, motivo por el cual, a pesar de la baja disponibilidad de los equipos para su determinación en muchos laboratorios, se recomienda la ejecución del ensayo.

2.4.4. Ensayo CBR cíclico (cCBR)

Como ya se ha mencionado, existe la necesidad de la comprensión del módulo resiliente para el buen análisis de estructuras de pavimento (Li & Selig, 1994), y que los ensayos cíclicos que permiten determinar dicho módulo no se encuentran ampliamente disponibles

debido a su costo, complejidad y exigencia de trabajadores capacitados (Sas, Gluchowski, Gabrys, & Szymanski, 2015).

En la construcción de carreteras, especialmente las de bajo volumen de tráfico, se cuenta con un presupuesto limitado y, por ende, los ensayos más especializados de materiales están excluidos del proceso de diseño (Araya et al. 2011). Además, el control de calidad en los laboratorios depende de pruebas rápidas y prácticas que tengan aplicación de sus resultados en el proceso de diseño (Sas et al., 2015).

El avance en la investigación sobre la respuesta de los suelos ante cargas cíclicas, ha impulsado el deseo y la necesidad de obtener el valor de módulo resiliente sin necesidad de correlaciones, con el objetivo de generar menor incertidumbre en el diseño de pavimentos (Sas et al., 2015). Drumm et al. (1996), Smolen et al. (2006), Araya (2011), Sas & Głuchowski (2013) y Sas et al. (2017) han estudiado este problema con el fin de generar métodos alternativos para estimar el módulo resiliente

Dentro de estos métodos, se encuentra uno que propone la modificación o extensión del ensayo de CBR, ajustado para simular las cargas cíclicas a las que está sometido un pavimento mediante la realización de la prueba de CBR con la aplicación de ciclos de carga, el cual se conoce como ensayo *CBR cíclico (cCBR)*. (Uzan, 1985, 2004; Araya, 2011; Sas & Głuchowski, 2013; Sas et al., 2017).

2.4.4.1. Principio del ensayo cCBR

El principio del ensayo cCBR es utilizar el equipo convencional de CBR, pero aplicando cargas repetitivas hasta llegar a un estado en el cual la deformación permanente sea nula o despreciable (Araya, 2011); las dimensiones del molde, la velocidad de aplicación de la carga, el diámetro del pistón y el uso de sobrecargas, generalmente, no varía respecto al estándar (Sas et al., 2015). Varios autores han modificado algunas de estas variables con la expectativa de llegar a resultados más confiables en algunos materiales específicos, como es el caso de los materiales granulares (Araya, 2011; Sas et al., 2015; Sparsha et al., 2016; Haghghi et al., 2017; Nini, 2017; Sas et al., 2017).

2.4.4.2. Desarrollo del ensayo cCBR

Uno de los primeros intentos para usar el ensayo cCBR fue realizado por Molenaar (2007). Su objetivo fue determinar las características mecánicas de algunos materiales de manera tal que fueran posibles los análisis empírico-mecanicistas. Durante este proyecto, se prestó mucha atención a la selección de ensayos aplicables en los países en desarrollo, en los que la escasez de recursos podría dificultar, entre otras, el uso de equipos para pruebas cíclicas.

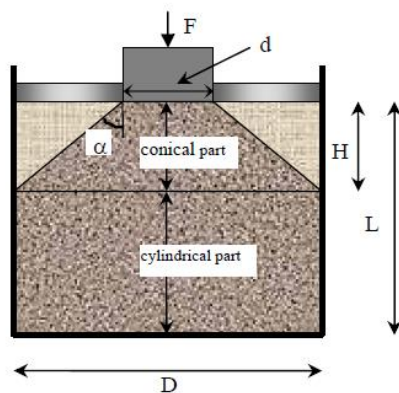
Durante este proyecto utilizaron siete tipos de materiales diferentes: Lateritas de Ghana y Surinam, arcillas expansivas de Surinam, mezcla de arena con conchas de Surinam, arcilla

expansiva de Etiopía, ceniza volcánica de Etiopía, agregado local de Etiopía y material volcánico de Yemen.

Para la ejecución del ensayo cCBR en este estudio, se preparó la muestra en el laboratorio y se cargó para obtener una penetración de 0.1” y 0.2”, del mismo modo que lo establece el ensayo de CBR. Luego la carga es liberada y aplicada nuevamente un número de repeticiones sucesivas. Durante las fases de carga y descarga, las deformaciones permanente y resiliente son registradas continuamente. Con base a la deformación resiliente y a la carga aplicada, el módulo se calculó a partir de tres ecuaciones desarrolladas por Opiyo (1995): (i) una de ella es una ecuación empírica que asume que la deformación elástica ocurre en una parte cónica y en una parte cilíndrica, siendo la deformación total la suma de ambas (Ecuación 2-28 y Figura 2.38); (ii) otra es una simulación de elementos finitos en la cual se asume una fricción total entre el molde y la muestra (Ecuación 2-29); y (iii) otra es una simulación que establece un deslizamiento total entre el molde y el suelo (Ecuación 2-30). Cabe resaltar que las simulaciones aquí trabajadas utilizan un estrecho rango de propiedades elásticas (Relación de Poisson y módulo de elasticidad) para la obtención de resultados.

$$E = \frac{\sigma_0 * d}{u * D} * \left[H + \frac{d(L - H)}{D} \right]$$

Ecuación 2-28



- $E =$ Módulo resiliente mediante cCBR (MPa)
- $\sigma_0 =$ Esfuerzo aplicado (MPa)
- $d =$ Diámetro del pistón (mm)
- $u =$ Deformación elástica (mm)
- $D =$ Diámetro del molde de CBR (mm)
- $H =$ Altura de la parte cónica (mm)
- $L =$ Longitud del espécimen (mm)

Figura 2.38 Deformación cónica y cilíndrica en la solución aproximada para calcular el módulo mediante el cCBR

Fuente: Tomado de Araya (2011)

$$E = \frac{1.375 * (1 - \nu^{1.286}) * \sigma_p * a}{w^{1.086}}$$

Ecuación 2-29

$$E = \frac{1.797 * (1 - \nu^{0.889}) * \sigma_p * a}{w^{1.098}}$$

Ecuación 2-30

Donde E es el módulo resiliente obtenido en el ensayo cCBR (MPa), a es el radio del pistón del equipo de CBR (mm), w es la deformación resiliente obtenida en el cCBR (mm), σ_p es el esfuerzo aplicado por el pistón (MPa) y ν es la relación de Poisson (Debe ser estimada o establecida).

Aunque el objetivo de esta investigación no fue correlacionar el valor de módulo resiliente obtenido mediante un ensayo cíclico estándar con el módulo obtenido con el cCBR, se demostró que este último es útil para determinar las propiedades mecánicas de los materiales. Adicionalmente, se estableció, para las lateritas, una correlación entre el ensayo de cCBR (Usando Ecuación 2-29) y el CBR:

$$E(\text{MPa}) = 4 * \text{CBR}^{1.117}$$

Ecuación 2-31

Lo cual muestra que, tal como lo menciona Molenaar (2007), el uso de las correlaciones de la literatura entre CBR y el Mr para los cálculos de diseño empírico-mecanicistas debe abordarse con extrema precaución. Es obvio que la famosa relación $E(\text{MPa}) = 10 * \text{CBR}$, desarrollada por los investigadores de Shell, no es aplicable para este tipo de materiales.

Más adelante, Molenaar (2008), presentó una de las primeras correlaciones entre el módulo obtenido de un ensayo triaxial cíclico y el determinado con el cCBR para una arena y una arcilla expansiva (*Black Cotton Clay*). El CBR cíclico fue ejecutado sobre muestras preparadas en el laboratorio, ensayadas a una velocidad de 1.27mm/min, a unas penetraciones objetivo (0.1", 0.2" y 0.3" en algunos casos) y se ejecutaron 50 ciclos de carga-descarga (La descarga se ejecutó hasta que el equipo reportara un valor de cero). Normalmente este ensayo es restringido a 0.1" de penetración para evitar un exceso de deformación permanente durante los ciclos aplicados después del primer ciclo de carga.

Para efectos de esta investigación, el autor le llamó al módulo resiliente obtenido mediante el cCBR *módulo efectivo* (E_{eff}), porque este valor refleja la rigidez general o promedio de la muestra en lugar del Mr del material. Este módulo efectivo se puede calcular mediante la Ecuación 2-29 y la Ecuación 2-30, las cuales, según el autor, presentan resultados similares entre ellas y, por ende, la selección de una o de la otra no presenta una gran influencia en el análisis del comportamiento resiliente del material mediante el cCBR, especialmente si se tiene en cuenta que esta prueba no pretende determinar un valor "exacto" para el Mr, sino un valor realista para el E_{eff} .

La Ecuación 2-14 se aplicó para obtener los módulos resilientes a correlacionar con los obtenidos a partir del ensayo triaxial cíclico. Cuando se analizaron los datos de la arena, se encontró que el E_{eff} era el mismo que el módulo determinado por medio de pruebas triaxiales cíclicas, si esas pruebas se realizaban a una presión de cámara menor a 20 kPa. Esto implica que el E_{eff} debe ajustarse si es necesario predecir los valores de Mr a otros niveles de confinamiento. Este ajuste se realizó mediante la expresión dada por la Ecuación 2-32.

$$Mr_{triaxial} = k_1 * \sigma_3^{k_2} * E_{eff}$$

Ecuación 2-32

Donde Mr es el módulo resiliente como se obtendría de una prueba triaxial cíclica (MPa), σ_3 es la presión de cámara usada en el ensayo triaxial en kPa (>20kPa), E_{eff} es el módulo efectivo determinado mediante el ensayo cCBR (MPa) y los valores de las constantes en este caso particular fueron $k_1 = 0.211$ y $k_2 = 0.563$.

En cuanto a la arcilla expansiva, cuando los valores de E_{eff} obtenidos de la prueba de cCBR se compararon con los valores de Mr obtenidos mediante la prueba triaxial cíclica, se pudo desarrollar la Ecuación 2-33.

$$Mr_{triaxial} = (k_1 * w + k_2 * \sigma_3 - k_3) * E_{eff}$$

Ecuación 2-33

Donde $k_1 = 0.04$, $k_2 = 0.006$, $k_3 = 0.05$ y w es el contenido de humedad en porcentaje (%). Cabe resaltar que para ninguna de las dos correlaciones establecidas por este autor se presentan valores de ajuste (R^2).

Araya et al. (2010), motivados por presentar un procedimiento de fácil acceso para la ingeniería de pavimentos en países en vía de desarrollo para materiales granulares, usaron una muestra de grava triturada de alta calidad de Sudáfrica para ejecutar un ensayo CBR y a partir de allí el cCBR, y lo compararon con resultados obtenidos mediante el ensayo triaxial cíclico.

En todos los ciclos del cCBR se aplicó la misma carga, la necesaria para penetrar 2.54mm, la velocidad de aplicación fue de 1.27mm/min y la descarga se llevó hasta una fuerza de contacto mínima de 0.1MPa. El ensayo se ejecutó hasta que se presentó un valor de deformación elástica prácticamente constante (Figura 2.39). Las deformaciones fueron registradas mediante un LVDT vertical ubicado en la parte superior del molde, y para la estimación del módulo se tomó el promedio de la deformación presentada en los últimos 5 ciclos de los 100 que se le aplicaron.

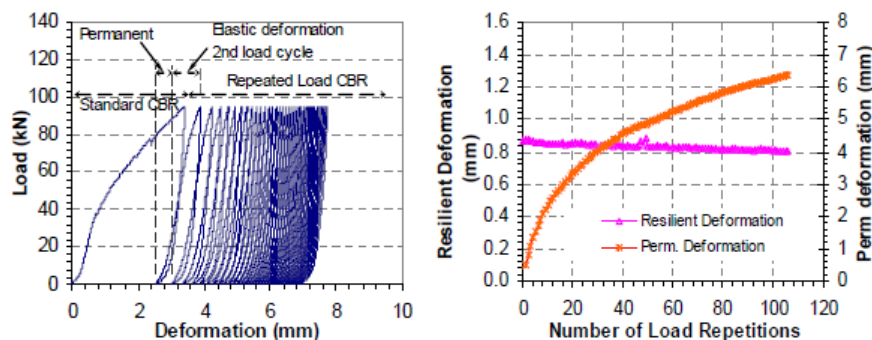


Figura 2.39 Patrón de carga-deformación (Izquierda) y deformaciones (Derecha) en el ensayo de cCBR

Fuente: Tomado de Araya et al. (2010)

Para el caso del material granular, se conoce que el ensayo estándar de CBR permite un tamaño máximo nominal de 19mm, de tener presencia de partículas de mayor tamaño, estas deben ser removidas y reemplazadas por material entre 19mm y 4.75mm; esta modificación cambia completamente las características del material original a ensayar. Es por esto que, para evitar el cambio de la gradación, utilizaron un molde de mayor tamaño, con un diámetro de 250mm. De acuerdo con esta nueva dimensión, el pistón también debe ser modificado para ser proporcional al diámetro, razón por la cual se usó uno de 81.5mm (Figura 2.40).

$$M_r = k_1(\theta)^{k_2}$$

Ecuación 2-34

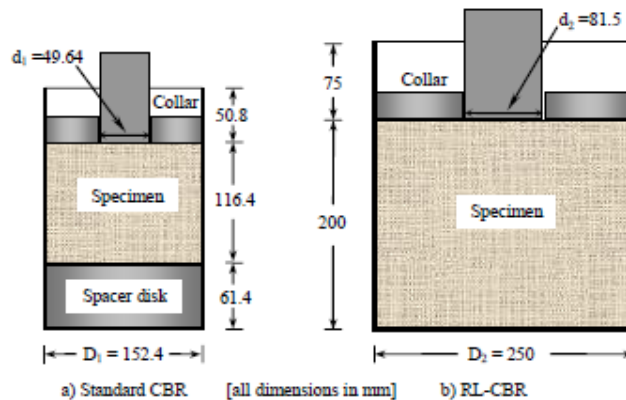


Figura 2.40 Molde estándar de CBR y molde usado para material granular

Fuente: Tomado de Araya (2011)

En la Figura 2.41 se muestran algunos resultados obtenidos mediante el ensayo cCBR y mediante el ensayo triaxial cíclico, usando un modelo constitutivo clásico en suelos granulares (Ecuación 2-34). Es importante resaltar que para el ensayo cCBR, el módulo es determinado con la Ecuación 2-29, asumiendo una relación de Poisson ν de 0.45, y aquí se le llama módulo equivalente (E_{equi}).

Como se puede observar en la Figura 2.41, para materiales gruesos de base y subbase, el E_{equi} obtenido de la prueba cCBR no se puede usar directamente para el análisis y diseño de pavimentos, ya que los niveles de carga que se tuvieron que usar durante las pruebas y, en consecuencia, los esfuerzos en la muestra, son bastante altos en comparación con las cargas de la prueba triaxial y las cargas reales de tráfico. Por lo tanto, para utilizar el resultado de una prueba cCBR se debe generar una corrección de dicho valor a los niveles de esfuerzo utilizados en la prueba triaxial. Para dicha corrección, se utilizó una correlación entre los resultados de los dos ensayos, encontrando un esfuerzo reducido o corregido del pistón, y así obtener un módulo que sea comparable al resultado de la prueba triaxial y que se pueda usar para el diseño y análisis de pavimentos.

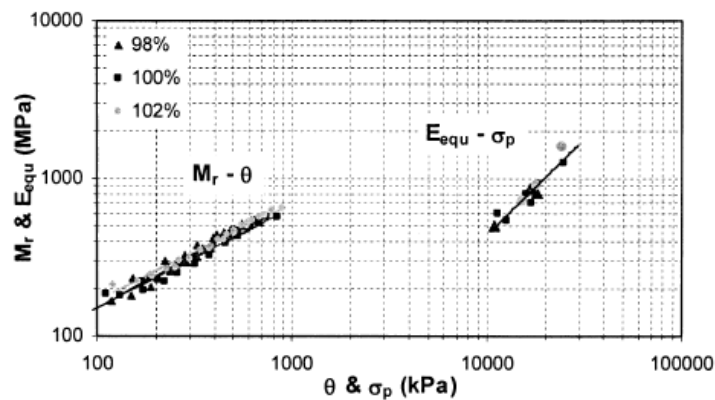


Figura 2.41 Comparación entre el módulo resiliente y el módulo equivalente

Fuente: Tomado de Araya et al. (2010)

Igualando la Ecuación 2-29 y la Ecuación 2-34 es posible obtener el esfuerzo del pistón (σ_p) en el que el módulo determinado a partir del cCBR es el mismo que el M_r obtenido de una prueba triaxial cíclica a un cierto nivel de esfuerzo (Ecuación 2-35).

$$\frac{1.375 * (1 - \nu^{1.286}) * \sigma_p * a}{w^{1.086}} = k_1(\theta)^{k_2}$$

$$\sigma_p = \frac{w^{1.086} * k_1(\theta)^{k_2}}{35.965}$$

Ecuación 2-35

Aunque dicho método mediante la corrección del esfuerzo del pistón se establece como una opción para obtener el M_r a partir del ensayo cCBR, la mayor limitación se encuentra en que, para obtener las constantes k_1 y k_2 , se debe ejecutar el ensayo estándar de M_r , razón por la cual sigue siendo un procedimiento limitado en lugares donde no se cuente con la posibilidad de ejecutar dicho ensayo.

Araya (2011) y Molenaar et al. (2011) llegaron a las mismas conclusiones antes mencionadas, no obstante, sus análisis sobre suelos granulares se realizaron mediante una modificación en la ecuación utilizada para determinar el E_{equi} , como se indica en la Ecuación 2-36:

$$E = \frac{1.513 * (1 - \nu^{1.104}) * \sigma_p * a}{w^{1.012}}$$

Ecuación 2-36

Esta nueva ecuación, también determinada mediante simulaciones del ensayo de CBR por medio de técnicas de elementos finitos, se propone como una versión mejorada, ya que reemplaza las dos condiciones extremas de fricción total y deslizamiento total utilizadas anteriormente, con un mejor comportamiento entre el material y el molde, además de tener en cuenta un mayor rango de propiedades elásticas de los materiales.

Los autores presentaron una modificación en el ensayo: Dado que hasta ese momento la prueba no permitía determinar el confinamiento de la muestra, por la naturaleza compleja de los esfuerzos producidos dentro del molde, se ubicaron unos medidores que permiten determinar la deformación lateral del molde, y de allí calcular el confinamiento de la muestra (Figura 2.42) (Araya, 2011; Araya et al., 2011; Araya et al., 2012).



Figura 2.42 Ensayo de cCBR con medidores de deformación lateral

Fuente: Tomado de Araya (2011)

Al conocer el confinamiento de la muestra y el estado de esfuerzos, los resultados del E_{equi} son directamente comparables con los valores de M_r determinados mediante el ensayo triaxial. Un ejemplo de dicha correlación para uno de los materiales granulares evaluados por los autores se muestra en la Figura 2.43.

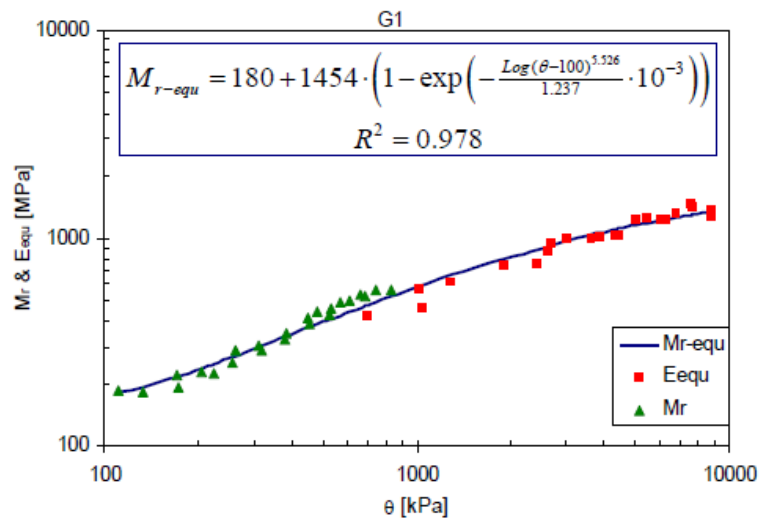


Figura 2.43 Correlación entre el M_r y el E_{equi} mediante cCBR con medidores de deformación

Fuente: Tomado de Araya (2011)

Sas et al. (2012) hicieron uso del cCBR para determinar el módulo resiliente de una arcilla arenosa natural y posteriormente estabilizada con cal a diferentes tiempos (1 hora, 14 días y 30 días). El objetivo principal de dicha investigación fue presentar la relación existente entre los resultados del ensayo CBR y el CBR calculado a partir del módulo obtenido en el cCBR (Ecuación 2-37), usando la expresión presentada en la Ecuación 2-38 (Ecuación propuesta por la AASHTO).

$$M_{r-cCBR} = \frac{\sigma_{pistón}}{\epsilon_r}$$

Ecuación 2-37

$$M_r(kPa) = 10340 * CBR$$

$$CBR_{c-CBR} = \frac{M_{r-cCBR}}{10340}$$

Ecuación 2-38

La comparación entre estos dos valores de CBR se puede observar en la Figura 2.44, donde es claro que los resultados de CBR obtenidos directamente en condiciones estáticas difieren significativamente de los resultados obtenidos mediante el cCBR. Estas diferencias pueden influir en los resultados de CBR, siendo sobrevalorados para el diseño de pavimentos.

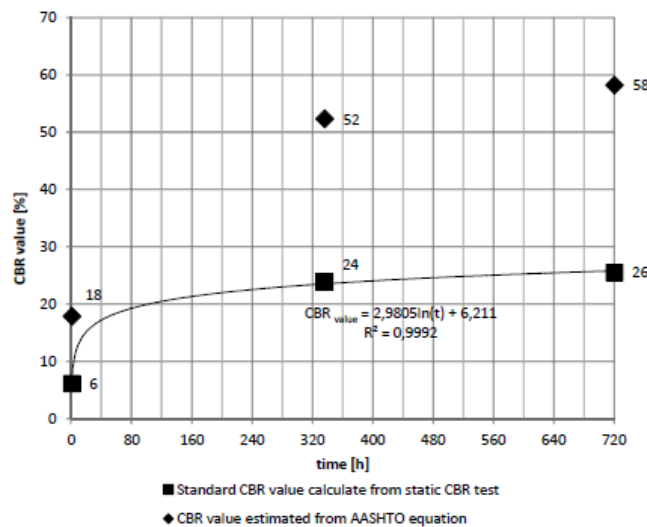


Figura 2.44 Valores de CBR convencional y obtenidos a partir del Mr reportado en el cCBR a diferentes tiempos de estabilización

Fuente: Tomado de Sas et al. (2012)

Las muestras utilizadas, tanto naturales como estabilizadas, fueron preparadas en el laboratorio con la humedad óptima y la densidad seca máxima obtenidas en el ensayo de Proctor estándar. Además, el cCBR se ejecutó con una precarga de 0.05kN, hasta una deformación de 2.54mm, a una velocidad de 1.27mm/min, generando descargas hasta 10

kPa y aplicando los ciclos suficientes hasta que la deformación permanente fue menor al 3% de la deformación total en un mismo ciclo.

Adicionalmente, estos autores también demostraron la gran utilidad del ensayo cCBR para la predicción de la deformación plástica de la subrasante (ahuellamiento), cuando ésta es sometida a una carga cíclica. Se establecieron modelos que permiten determinar la deformación plástica de suelos arcillo-arenosos a diferentes tiempos de estabilización con cal y bajo diferente modelos de deformación plástica, tal como se muestra en la Figura 2.45, en la Figura 2.46 y en la Figura 2.47 (Sas & Gluchowski, 2013a; Sas & Gluchowski, 2013b).

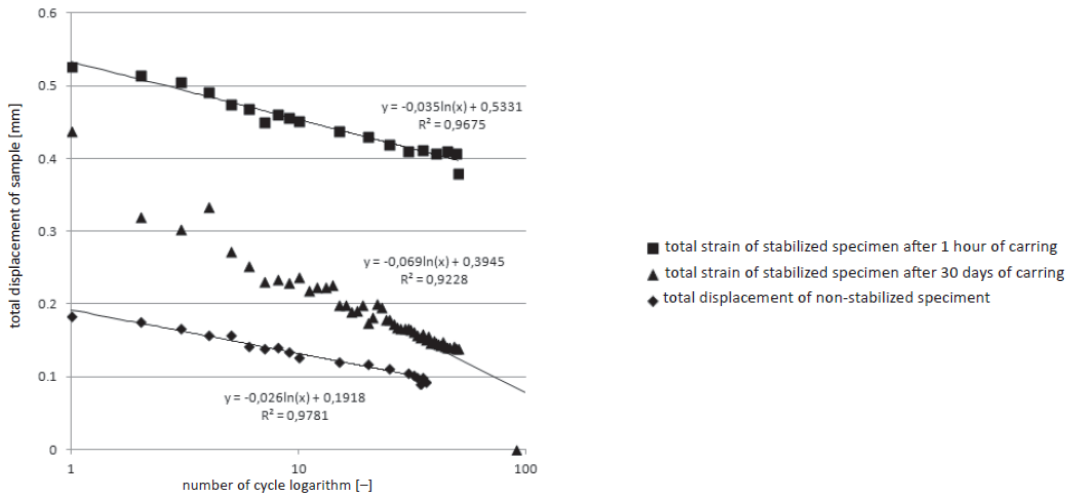


Figura 2.45 Desplazamiento total con el número de ciclos para diferentes tiempos de estabilización

Fuente: Tomado de Sas & Gluchowski (2013a)

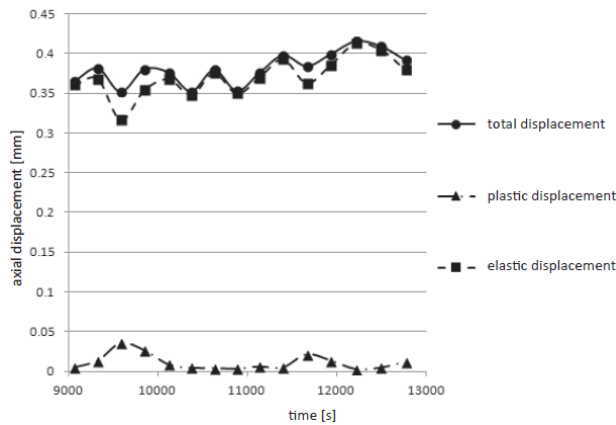


Figura 2.46 Componentes de la deformación total de los últimos 15 ciclos de una de las muestras utilizadas

Fuente: Tomado de Sas & Gluchowski (2013a)

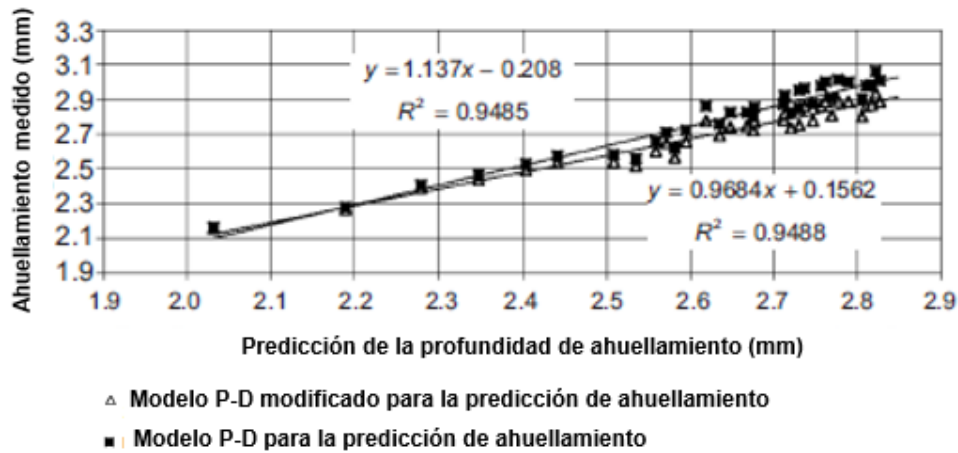


Figura 2.47 Correlación entre la información recolectada y modelada usada para la predicción de ahuellamiento, obtenida durante el ensayo cCBR

Fuente: Tomado de Sas & Gluchowski (2013b)

Además, para la misma arcilla arenosa, los autores analizaron la relación existente entre el M_r obtenido a partir del cCBR y el módulo mediante ensayos triaxiales (Sas et al., 2015). Con el objetivo de determinar el comportamiento del M_r calculado a partir del ensayo cCBR a diferentes niveles de esfuerzo, este ensayo se ejecutó para una penetración de 0.635mm, una de 1.27mm y una de 2.54mm. Asimismo, dado que no se tiene conocimiento del confinamiento producido, se asumió que este era igual a $0.01\sigma_1$. Este valor se consideró razonable debido a la distribución del esfuerzo sobre el esqueleto mineral del suelo.

Los módulos obtenidos mediante los dos ensayos fueron comparados, y mediante una función de diferencias fue presentada una correlación que permite determinar un M_r a partir del cCBR (M_{rcCBR}) comparable con el del ensayo triaxial:

$$M_{rcCBR} = \Delta\sigma / \varepsilon_r \quad \rightarrow \quad M_{r-correlación} = \frac{M_{rcCBR}}{k_1 * \varepsilon_r^{k_2} + I_p * (1 - \nu)^{k_3}}$$

Ecuación 2-39

Donde $\Delta\sigma$ es el esfuerzo del pistón restando el valor mínimo de descarga (kPa), ε_r es la deformación resiliente obtenida en el cCBR en %, I_p es el índice de plasticidad, ν es la relación de Poisson y k_1, k_2, k_3 son las constantes obtenidas de la función de diferencias.

Aunque no se presenta un valor del coeficiente de determinación (R^2), se muestran los resultados obtenidos a partir del ensayo triaxial cíclico y de la correlación establecida a partir del ensayo cCBR para una de las muestras (Tabla 2.6), y es posible concluir que se presenta un buen ajuste entre el ensayo normalizado de módulo y la correlación establecida, dado que se llegan a valores de M_r similares.

Tabla 2.6 Cálculo del módulo resiliente a partir del ensayo cCBR y del ensayo estándar de módulo

Propiedad	Unidad	Penetración		
		0.625mm	1.27mm	2.54mm
ϵ_{r-cCBR}	(-)	0.000938	0.001296	0.002051
M_{r-cCBR}	MPa	666.19	715.85	874.15
σ_1	kPa	729.95	1032.96	1944.90
$\Delta\sigma$	kPa	625.11	927.81	1792.98
$M_{r-ensayo\ estándar}$	MPa	138.77	146.05	155.79
$M_{r-correlación}$	MPa	136.56	142.05	153.56

Fuente: Adaptado de Sas et al. (2015)

Por otra parte, Sparsha et al. (2016) realizaron una serie de ensayos de cCBR (A deformación controlada y a esfuerzo controlado) y de Mr sobre materiales granulares de base, a diferentes contenidos de humedad, con los cuales concluyeron que el valor del módulo de la prueba de cCBR fue similar en magnitud al valor promedio del Mr determinado bajo la norma estándar (Tabla 2.7), lo que sugiere que se puede adoptar la prueba de cCBR para obtener valores realistas de Mr.

Tabla 2.7 Valores de módulo obtenidos a partir de cCBR y norma estándar a diferentes contenidos de humedad

Condición de humedad	Mr (cCBR a deformación controlada) (MPa)	Mr (cCBR a esfuerzo controlado) (MPa)	Rango de valores de Mr bajo prueba estándar (MPa)	Promedio de los valores de Mr bajo estándar (MPa)
Rama húmeda	107	113	49 – 185	117
Rama seca	145	157	86 – 214	150
Humedad óptima	134	142	82 – 201	141.5

Fuente: Adaptado de Sparsha et al. (2016)

Los ensayos de cCBR a esfuerzo controlado, consistieron en determinar el esfuerzo requerido para generar una penetración de 2.5mm, por medio de un ensayo CBR, y aplicarlo en cada ciclo en incrementos de 0.2kN cada 5 segundos. La descarga también se hizo por escalones, pero se llevaba únicamente hasta el 10% del esfuerzo antes de comenzar el siguiente ciclo, hasta completar 10 (Figura 2.48a), ya que luego de este ciclo se presentaba un comportamiento elástico. Por su parte, los ensayos a deformación controlada fueron ejecutados a una velocidad de 1.25mm/min y las deformaciones con sus respectivas cargas fueron tomadas. Al material se le permitió una máxima penetración de 2.5mm, y una vez lograda se descargaba a la misma velocidad hasta llegar a un 10% del esfuerzo requerido, y esta secuencia se repitió 10 veces (Figura 2.48b), por la misma razón que en el ensayo a esfuerzo controlado. Para obtener el Mr en ambos ensayos se usó el módulo equivalente presentado en la Ecuación 2-28, asumiendo un ángulo de 45° para la deformación cónica (α).

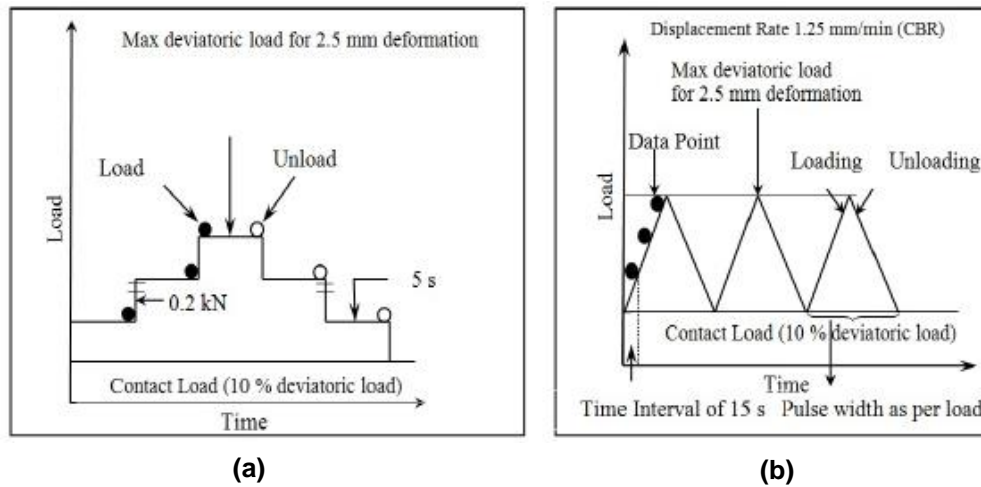


Figura 2.48 Representación esquemática del ensayo cCBR (a) a esfuerzo controlado y (b) a deformación controlada

Fuente: Tomado de Sparsha et al. (2016)

Haghighi et al. (2017), por su parte, también reportan la gran utilidad del ensayo de cCBR para la caracterización del comportamiento resiliente de materiales granulares, mediante el empleo de la Ecuación 2-36 para obtener el módulo equivalente. El objetivo fue determinar, mediante el módulo equivalente, cómo los materiales marginales mejoran su comportamiento cuando son combinados entre ellos, en diferentes condiciones de humedad y densidad; para este caso en particular se evaluó caliza (Ls) y arenisca (Ss) combinadas con riolita de alta calidad (Rh).

Los ensayos se ejecutaron a tres niveles de esfuerzo, todos sobre la misma muestra: el primero al esfuerzo requerido para penetrar 2.54mm, el segundo a un esfuerzo 30% mayor y el último a un 30% más del segundo, cada uno de ellos a una velocidad de 1mm/min completando 10 ciclos de carga-descarga (Figura 2.50). Adicionalmente, para obtener una mayor cantidad de datos, ejecutaron ensayos por ambos lados de la muestra (Figura 2.49).

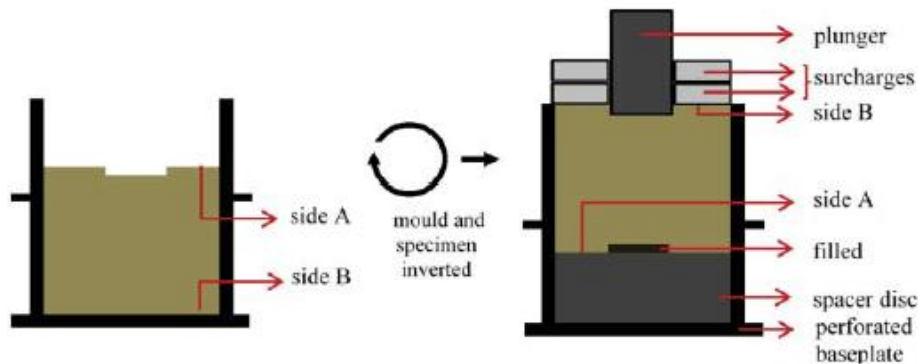


Figura 2.49 Esquema de ejecución de ensayos

Fuente: Tomado de Haghighi et al. (2017)

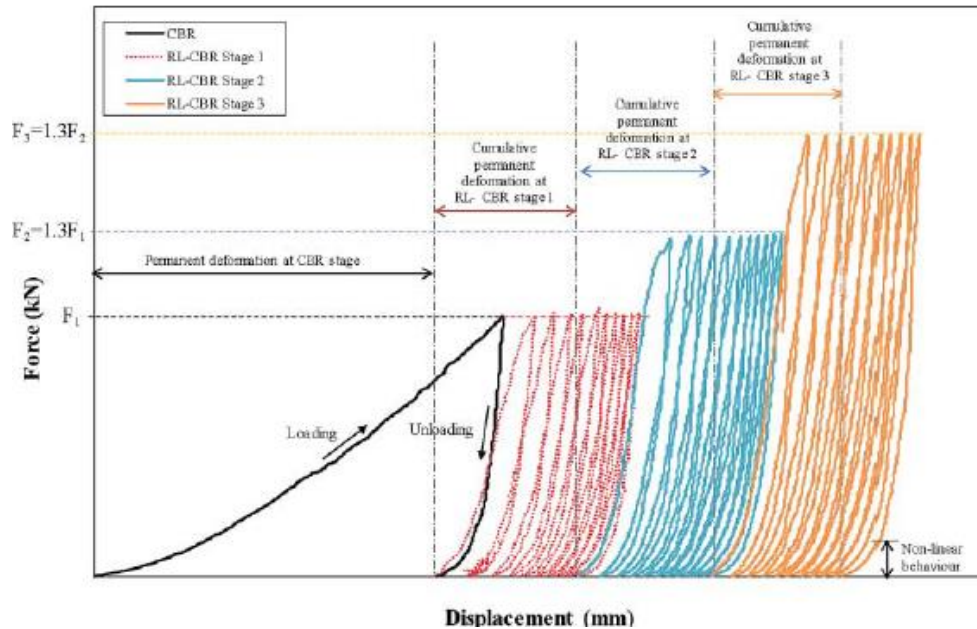


Figura 2.50 Comportamiento de uno de los materiales ensayados bajo el procedimiento de cCBR

Fuente: Tomado de Haghghi et al. (2017)

Mediante dichos ensayos observaron que con cada incremento del 30% en el esfuerzo aplicado, la deformación resiliente incrementaba cerca del 10%. Adicionalmente, tal como se muestra en la Tabla 2.8, es posible observar que los datos de módulo equivalente no pueden ser directamente comparables con los datos de módulo resiliente, dado que los niveles de esfuerzos a los cuales la muestra es sometida en cada uno de los dos ensayos varían considerablemente.

Tabla 2.8 Resumen de los rangos de módulo equivalente y módulo resiliente para materiales individuales y mezclados

Material	Rango de módulo equivalente (en etapa 1), MPa	Rango de módulo resiliente, MPa
Ls	274 – 894	88 – 225
80%Ls + 20%Rh	598 – 740	67.5 – 207.7
50%Ls + 50%Rh	255 – 787	96.7 – 252.2
Ss	144 – 202	68.3 – 201.6
80%Ss + 20% Rh	113 – 156	91.2 – 307.6
50%Ss + 50%Rh	128 – 554	82.4 – 348.8
Rh	297 – 839	76.8 – 225.3

Fuente: Adaptado de Haghghi et al. (2017)

Por otra parte, utilizando arcillas saturadas, Nini (2017) estudió el efecto de las carga cíclicas en el valor de CBR. Los ensayos consistieron en penetrar las muestras hasta una profundidad de 0.1”, descargar y detener el equipo por un tiempo para que el suelo se

hinche (10 minutos), y penetrar el suelo nuevamente; dicho ciclo de carga-descarga-carga se repitió cuatro veces, y en el último ciclo se permitió una penetración hasta 0.3". Luego, el mismo procedimiento se ejecutó en una muestra del mismo suelo, pero hasta una penetración de 0.2" (Figura 2.51). Adicionalmente, en otra muestra del mismo material, se realizó un ensayo de CBR en condición saturada con el fin de comparar resultados. Cabe resaltar que las muestra utilizadas fueron preparadas en el laboratorio inicialmente con la humedad óptima y la densidad seca máxima obtenida en el ensayo Proctor.

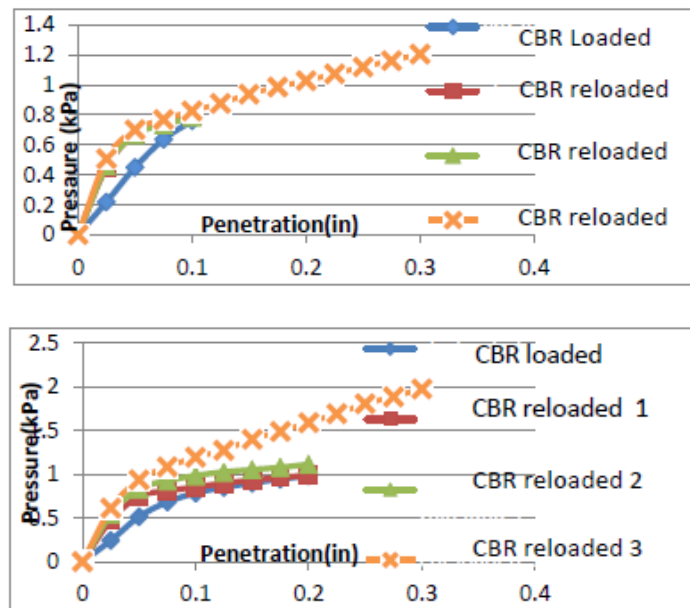


Figura 2.51 Valores de CBR durante los 4 ciclos para una de las muestras ensayadas: Penetración hasta 0.1" (Arriba) y hasta 0.2" (Abajo)

Fuente: Tomado de Nini (2017)

Luego de finalizar todos los ensayos en las 6 muestras estudiadas, los autores presentaron su resultados tal como se muestran en la Tabla 2.9, donde hay cuatro columnas para cada suelo, CBR estándar, CBR después de una carga cíclica, CBR después de dos cargas cíclicas y CBR después de tres cargas cíclicas. Adicional a los valores de CBR para cada penetración, se presenta cuanto incrementa el CBR después de cada ciclo (↑%).

Tabla 2.9 Resumen de todos los ensayos de CBR ejecutados

Suelo	CBR		Primer ciclo CBR				Segundo ciclo CBR				Tercer ciclo CBR			
	0.1"	0.2"	0.1"	↑%	0.2"	↑%	0.1"	↑%	0.2"	↑%	0.1"	↑%	0.2"	↑%
1	0.90	1.08	0.80	0.89	0.99	0.92	0.79	0.87	1.11	1.03	0.83	0.92	1.59	1.48
2	2.23	2.93	1.90	0.85	2.88	0.98	2.14	0.96	3.31	1.13	2.57	1.15	3.69	1.26
3	0.29	0.35	0.33	1.15	0.34	0.96	0.29	1.00	0.41	1.16	0.30	1.04	0.49	1.39
4	0.15	0.22	0.19	1.25	0.22	1.00	0.20	1.31	0.24	1.11	0.19	1.25	0.30	1.35
5	0.33	0.44	0.38	1.15	0.52	1.20	0.40	1.21	0.70	1.60	0.42	1.27	0.82	1.88
6	0.12	0.22	0.17	1.49	0.22	1.02	0.20	1.70	0.22	1.01	0.22	1.91	0.25	1.13

Fuente: Adaptado de Nini (2017)

La relación de incremento de CBR varía entre 0.85% y 1.49% para el primer ciclo, entre 0.87% y 1.60% para el segundo ciclo y entre 0.92% y 1.91% para el tercer ciclo. Esto demuestra que, si se realizan más ciclos de carga, el incremento de CBR aumentará y el suelo será más resistente, más ciclos significan que el suelo se confinará aún más. Por ende, las cargas cíclicas se pueden considerar benéficas para las subrasantes arcillosas como las aquí estudiadas.

Finalmente, Sas et al. (2017) presentan una de las más recientes investigaciones en el tema. En esta ocasión, no compararon únicamente el ensayo cCBR y triaxial cíclico (CTRX) para las arcillas arenosas ya estudiadas, sino que agregaron al análisis los resultados de ensayos inconfiados cíclicos (UCT). La decisión de agregar este ensayo se basó en que en esta ocasión asumieron que no existía confinamiento (Presión de cámara) en el ensayo cCBR y, por ende, sería comparable con los resultados de este nuevo ensayo.

Los ensayos cCBR fueron ejecutados del mismo modo que estos autores reportaron en estudios anteriores, a tres niveles de esfuerzo desviador (50 ciclos), y el CTRX fue a dos presiones de cámara y a dos esfuerzos desviadores. Por su parte, el ensayo UCT fue realizado bajo condiciones de esfuerzo constante, a una frecuencia de 0.00667 Hz y usando ocho esfuerzos desviadores diferentes. Los resultados obtenidos mediante los tres ensayos utilizados se pueden observar en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Valores de Mr para los tres tipos de ensayos cíclicos

Ensayo	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (MPa)
CTRX	20	26	42.75
		45	48.22
	40	26	49.75
		45	50.11
UCT	0	50.5	323.4
		52.3	326.3
		73.8	457
		89.4	438.5
		102.9	417.9
		139.8	361.2
		142.9	365.7
		145.5	363.4
cCBR	0	229	254.6
		591	690.3
		2036	756.5

Fuente: Adaptado de Sas et al. (2017)

Los resultados de las pruebas realizadas se emplearon posteriormente para designar las características del Mr mediante una ecuación constitutiva. Para este objetivo, se utilizó el modelo Mr- Θ (Ecuación 2-10). La Figura 2.52 muestra los resultados de estos cálculos para las tres pruebas, y es posible observar que se presentan valores de Mr a dos niveles de esfuerzo, lo cual claramente indica que los módulos obtenidos mediante un ensayo triaxial

y un ensayo cCBR no pueden ser comparados directamente, pero si es posible relacionar el cCBR con UCT.

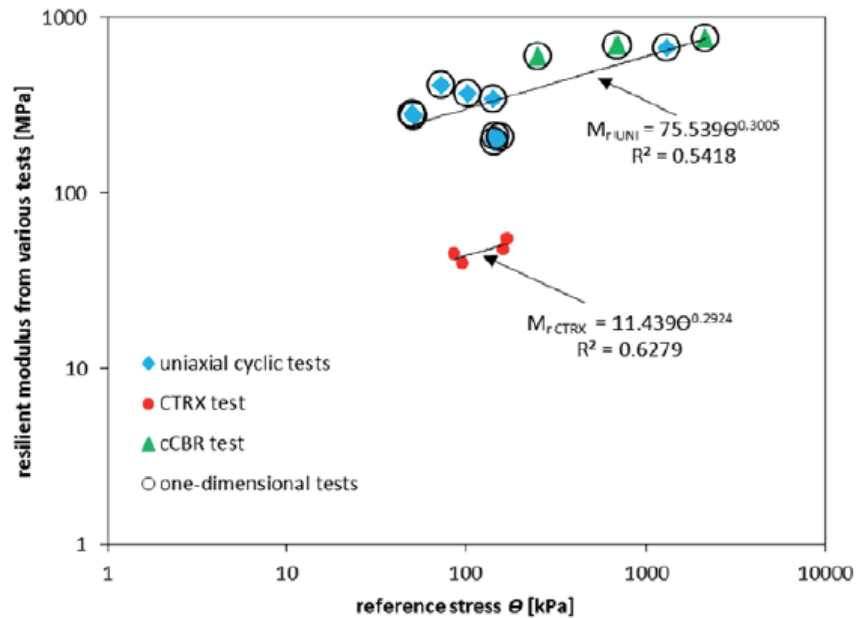


Figura 2.52 Valor del Mr tomado luego de 50 ciclos de carga con el modelo Mr-θ para los tres ensayos

Fuente: Tomado de Sas et al. (2017)

Basados en la Ecuación 2-10, las constantes k_1 y k_2 del material pueden ser asignadas, por un lado, para el ensayo CTRX y por otro para los ensayos cCBR y UCT. No obstante, es posible observar que la constante k_2 es muy similar en ambas relaciones, lo cual indica que, en todos los casos, el cambio del valor del Mr con el cambio de θ es el mismo. La constante k_1 , la cual denota el valor teórico del Mr en un estado “de reposo”, reportó un valor de 11.439 para el ensayo CTRX y de 75.539 para cCBR-UCT, lo cual llevó a concluir que el módulo obtenido mediante el ensayo cCBR puede ser corregido dividiéndolo entre 6.61 (k_{1UNI}/k_{1CTRX}):

$$M_r = \frac{M_{rcCBR}}{6.61}$$

Ecuación 2-40

A partir de las investigaciones previamente presentadas respecto al ensayo de cCBR, es posible observar que dicho ensayo es útil para estimar el módulo resiliente de manera aproximada, el cual puede ser usado para métodos de diseño de pavimentos con enfoque empírico-mecanicista, en ausencia de la infraestructura para ejecutar ensayos triaxiales cíclicos o estándares para módulo. Dicho de otro modo, la ventaja de integrar el ensayo de CBR tradicional en el enfoque de diseños empírico-mecanicistas mediante la implementación del ensayo cCBR, es que éste último se puede ejecutar en la mayoría de laboratorios donde se realizan ensayos de rutina (Araya et al., 2011).

2.5. Referencias

- AASHTO. (1992). *AASHTO T 292-91: Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrade Soils and Untreated Base/Subbase Materials*.
- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington D. C.
- Adu-Osei, A. (2000). *Characterization of unbound granular layers in flexible pavements*. Report No. ICAR/502-3. Retrieved from <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/35440/502-3.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Ahmed, M. A., Solyman, M. E., & Salem, T. N. (2008). Effect of Subgrade Properties on Pavement Performance. *Gulf Conference on Transportation Dubai, UAE 23-24 January*, (January 2008), 1–14. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/262184931_Effect_of_Subgrade_Properties_on_Pavement_Performance
- Al-Amoudi, O. S. B., Asi, I. M., Wahhab, H. I. A.-A., & Khan, Z. A. (2002). Clegg Hammer—California-Bearing Ratio Correlations. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 512–523. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:6\(512\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(512))
- Al-Refeai, T., & Al-Suhaibani, A. (1997). Prediction of CBR Using Dynamic Cone Penetrometer. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 9(2), 191–203. [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30676-7](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30676-7)
- Alves, A. B. C. (2002). *Avaliação da capacidade de suporte e controle tecnológico de execução da camada final de terraplenagem utilizando o penetrômetro dinâmico de cone*. Universidade Federal de Santa Catarina. Retrieved from <http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/83257>
- Andrei, D., Witczak, M. W., & Houston, W. N. (2009). Resilient Modulus Predictive Model for Unbound Pavement Materials. In *Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support* (pp. 401–408). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41023\(337\)51](https://doi.org/10.1061/41023(337)51)
- Andrei, D., Witczak, M. W., Schwartz, C. W., & Uzan, J. (2004). Harmonized Resilient Modulus Test Method for Unbound Pavement Materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1874(1), 29–37. <https://doi.org/10.3141/1874-04>
- Araujo, W., & Ruiz, G. (2016). Correlation Equations of CBR with Index Properties of Soil in the City of Piura. In *Proceedings of the 14th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Engineering Innovations for Global Sustainability"* (pp. 1–7). Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.029>
- Araya, A. A. (2011). *Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements*. Delft University of Technology. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:1d964e6f-e7e5-4d2a-834b-db9b3504745f/datastream/OBJ/download>

- Araya, A. A., Huurman, M., & Molenaar, A. A. A. (2011). Integrating Traditional Characterization Techniques in Mechanistic Pavement Design Approaches. In *Transportation and Development Institute Congress 2011* (pp. 596–606). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41167\(398\)57](https://doi.org/10.1061/41167(398)57)
- Araya, A. A., Huurman, M., Molenaar, A. A. A., & Houben, L. (2012). Investigation of the resilient behavior of granular base materials with simple test apparatus. *Materials and Structures*, *45*, 695–705. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9790-1>
- Araya, A. A., Molenaar, A. A. A., & Houben, L. (2010). Characterization of Unbound Granular Materials Using Repeated Load CBR and Triaxial Testing. In *GeoShanghai 2010 International Conference* (pp. 355–363). Shanghai.
- ASTM. (2018). ASTM D4429-09a Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place (Withdrawn 2018). <https://doi.org/10.1520/D4429-09A>
- Boone, J. (2013). *Comparison of Ontario Pavement Designs Using the AASHTO 1993 Empirical Method and the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Method*. University of Waterloo. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10012/8047>
- Brown, S. F. (1996). Soil mechanics in pavement engineering. *Géotechnique*, *46*(3), 383–426. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.3.383>
- Browning, J. A. (2005). *Cone tip apex angle effects on Cone Penetrometer Penetration Test*. North Carolina State University. Retrieved from <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/782>
- Bryan, J., Hill, S., Munday, M., & Roberts, A. (1997). Road infrastructure and economic development in the periphery: The case of A55 improvements in North Wales. *Journal of Transport Geography*, *5*(4), 227–237. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(97\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(97)00020-3)
- Campagnoli, S. (2014). *Notas de clase: Ensayo CBR y PDC*. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Carvalho, R. (2006). *Mechanistic-empirical design of flexible pavements: a sensitivity study*. University of Maryland, College Park. Retrieved from https://es.slideshare.net/dhaniedhona/mechanistic-empirical-pavement-design?from_action=save
- Choudhary, D. K., & Joshi, Y. P. (2014). A Detailed Study of CBR Method for Flexible Pavement Design. *Journal of Engineering Research and Applications*, *4*(6), 239–253. Retrieved from http://www.ijera.com/papers/Vol4_issue6/Version5/A104605239253.pdf
- Chukka, D., & Chakravarthi, V. K. (2012). Evaluation of Properties of Soil Subgrade Using Dynamic Cone Penetration Index – A Case Study. *International Journal of Engineering Research and Development*, *4*(4), 07–15. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/108a/b10fb51e2441910130a9ecd05bfefe0f9974.pdf>
- Committee of State Road Authorities. (1996). *Structural Design of Flexible Pavements for*

- Interurban and Rural Roads. Draft Technical Recommendations for Highways 4 (TRH 4)*. Petronia.
- Dave, R. C., Mehta, P. P. J., & Timani, P. K. L. (2017). Correlation Between Particle Fines and Laboratory CBR from Heavy Compaction Characteristics. In *International Conference on Research and Innovations in Science, Engineering & Technology* (Vol. 1, pp. 495–501). Vallabh Vidyanagar, India. Retrieved from <https://easychair.org/publications/open/3fz>
- Dawson, A. R., Mundy, M. J., & Huhtala, M. (2000). European Research into Granular Material for Pavement Bases and Subbases. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1721(1), 91–99. <https://doi.org/10.3141/1721-11>
- Dione, A., Fall, M., Berthaud, Y., Benboudjema, F., & Michou, A. (2015). Implementation of resilient modulus -CBR relationship in mechanistic-empirical (M-E) pavement design. *Revue Du CAMES – Sciences Appliquées et de l'Ingénieur*, 1(12), 65–71.
- Drumm, E. C., Boateng-Poku, Y., & Johnson Pierce, T. (1990). Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Standard Tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(5), 774–789. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:5\(774\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:5(774))
- Drumm, Li, Reeves, & Madgett. (1996). Alternative Test Method for Resilient Modulus of Fine-Grained Subgrades. *Geotechnical Testing Journal*, 19(2), 141. <https://doi.org/10.1520/GTJ10337J>
- Dunlap, W. A. (1963). *A Mathematical Model Describing the Deformation Characteristics of Granular Materials, Technical Report 1. Project 2-8-62-27 (HPS-1-27)*. Texas. Retrieved from <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/TTI-1963-ID1100.pdf>
- E.I.E Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S. (2018). *Tarifas de servicios de laboratorio año 2018*. Bogotá. Retrieved from www.echeverryingenieria.com
- Edwards, J. P. (2007). *Laboratory Characterisation of Pavement Foundation Materials*. Loughborough University. Retrieved from https://www.lboro.ac.uk/media/wwwlboroacuk/content/cice/downloads/publications/34_thesis.pdf
- Elias, M. B., & Titi, H. H. (2006). Evaluation of Resilient Modulus Model Parameters for Mechanistic–Empirical Pavement Design. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, No 1967, 89–100. <https://doi.org/10.1177/0361198106196700110>
- Elias, M. B., Titi, H. H., & Helwany, S. (2004). Evaluation of Resilient Modulus of Typical Wisconsin Soils. In *Geo Jordan 2004* (pp. 335–346). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40735\(143\)28](https://doi.org/10.1061/40735(143)28)
- Elliott, R. P., & Thornton, S. I. (1988). Resilient modulus and AASHTO pavement design. *Transportation Research Record No. 1196, Pavement Evaluation and Rehabilitation*, (1196), 116–124. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/302387>

- Erlingsson, S. (2004). Mechanistic Pavement Design Methods – A Road to Better Understanding of Pavement Performance. In *Via Nordica 2004 – NRA's 19th Road Congress, C8: Berekraftige vegkonstruksjonar* (pp. 1–8). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/242219834_Mechanistic_Pavement_Design_Methods_-_A_Road_to_Better_Understanding_of_Pavement_Performance
- Escuela Colombiana de Ingeniería. (2018). Tarifas de laboratorio 2018. Retrieved from <https://www.escuelaing.edu.co/es/laboratorios>
- Farrar, M. J., & Turner, J. P. (1991). *Resilient Modulus of Wyoming Subgrade Soils. MPC Report No. 91-1*. Fargo, ND. Retrieved from <https://www.ugpti.org/resources/reports/downloads/mpc91-1.pdf>
- Garnica, P., Perez, N., & Gómez, J. (2001). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*. Querétaro. Retrieved from <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt142.pdf>
- George, K. P. (2004). *Prediction of resilient modulus from soil index properties*. Retrieved from https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/24156/dot_24156_DS1.pdf?
- George, K. P., & Uddin, W. (2000). *Subgrade Characterization for Highway Pavement Design*. Jackson, Mississippi. Retrieved from [http://mdot.ms.gov/documents/research/Reports/Interim and Final Reports/State Study 131 - Subgrade Characterization for Highway Pavement Design.pdf](http://mdot.ms.gov/documents/research/Reports/Interim_and_Final_Reports/State_Study_131_-_Subgrade_Characterization_for_Highway_Pavement_Design.pdf)
- Gill, K. S., Jha, J. N., & Choudhary, A. K. (2010). CBR Value Estimation Using Dynamic Cone Penetrometer. In *Indian Geotechnical Conference – 2010, GEOTrendz* (pp. 259–262). Bombay. Retrieved from <https://gndec.ac.in/~igs/ldh/conf/2010/articles/063.pdf>
- Guzmán-Suárez, E. A., & Higuera-Sandoval, C. H. (2016). Comparación entre el módulo resiliente de la subrasante determinado en laboratorio y el retrocalculado, factor de ajuste {C}. *Ingenio Magno*, 7(1), 62–83.
- Haas, R., Hudson, W. R., & Falls, L. C. (2011). Evolution of and future challenges for pavement management. *8th International Conference on Managing Pavement Assets*, (3). <https://doi.org/10.1.1.653.8754>
- Haghighi, H., Arulrajah, A., Mohammadinia, A., & Horpibulsuk, S. (2017). A new approach for determining resilient moduli of marginal pavement base materials using the staged repeated load CBR test method. *Road Materials and Pavement Design*, 19(8), 1848–1867. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1352532>
- Hamid, A. M. (2015). The dynamic cone penetration test: a review of its correlations and applications. In *International Conference on Advances in Civil and Environmental Engineering* (pp. 1–16). Penang.
- Han, Z., & Vanapalli, S. K. (2016). Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils. *Engineering Geology*, 211(June), 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.020>
- Hassan, A. (1987). *The Effect of Material Parameters on Dynamic Cone Penetrometer*

Results for Fine-grained Soils and Granular Materials. Oklahoma State University. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11244/33781>

- Hight, D. W., & Stevens, M. G. H. (1982). An analysis of the California bearing ratio test in saturated clays. *Géotechnique*, 32(4), 315–322. <https://doi.org/10.1680/geot.1982.32.4.315>
- Hopkins, T. C., Beckham, T. L., & Sun, C. (2007). *Resilient Modulus of Compacted Crushed Stone Aggregate Bases. Report Number: KTC-05-27/SPR229-01-1F.* <https://doi.org/10.13023/KTC.RR.2005.27>
- IDEAM. (2001). *Colombia Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.* (Trade Link Ltda., Ed.) (1ra ed.). Colombia.
- INVIAS. (2013). *Normas de Ensayo de materiales para carreteras.*
- Ivanova, E., & Masarova, J. (2013). Importance of Road Infrastructure in the Economic Development and Competitiveness. *Economics and Management*, 18(2), 263–274. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5755/j01.em.18.2.4253>
- Jin, M. S., Lee, K. W., & Kovacs, W. D. (1994). Seasonal Variation of Resilient Modulus of Subgrade Soils. *Journal of Transportation Engineering*, 120(4), 603–616. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1994\)120:4\(603\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:4(603))
- Katte, V. Y., Mfoyet, S. M., Manefouet, B., Wouatong, A. S. L., & Bezeng, L. A. (2019). Correlation of California Bearing Ratio (CBR) Value with Soil Properties of Road Subgrade Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(1), 217–234. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0604-x>
- Khoury, N., Brooks, R., Zaman, M. M., & Khoury, C. N. (2009). Variations of Resilient Modulus of Subgrade Soils with Postcompaction Moisture Contents. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2101(1), 72–81. <https://doi.org/10.3141/2101-09>
- Kim, D., & Siddiki, N. Z. (2006). *Simplification of Resilient Modulus Testing for Subgrades.* West Lafayette. Retrieved from <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1736&context=jtrp>
- Kim, I., & Tutumluer, E. (2005). Unbound Aggregate Rutting Models for Stress Rotations and Effects of Moving Wheel Loads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1913, 41–49. <https://doi.org/10.3141/1913-05>
- Kleyn, E. G., & Savage, P. F. (1982). The Application of the Pavement DCP to determine the Bearing Properties and Performance of Road Pavement. In *The International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields.* Trondheim, Norway.
- Kumar, R. V., & Pavithra, M. (2016). Experimental Study on Design of Flexible Pavement Using CBR Method. *International Journal of Engineering Research*, 5(1), 63–68. <https://doi.org/10.17950/ijer/v5i1/015>

- Kung, J. H. S., Lin, H. D., Yang, S.-J., & Huang, W.-H. (2006). Resilient Modulus and Plastic Strain of Unsaturated Cohesive Subgrade Soils. In *Unsaturated Soils 2006* (pp. 541–552). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40802\(189\)41](https://doi.org/10.1061/40802(189)41)
- Lee, W., Bohra, N. C., Altschaeffl, A. G., & White, T. D. (1995). Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze–thaw. *Canadian Geotechnical Journal*, *32*(4), 559–568. <https://doi.org/10.1139/t95-059>
- Leung, G. L. M., Wong, A. W. G., & Wang, Y. H. (2013). Prediction of resilient modulus of compacted saprolitic soils by CBR approach for road pavement subgrade: a re-examination. *International Journal of Pavement Engineering*, *14*(4), 403–417. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.727993>
- Li, D., & Selig, E. T. (1994). Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, *120*(6), 939–957. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:6\(939\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:6(939))
- Lister, N. W. (1972). The Transient and Long Term Performance of Pavements in Relation to Temperature. In *3d International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Grosvenor House, Park Lane, London. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/138850>
- Liu, J., & Xiao, J. (2010). Experimental Study on the Stability of Railroad Silt Subgrade with Increasing Train Speed. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *136*(6), 833–841. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000282](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000282)
- Livneh, M, Ishai, I., & Livneh, N. (1995). Effect of vertical confinement on dynamic cone penetrometer strength values in pavement and subgrade evaluations. *Transportation Research Record* *1473*, 1–8. Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1473/1473-001.pdf>
- Livneh, Moshe. (2000). Friction Correction Equation for the Dynamic Cone Penetrometer in Subsoil Strength Testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1714*(1), 89–97. <https://doi.org/10.3141/1714-12>
- Mahabubuzzaman, M. D. (2001). *California bearing ratio (CBR) and strength behaviour of compacted Dhaka clay as road subgrade*. Bangladesh University of Engineering and Technology. Retrieved from <http://lib.buet.ac.bd:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1828/FullThesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Maher, A., Bennert, T., & Gucunski, N. (2000). *Resilient Modulus Properties of New Jersey Subgrade Soils. FHWA NJ 2000-01*.
- Mashayekhi, M., Amini, A. A., Behbahani, H., & Nobakht, S. (2011). Comparison of Mechanistic-Empirical and Empirical Flexible Pavement Design Procedures of AASHTO: a Case Study. In *5th International conference bituminous mixtures and pavements* (pp. 319–328).
- Ministerio de Transporte. (2010). *Transporte en cifras, versión 2010*. Retrieved from

<https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=53>

Ministerio de Transporte. (2000). *Análisis Parque Automotor Colombia. Secretaria de Movilidad*. Retrieved from <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=4315>

MINTRANSPORTE. (2008). *Diagnostico del sector transporte. Ministerio de Transporte, Oficina de Planeación*. Bogotá D.C. Retrieved from <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=4305>

Mohammad, L. N., Gaspard, K., Herath, A., & Nazzal, M. (2007). *Comparative Evaluation of Subgrade Resilient Modulus from Non-destructive, In-situ, and Laboratory Methods. Report No. FHWA/LA.06/417*. Baton Rouge. Retrieved from https://www.ltrc.lsu.edu/pdf/2008/fr_417.pdf

Mohammadi, S. D., Nikoudel, M. R., Rahimi, H., & Khomehchiyan, M. (2008). Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils. *Engineering Geology*, 101(3–4), 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.05.006>

Molenaar, A. A. A. (2007). Characterization of Some Tropical Soils for Road Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1989–2(1), 186–193. <https://doi.org/10.3141/1989-63>

Molenaar, A. A. A. (2008). Repeated load cbr testing, a simple but effective tool for the characterization of fine soils and unbound materials. In *Transportation Reserach Board TRB 2008, Annual Meeting CD-ROM, No. 08-0516*. Washington, D.C. Retrieved from <https://docplayer.net/46837168-Repeated-load-cbr-testing-a-simple-but-effective-tool-for-the-characterization-of-fine-soils-and-unbound-materials-a-a-a.html>

Molenaar, A. A. A., Araya, A. A., & Houben, L. (2011). Repeated load cbr testing, a simple but effective tool for the characterization of fine soils and unbound materials. In *10th Conference on asphalt pavements for Southern Africa* (pp. 1–15). KwaZulu Natal, South Africa. Retrieved from http://www.aapaq.org/q/2011st/CAPSA2011/FA4_08_75_1029.pdf

Monteiro, F. F., Lacerda de Oliveira, F. H., Zitllau, O., Porto de Aguiar, M. F., & Coelho de Carvalho, L. M. (2016). CBR Value Estimation Using Dynamic Cone Penetrometer - A Case Study of Brazil 's Midwest Federal Highway. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(14), 3649–3656. Retrieved from www.ejge.com

Montejo, A. (2006). *Ingeniería de pavimentos: Fundamentos, estudios básicos y diseño*. (Universidad Católica de Colombia, Ed.) (3ra ed.). Bogotá D.C.

Moosazadeh, J., & Witczak, M. (1981). *Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior. Transportation Research Record 810*. Washington, D.C. Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1981/810/810-002.pdf>

Nam, B., An, J., & Murphy, M. R. (2014). Improvements to the AASHTO Subgrade Resilient Modulus (MR) Equation. In *Geo-Congress 2014 Technical Papers: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability* (pp. 2414–2425).

<https://doi.org/10.1061/9780784413272.234>

- National Cooperative Highway Research Program. (2001). *Guide for mechanistic and empirical – design for new and rehabilitated pavement structures, final document” Appendix CC-1: correlation of CBR values with soil index properties*. Illinois.
- Nguyen, B. T., & Mohajerani, A. (2015). Prediction of California Bearing Ratio from Physical Properties of Fine-Grained Soils. *International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 9(2), 136–141. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=547F8C6A253C788FD38158311E1BA0D5?doi=10.1.1.674.2360&rep=rep1&type=pdf>
- Nieto Leal, A., & Kaliakin, V. N. (2016). General response observed in cyclically loaded cohesive soils. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 21. <https://doi.org/10.18359/rcin.1673>
- Nini, R. (2017). Effect of Cyclic Load on California Bearing Ratio of Soaked Clay. In *Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering* (pp. 1–8). Barcelona. <https://doi.org/10.11159/icgre17.127>
- Opiyo, T. O. (1995). *A Mechanistic Approach to Laterite-based Pavements, in Transport and Road Engineering (TRE)*. International Institute for Infrastructure, Hydraulic and Environment Engineering (IHE): Delft.
- Paige-Green, P., & Plessis, L. Du. (2009). *Use and interpretation of the dynamic cone penetrometer (DCP) test* (2nd ed.). Petronia. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/38958274_Use_and_interpretation_of_the_dynamic_cone_penetrometer_DCP_test
- Patel, R. S., & Desai, M. D. (2010). CBR Predicted by Index Properties for Alluvial Soils of South Gujarat. In *Indian Geotechnical Conference – 2010, GEOTrendz* (pp. 79–82). Bombay, India. Retrieved from http://www.mddesai.com/Paper_2000_2010/20_020.pdf
- Pontificia Universidad Javeriana. (2019). *Listado de precios 2019. Laboratorio de pruebas y ensayos*. Bogotá. Retrieved from <https://ingenieria.javeriana.edu.co/documents/7508381/0/Lista+de+Precios+laboratorios+2019.pdf/d4e17d19-b2d7-4baa-9b86-351acf300c7f>
- Rahim, A. M. (2005). Subgrade soil index properties to estimate resilient modulus for pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(3), 163–169. <https://doi.org/10.1080/10298430500140891>
- Rahim, A. M., & George, K. P. (2005). Models to estimate subgrade resilient modulus for pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(2), 89–96. <https://doi.org/10.1080/10298430500131973>
- Ramirez Gomez, J. C. (1983). *Manuela de Laboratorio de Pavimentos*. (Universidad Industrial de Santander, Ed.) (1ra ed.). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

- Razouki, S. S., & Al-shefi, A. M. (2002). Effects and observations of surcharge load on the laboratory CBR and resilient modulus values of roadbed soil. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35(1), 89–95.
- Rehman, Z. U., Khalid, U., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2017). Prediction of CBR Value from Index Properties of Cohesive Soils. *Technical Journal, University of Engineering and Technology (UET) Taxila, Pakistan*, 22(11), 17–26.
- Rietveld, P. (1989). Infrastructure and regional development - A survey of multiregional economic models. *The Annals of Regional Science*, 23(4), 255–274. <https://doi.org/10.1007/BF01579778>
- Rondón, H. A., Reyes, F. A., & Sánchez Cotte, E. (2012). Comportamiento resiliente de materiales Fino-Granulares en Subrasantes. *Revista Tecnura*, 16(Octubre), 173–184.
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 17(2), 41–65. <https://doi.org/10.18359/rcin.1074>
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. (Ecoe Ediciones, Ed.) (1ra ed.). Bogotá D.C.
- Roy, T., Chattopadhyay, B., & Roy, S. (2010). California bearing ratio, evaluation, and estimation: a study on comparison. *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference*, 19–22. Retrieved from <http://gndec.ac.in/~igs/ldh/conf/2010/articles/005.pdf>
- Sánchez, F., & Campagnoli, S. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras: Guía práctica para lo estudios y diseños*. (Escuela Colombiana de Ingeniería, Ed.) (1ra ed.). Bogotá D.C.
- Sangrey, D. A., Henkel, D. J., & Esrig, M. I. (1969). The effective stress response of a saturated clay soil to repeated loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 6(3), 241–252. <https://doi.org/10.1139/t69-027>
- Sas, W., & Gluchowski, A. (2013a). Application of cyclic cbr test to approximation of subgrade displacement in road pavement. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 12, 51–61.
- Sas, W., & Gluchowski, A. (2013b). Rutting prediction for stabilized soils based on the cyclic CBR test. *Roads and Bridges*, 12, 411–423. <https://doi.org/10.7409/rabdim.013.026>
- Sas, W., Gluchowski, A., Gabrys, K., & Szymanski, A. (2015). Application of cyclic CBR test for the estimation of resilient modulus in the pavement construction. In *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development* (pp. 3747–3752). Institution of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1680/ecsmge.60678>
- Sas, W., Gluchowski, A., & Miturski, M. (2017). Studies on resilient modulus value from cyclic loading tests for cohesive soil. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation*, 49(2), 117–127. <https://doi.org/10.1515/sggw-2017-0010>

- Sas, W., Gluchowski, A., & Szymansky, A. (2012). Determination of the Resilient modulus MR for the lime stabilized clay obtained from the repeated loading CBR tests. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW Land Reclamation*, 44(2), 143–153. <https://doi.org/10.2478/v10060-011-0070-0>
- Satyanarayana Reddy, C. N. V., & Rama Moorthy, N. V. (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>
- Sawanguriya, A., Edil, T. B., & Benson, C. H. (2009). Effect of Suction on Resilient Modulus of Compacted Fine-Grained Subgrade Soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2101(1), 82–87. <https://doi.org/10.3141/2101-10>
- Secretaria Distrital de Movilidad. (2015). *Movilidad en cifras 2015*. Bogotá. Retrieved from http://www.movilidadbogota.gov.co/web/SIMUR/ARCHIVOS/Movilidad_Cifras_2015_V4_marzo2017.pdf
- Seed, H. B., & Chan, C. K. (1957). Thixotropic Characteristics of Compacted Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 83(4), 1–35. Retrieved from <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0011086>
- Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). Resilient Characteristics of Subgrade Soils and their Relations to Fatigue Failures in Asphalt Pavements. In *1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Supplement* (pp. 611–636). University of Michigan, Ann Arbor. Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=716093>
- Seed, H. B., Chan, C. K., & Monismith, C. L. (1955). Effects of Repeated Loading on the Strength and Deformation of Compacted Clay. In *Proceedings of the Thirty-Fourth Annual Meeting of the Highway Research Board* (pp. 541–558). Washington, D.C.: Highway Research Board. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/126583>
- Seed, H. B., Mitry, F. G., Monismith, C. L., & Chan, C. K. (1967). *Prediction of pavement deflection from laboratory repeated load tests*. NCHRP Report 35. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/104508>
- Smolen, J. M., Drumm, E. C., & Thomas, K. G. (2006). An Alternative Test for the Resilient Modulus of Fine Grained Subgrades. In *Pavement Mechanics and Performance* (Vol. 19, pp. 271–278). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40866\(198\)34](https://doi.org/10.1061/40866(198)34)
- Sowers, G. F., & Hedge, C. S. (1966). *Dyanmic Cone for Shallow In-Situ Penetration Testing*. ASTM Technical Publiaction #399.
- Sparsha, N., Robinson, R., & Murali, J. (2016). Use of repeated load CBR test to characterize pavement granular materials. In *Functional Pavement Design* (pp. 965–974). Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315643274-106>
- Stubstad, R. N. (2002). *LTPP Data Analysis : Feasibility of Using FWD Deflection Data to*

- Characterize Pavement Construction Quality. NCHRP Web Document #52. Project 20-59* (9). Washington, D.C. Retrieved from http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w52.pdf
- Sukumaran, B., Kyatham, V., Shah, A., & Sheth, D. (2002). Suitability of using California Bearing Ratio to predict resilient modulus. In *Presented on federal aviation administration airport technology transfer conference* (pp. 1–10). Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.515.9182&rep=rep1&type=pdf>
- Sweere, G. T. H. (1990). *Unbound granular bases for roads*. Delft University. Retrieved from <http://resolver.tudelft.nl/uuid:1cc1c86a-7a2d-4bdc-8903-c665594f11eb>
- Talukdar, D. K. (2014). A Study of Correlation Between California Bearing Ratio (CBR) Value With Other Properties of Soil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(1), 559–562. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/854d/b18ceee21a3402c5e2998b36276c0a4f0d16.pdf>
- Thompson, M. R., & LaGrow, T. G. (1988). *A Proposed Conventional Flexible Pavement Thickness Design Procedure. FHWA-IL-UI-223*. Illinois.
- Thompson, M. R., & Robnett, Q. L. (1976). *Resilient properties of subgrade soils*. Urbana, IL. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/64740>
- Titi, H. H., & English, R. (2011). *Determination of resilient modulus values for typical plastic soils in Wisconsin*. Milwaukee. Retrieved from <https://minds.wisconsin.edu/bitstream/handle/1793/55376/08-12resilientmodulus-f1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Universidad de los Andes. (2018). *Laboratorio Integrado de Ingeniería Civil y Ambiental. Tarifas 2018*. Retrieved from <http://laboratoriointegrado.uniandes.edu.co>
- Universidad EAFIT. (2017). *Lista de precios unitarios de ensayos 2017. Laboratorio de suelos, concretos y pavimentos*. Medellín. Retrieved from <http://www.eafit.edu.co/servicios/centrodelaLaboratorios/servicios/SiteAssets/Paginas/listado-servicios-empresas/Listado-de-precios-de-Suelos,-Concretos-y-Pavimentos-2017.pdf>
- Universidad Militar Nueva Granada. (2012). *Lista de precios ensayos de laboratorio 2012*. Bogotá. Retrieved from http://www.umng.edu.co/documents/10162/42543/dzn_costo-ensayos.pdf
- Uzan, J. (1985). Extension of CBR Method to Highway Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 111(5), 561–569. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1985\)111:5\(561\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1985)111:5(561))
- Uzan, J. (2004). Permanent Deformation in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 130(1), 6–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:1\(6\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:1(6))
- Von Quintus, H., & Killingsworth, B. (1997). *Design Pamphlet for the Determination of*

- Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures.* FHWA-RD-97-083. Retrieved from <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/97083/97083.pdf>
- Witczak, M. (2003). *Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. NCHRP Project 1-28A (Volume 1)*. Maryland. Retrieved from <http://apps.trb.org/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=203>
- Witczak, M. W., Qi, X., & Mirza, M. W. (1995). Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure. In *Journal of Transportation Engineering* (Vol. 121, pp. 273–282).
- Wu, S., & Sargand, S. (2007). *Use of dynamic cone penetrometer in subgrade and base acceptance* (Vol. State Job). Columbus. Retrieved from <http://worldcat.org/digitalarchive/content/cdm266301.cdmhost.com/CBT/p266401coll4/0000071947/14817-FR.pdf>
- Yang, S., Huang, W., & Tai, Y. (2005). Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board No 1913*, 99–106. <https://doi.org/10.3141/1913-10>
- Yeh, S. T., & C.K., S. (1989). *Resilient Properties of Colorado Soils. Report No. CDOH-DH-SM-89-9*. Denver, CO. Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=310288>
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of Pavement Design*. (John Wiley & Sons Inc., Ed.) (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Zhang, J., Peng, J., Li, J., & Zheng, J. (2018). Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Cohesive Soils in South China. *International Journal of Civil Engineering*, 16(12), 1655–1667. <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0315-y>

Capítulo 3. Ensayo CBR cíclico (cCBR)

Tal como se mostró en la revisión de la literatura, existe una brecha entre los ensayos de investigación especializados y enfoques más simples; de lograrse cerrar dicha brecha, se podría proporcionar un aporte importante al diseño de rutina para la industria vial. Por lo tanto, se identifica la necesidad de desarrollar una prueba de laboratorio simplificada, llamada cCBR, capaz de estimar las propiedades mecánicas de los suelos blandos de subrasante.

Este capítulo tiene como fin cumplir con el objetivo específico de la correcta implementación del ensayo de cCBR y el de la cuantificación de los recursos para ejecutarlo, para así establecer su costo real.

3.1. Consideraciones generales

El CBR es una prueba completamente establecida y ampliamente aplicada que permite la determinación de una resistencia al corte empírica de los materiales de carreteras. Por su parte, la prueba cCBR está desarrollada para aprovechar la familiaridad y la amplia experiencia ya desarrollada con la prueba estándar de CBR, y de allí obtener valores de rigidez que permitan un mejor entendimiento del comportamiento de material ante cargas cíclicas.

Como ya se mencionó en el Capítulo 2, la prueba de cCBR es similar a la prueba de CBR, pero se aplican cargas repetitivas durante su ejecución; esto hasta un punto en el cual la deformación permanente generada, por la carga constante aplicada, sea nula o despreciable. El módulo elástico (E) es obtenido a partir del esfuerzo aplicado por el pistón (σ_p) y la deformación elástica promedio del espécimen (u) en los últimos ciclos de aplicación de carga. El esfuerzo σ_p se puede calcular conociendo la fuerza del pistón ($F_{penetración}$) y su respectiva área de contacto (A), tal como se muestra en la Ecuación 2-33.

$$\sigma_p = \frac{F_{penetración}}{A} = \frac{F_{penetración}}{\pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Ecuación 3-1

Se sabe que el módulo de rigidez de los materiales es dependiente del nivel de esfuerzos, es por esto que la prueba de CBR no se considera adecuada para determinar dicha propiedad fundamental. Uno de los principales inconvenientes radica en que dicho módulo de rigidez dentro de un molde de CBR no presenta una distribución uniforme de esfuerzos comparado con un ensayo triaxial. En general, para un ensayo triaxial cuando las muestras presentan una relación diámetro/tamaño máximo de partícula de al menos 5, se supone que el material es homogéneo y la distribución de esfuerzos es uniforme en todo el material, excluyendo los efectos de contacto en la parte superior e inferior de la muestra (Araya, 2011).

No obstante, en un molde de CBR se ha demostrado que el módulo no es constante, tal como se presenta en la Figura 3.1 y en la Figura 3.2; estas figuras muestran que el módulo cambia a lo largo de la profundidad y del ancho del molde. Esta situación implica que el módulo calculado a través del ensayo de cCBR es un módulo efectivo general o promedio, lo cual quiere decir que el análisis presentado para este ensayo se hace a una escala “global” (Molenaar, 2008).

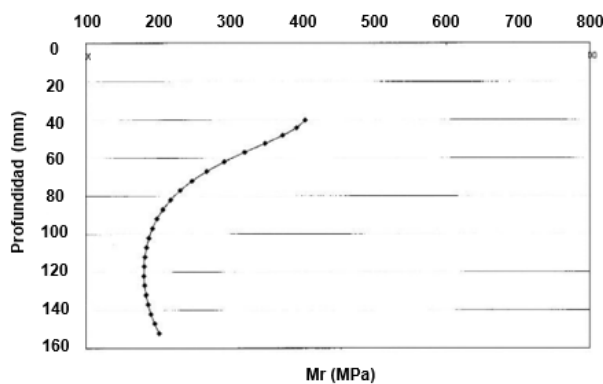


Figura 3.1 Variación del Mr con la profundidad del molde de CBR bajo el centro del pistón

Fuente: Adaptado de Molenaar (2008)

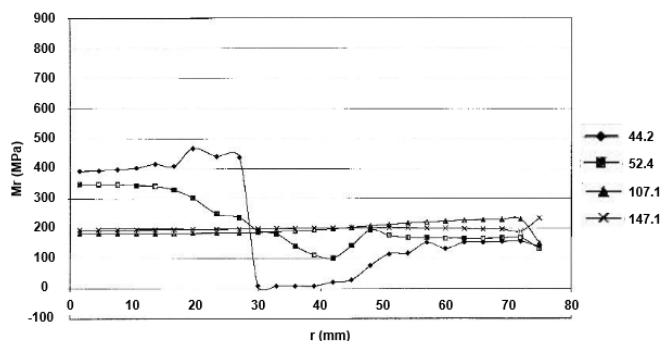


Figura 3.2 Variación del Mr a lo ancho del molde de CBR a 4 diferentes profundidades (en mm)

Fuente: Adaptado de Molenaar (2008)

El hecho de buscar a través del ensayo cCBR un valor promedio o general de rigidez quiere decir que el propósito de esta prueba no es encontrar con exactitud un valor de módulo resiliente, sino una estimación aproximada con aceptable precisión a partir de una técnica de caracterización más sencilla. Lo anterior debido a que, tal como se señaló al principio de la investigación, el ensayo triaxial no es un procedimiento de rutina para el diseño de pavimentos en países en vía de desarrollo.

En esta escala "global", la variación del módulo de rigidez del material en el molde CBR se reemplaza por un módulo promedio, representativo o equivalente para la muestra global, al cual se le denomina "Módulo equivalente" (E_{equi}). En otras palabras, de aquí en adelante el término E_{equi} en este estudio se refiere al módulo de rigidez estimado por la prueba cCBR (Araya, 2011).

Finalmente, dado que en el ensayo de cCBR se desconoce la presión de confinamiento (σ_3), es necesario medir, asumir o establecer un valor de dicho esfuerzo. Mientras que en algunas investigaciones se asume dicho esfuerzo como nulo o no se tiene en cuenta (Molenaar, 2008; Sparsha et al., 2016; Haghighi et al., 2017; Sas et al., 2017); otras han sugerido que no es prudente dicha suposición, esto debido a que se ha demostrado, mediante el uso de sensores laterales, que se desarrolla cierto esfuerzo de confinamiento por el molde cuando se aplica una carga con el pistón (Araya, 2011; Molenaar et al., 2011).

Dado que el objetivo es presentar un método sencillo y económico para la obtención del módulo resiliente, el empleo de sensores que permitan la medición de este esfuerzo de confinamiento se descarta, y se sigue la recomendación dada por Sas et al. (2015), la cual consiste en asumir $\sigma_3 = 0.01\sigma_1$, el cual consideran razonable debido a la disipación del esfuerzo a través del esqueleto del suelo.

3.2. Técnica de la prueba de cCBR

Las muestras inalteradas requeridas para la ejecución del ensayo de cCBR son las mismas utilizadas en un ensayo convencional de CBR, así como gran parte de las variables de ejecución del ensayo. Lo anterior quiere decir que muchos de los procedimientos aquí presentados tendrán cierta similitud con lo establecido en la norma INV-E-148. No obstante, estas actividades son complementadas con lo presentado en la literatura por varios investigadores que han analizado y puesto en marcha ensayos de cCBR dentro de sus laboratorios de investigación.

3.2.1. Toma de muestras inalteradas

Para la obtención de las muestras inalteradas se utiliza un molde de borde cortante de 152.4mm (6") de diámetro, tal como el que se muestra en la Figura 3.3. El procedimiento para obtener las muestras de suelos cohesivos que conserven su estructura y humedad natural es el siguiente (INVIAS, 2013; Bautista Mendoza, 2017):

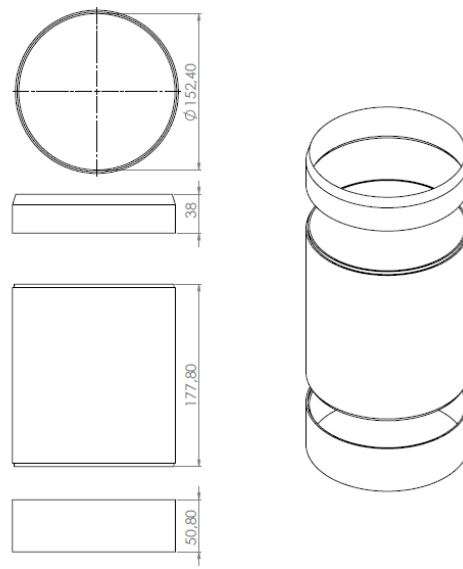


Figura 3.3 Dimensiones del molde para obtención de muestras inalteradas (Medidas en mm)

Fuente: Elaboración propia

- I. El molde se va hincado con el collarín de borde cortante apoyado sobre la superficie. Dicho hincamiento se puede hacer a presión o dando golpes suaves con un mazo sobre un durmiente de madera. En todo caso, los esfuerzos deben ser centrados para evitar que el molde cabecee, lo cual podría alterar la muestra.
- II. A medida que el molde se va introduciendo, se ayuda excavando y retirando el suelo que queda por su parte exterior, para evitar rozamientos innecesarios. En algunos casos, puede ser conveniente llevar la excavación un poco por delante del borde del collarín, para que el molde penetre con mayor facilidad. Este procedimiento se debe utilizar únicamente cuando el suelo sea apropiado, pues en muchos casos existe peligro de su agrietamiento.
- III. Este procedimiento se realiza hasta que la muestra de suelo entre en el collarín superior (Sin filo) por lo menos 25mm. En caso de llenarse el molde completamente hasta el collarín superior, se debe vigilar que no se golpee la muestra, esto con el fin de evitar la compactación del suelo que ha de constituir la muestra.
- IV. Luego, se corta por la parte inferior, se envuelve en papel vinipel cubriendo muy bien la muestra para evitar pérdidas de humedad o cambios de densidad de esta durante el transporte al laboratorio.
- V. Finalmente, una vez la muestra se encuentre en el laboratorio, se retiran los collarines y se enrasan ambas caras para la ejecución del ensayo en el menor tiempo posible. En caso de no ser ensayadas inmediatamente, se deben volver a

empacar cuidadosamente y conservar en un ambiente controlado (Humedad y temperatura), con el fin de preservar sus propiedades de humedad y densidad.

3.2.2. Equipo de ensayo cCBR

La principal razón de evaluar la utilidad del ensayo de cCBR es poder mostrarlo como un mecanismo de prueba simplificado, que hace uso de un equipo disponible en la mayoría de los laboratorios donde se realizan ensayos de rutina. Como ya se ha mencionado en varias oportunidades, la configuración de este ensayo es similar a la del CBR, pero con cargas repetitivas; razón por la cual, en la práctica del día a día, la prueba cCBR se puede realizar en la misma prensa utilizada en el ensayo estándar, simplemente que para obtener dicha carga repetitiva el operario debe permanentemente subir y bajar la palanca que permite el movimiento del pistón, para la carga y descarga de la muestra (Figura 3.4).

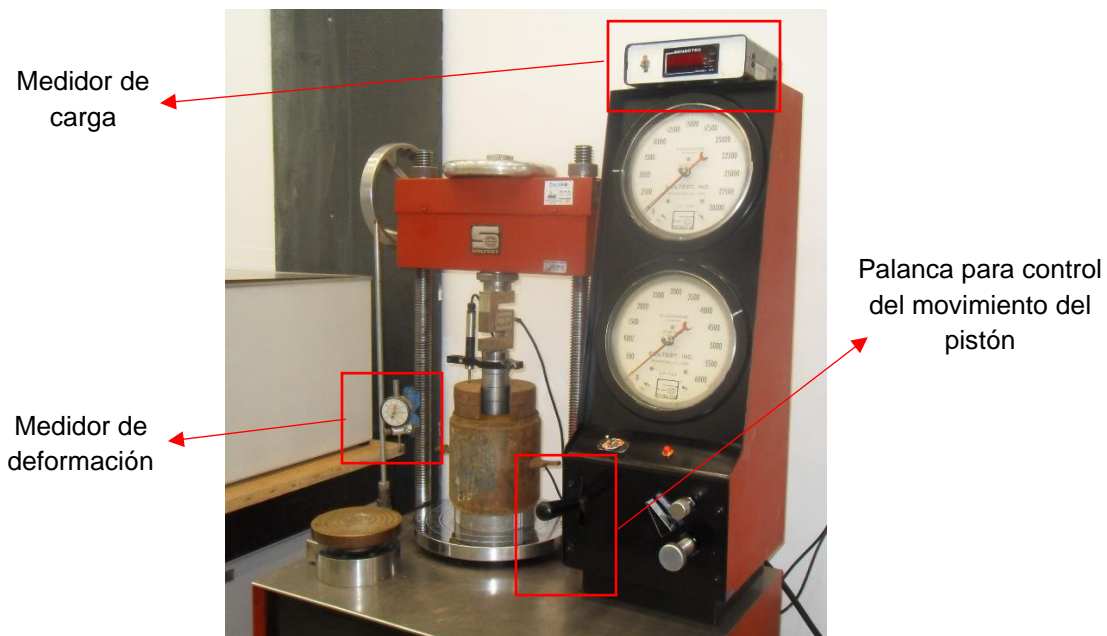


Figura 3.4 Prensa de carga utilizada en ensayo de cCBR y sistema de manual de toma de datos

Fuente: Tomada por el autor

Aunque en el escenario más simplificado el operario debería también tomar nota de la carga y de la deformación presentada en la muestra de suelo en cada carga y en cada descarga, para tener registro de las deformaciones permanente y resiliente, en este caso en particular se genera una mejora con el fin de facilitar el procesamiento de los datos requeridos, mediante la implementación de un sistema de adquisición de datos.

Este sistema de adquisición de datos consiste en un software de computador desarrollado en LabVIEW (Figura 3.5), donde se registran las señales entregadas por la prensa y se hace su respectiva traducción en datos de carga, deformación y tiempo durante el ensayo.

Para el almacenamiento de dicha información en el disco duro del equipo, el usuario debe exportar los datos a una hoja de Excel, y a partir de allí es posible el manejo de estos para su análisis.



Figura 3.5 Sistema de y adquisición de datos

Fuente: Tomada por el autor

Para la medida de la carga y de la deformación durante el ensayo se usa, respectivamente, una celda de carga tipo S con capacidad de 10kN (Ref. HM-2300.020) y un transductor de desplazamiento de 25mm (Ref. HM-2310.10), tal como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Celda de carga y transductor de desplazamiento

Fuente: Tomada por el autor

3.2.3. Procedimiento del ensayo de cCBR

Una vez descrita la metodología para la toma de las muestras y conociendo el equipo para la ejecución del ensayo, el procedimiento a seguir consiste en la ubicación de la muestra en la prensa. Un esquema general de instalación de la muestra para el ensayo se presenta en la Figura 3.7.

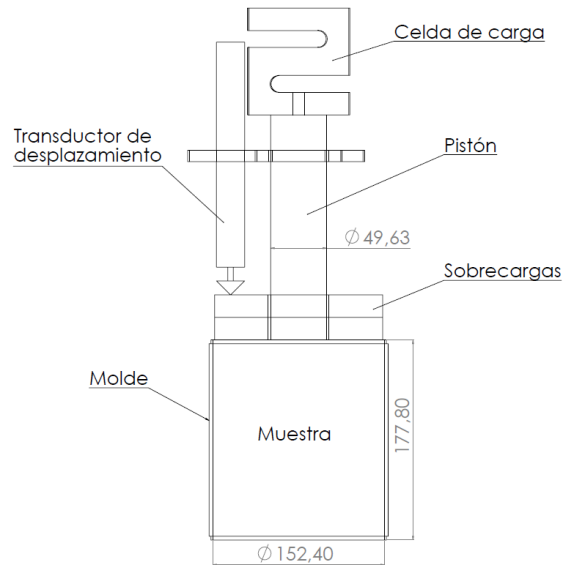


Figura 3.7 Esquema del montaje del ensayo de cCBR (Medidas en mm)

Fuente: Elaboración propia

Para simular la aplicación de la carga repetitiva, el procedimiento es el siguiente:

- I. Durante el ensayo cCBR se aplica una sobrecarga con dos discos metálicos de 4.54kg, con el fin de reproducir un peso equivalente a aproximadamente 15cm de estructura de pavimento.
- II. Puesto que se requiere determinar el comportamiento del material ante diferentes estados de esfuerzos, la ejecución del ensayo se debe hacer a diferentes niveles de penetración. De acuerdo con Molenaar (2008), no es recomendable generar penetraciones mayores a 2.54mm, para evitar un exceso de deformación permanente durante los ciclos aplicados después del primer ciclo de carga. Teniendo en cuenta lo anterior y usando la metodología propuesta por Sas et al. (2015), se ejecutan 3 ensayos de cCBR en muestras idénticas a penetraciones de 0.635mm, 1.27mm y 2.54mm, aproximadamente. Es importante aclarar que para cada uno de estos ensayos se recomienda un material no afectado previamente por ensayos, ni estáticos ni dinámicos (Araya, 2011).

- III. Cada muestra es cargada a la misma velocidad de penetración del ensayo de CBR (1.27mm/min) hasta la deformación objetivo (0.635, 1.27 o 2.54mm, aproximadamente). La carga que se requirió para dicha penetración se anota e inmediatamente se comienza la descarga hasta el 10% de dicha carga aproximadamente, a la misma velocidad, asegurado así siempre un contacto entre la muestra y el pistón.
- IV. La muestra es cargada nuevamente hasta la misma carga anotada en el paso anterior para la penetración objetivo, y descargada hasta el 10%, dicho de otro modo, la carga máxima y mínima en cada ciclo se mantienen constantes durante el ensayo.
- V. Estos ciclos carga-descarga son repetidos entre 100 y 150 veces, con el fin de alcanzar un comportamiento resiliente, el cual se considera cuando la variación en la deformación permanente entre ciclos consecutivos es menor a 3%. Cabe resaltar que el método para carga y descargar la muestra no es automático, razón por la cual se requiere que el operario se encuentre pendiente para mover la palanca que permite el desplazamiento del pistón en los momentos oportunos hasta finalizar todos los ciclos.
- VI. Finalmente se toma una muestra representativa con el propósito de determinar el contenido de humedad del material.

Una vez que se registran los datos de carga y deformación por unidad de tiempo, es posible calcular la deformación resiliente y permanente para cada ciclo y la deformación total después de un cierto número de ciclos. La Figura 3.8 y la Figura 3.9 detallan la prueba cCBR y el método para determinar los diferentes componentes de la deformación:

- La Figura 3.8a muestra la deformación con el tiempo que indica la velocidad constante de desplazamiento de carga y descarga de 1.27mm/min y también ilustra la deformación permanente total después de algunos ciclos de carga y la deformación resiliente y permanente por cada ciclo.
- La Figura 3.8b presenta de manera similar la carga con el tiempo. La forma de la curva depende de la respuesta del material para la tasa de desplazamiento definida de carga y descarga. Cabe señalar que la transición de la carga a la descarga y viceversa se realiza de forma repentina, controlada por el operador en dos eventos: cuando se alcanza la carga mínima y cuando se alcanza la carga máxima.

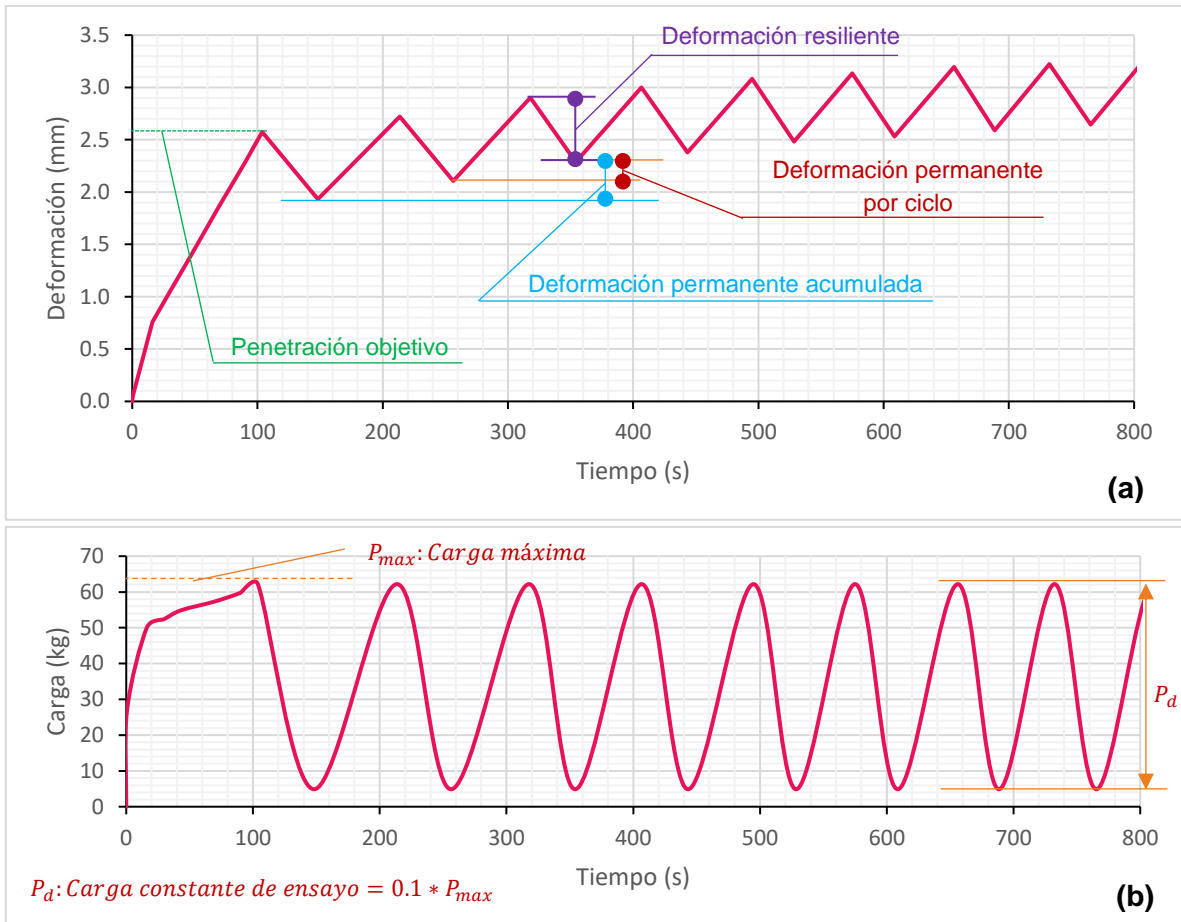


Figura 3.8 Ensayo cCBR (a) Deformación en función del tiempo, (b) Carga en función del tiempo

Fuente: Elaboración propia

- La Figura 3.9a ilustra la relación carga-deformación para la carga inicial, es decir, la carga estándar de CBR y los ciclos de carga repetitivos. También muestra cómo la deformación permanente por ciclo disminuye a medida que avanza el número de ciclos.
- La Figura 3.9b muestra el desarrollo de las principales deformaciones, es decir, la deformación resiliente, la deformación permanente acumulada y por ciclo y la deformación total acumulada, de la prueba cCBR frente al número de repeticiones de carga.

Una propuesta de norma de laboratorio completa a partir de lo aquí expuesto se presenta en el Anexo A.

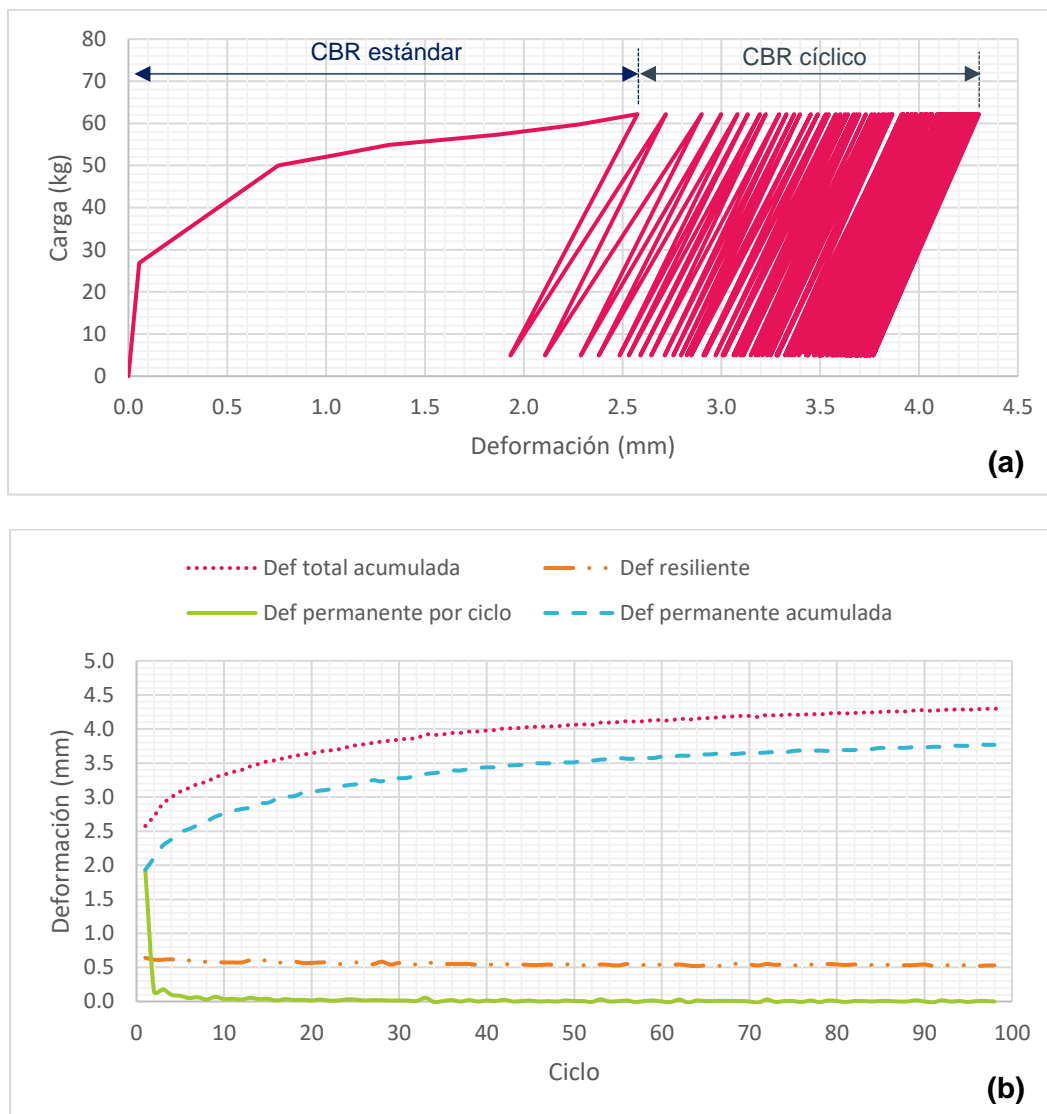


Figura 3.9 Ensayo cCBR (a) Deformación en función de la carga, (b) Desarrollo de las deformaciones con los ciclos de carga

Fuente: Elaboración propia

3.3. Modelación en elementos finitos para la determinación del E_{equi}

Estudios han demostrado que el módulo obtenido del ensayo de cCBR mediante la clásica ecuación de módulo resiliente (Ecuación 3-2) no es comparable de manera directa con la obtenida del ensayo estándar de módulo; esto se le atribuye principalmente al hecho de que los niveles de esfuerzos trabajados en el cCBR son considerablemente mayores. Esta “incompatibilidad” ha fomentado la búsqueda de correlaciones entre el M_r del ensayo triaxial y el módulo del cCBR (Sas et al., 2012; Sas et al., 2015; Sas et al., 2017). Araya (2011) y

Haghighi et al. (2017) sustentan que dado que el propósito del ensayo de cCBR es obtener un estimativo aceptable del módulo de rigidez mediante una técnica de caracterización sencilla, se requiere un punto de vista más global; y en este enfoque, la variación del módulo de rigidez en el molde de CBR debe ser reemplazada por un promedio, al cual le denominan módulo equivalente (E_{equi}).

$$M_r = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_r}$$

Ecuación 3-2

Tal como se mencionó en la sección 2.4.4.2, Opiyo (1995) desarrolló tres ecuaciones, con ciertas limitaciones, para estimar dicho módulo; años más tarde, partiendo de dichas limitaciones, Araya (2011) propone una ecuación en la que se tiene una condición más ajustada entre el molde y el espécimen, además de considerar una gama más amplia de propiedades elásticas que su antecesor.

El propósito principal de esta última propuesta fue simular la prueba cCBR a través del análisis de elementos finitos. Esto es desarrollar una relación simplificada entre las propiedades elásticas del material, principalmente el módulo de rigidez, con los esfuerzos y deformaciones obtenidos utilizando una propiedad elástico-lineal simple del material para modelar tanto la muestra de suelo como el molde de acero que la confina.

La estructura modelada consiste en un pistón rígido, un molde de acero y la muestra de suelo. El pistón está modelado como un cuerpo rígido y al molde de acero se le asignó un módulo de elasticidad de 210 GPa y una relación de Poisson de 0.2. La visualización en 3D de la simulación se presenta en la Figura 3.10.

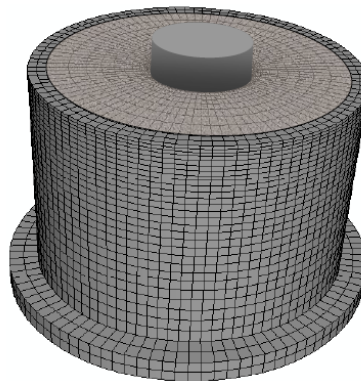


Figura 3.10 Visualización en 3D de la simulación en elementos finitos de la muestra del suelo y el molde rígido usada por Araya (2011)

Fuente: Tomado de Araya (2011)

Por medio de análisis de regresión realizados en un gran conjunto de datos obtenidos de las simulaciones de elementos finitos con varias combinaciones de E y ν y niveles de carga, la ecuación obtenida, con un r^2 de 0.997, fue:

$$E_{equi} = \frac{1.513 * (1 - \nu^{1.104}) * \sigma_p * a}{w^{1.012}}$$

Ecuación 3-3

Dada las mejoras presentadas por esta última expresión, se considera la más adecuada para la determinación del E_{equi} en la presente investigación, asumiendo una relación de Poisson 0.45, lo cual se considera típico para los suelos blandos de subrasante bogotanos.

3.4. Referencias

- Araya, A. A. (2011). *Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements*. Delft University of Technology. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:1d964e6f-e7e5-4d2a-834b-db9b3504745f/datastream/OBJ/download>
- Bautista Mendoza, J. A. (2017). CBR en muestra inalterdas: Natural y saturada. Universidad de Alas Peruanas. Retrieved from https://docuri.com/download/cbr_59c1d831f581710b28673213_pdf
- Haghighi, H., Arulrajah, A., Mohammadinia, A., & Horpibulsuk, S. (2017). A new approach for determining resilient moduli of marginal pavement base materials using the staged repeated load CBR test method. *Road Materials and Pavement Design*, 19(8), 1848–1867. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1352532>
- INVIAS. (2013). *Normas de Ensayo de materiales para carreteras*.
- Molenaar, A. A. A. (2008). Repeated load cbr testing, a simple but effective tool for the characterization of fine soils and unbound materials. In *Transportation Reserach Board TRB 2008, Annual Meeting CD-ROM, No. 08-0516*. Washington, D.C. Retrieved from <https://docplayer.net/46837168-Repeated-load-cbr-testing-a-simple-but-effective-tool-for-the-characterization-of-fine-soils-and-unbound-materials-a-a-a.html>
- Molenaar, A. A. A., Araya, A. A., & Houben, L. (2011). Repeated load cbr testing, a simple but effective tool for the characterization of fine soils and unbound materials. In *10th Conference on asphalt pavements for Southern Africa* (pp. 1–15). KwaZulu Natal, South Africa. Retrieved from http://www.aapaq.org/q/2011st/CAPSA2011/FA4_08_75_1029.pdf
- Opiyo, T. O. (1995). *A Mechanistic Approach to Laterite-based Pavements, in Transport and Road Engineering (TRE)*. International Institute for Infrastructure, Hydraulic and Environment Engineering (IHE): Delft.
- Sas, W., Gluchowski, A., Gabrys, K., & Szymanski, A. (2015). Application of cyclic CBR test for the estimation of resilient modulus in the pavement construction. In *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development* (pp. 3747–3752). Institution of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1680/ecsmge.60678>
- Sas, W., Głuchowski, A., & Miturski, M. (2017). Studies on resilient modulus value from cyclic loading tests for cohesive soil. *Annals of Warsaw University of Life Sciences –*

SGGW. *Land Reclamation*, 49(2), 117–127. <https://doi.org/10.1515/sggw-2017-0010>

Sas, W., Gluchowski, A., & Szymansky, A. (2012). Determination of the Resilient modulus MR for the lime stabilized clay obtained from the repeated loading CBR tests. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW Land Reclamation*, 44(2), 143–153. <https://doi.org/10.2478/v10060-011-0070-0>

Sparsha, N., Robinson, R., & Murali, J. (2016). Use of repeated load CBR test to characterize pavement granular materials. In *Functional Pavement Design* (pp. 965–974). Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315643274-106>

Capítulo 4. Metodología y materiales

En este capítulo se presenta la metodología manejada, describiendo la zona de estudio, los equipos y herramientas utilizadas y los ensayos de campo y laboratorio ejecutados; así como los resultados de dichos ensayos, referentes a la caracterización y clasificación de los materiales de subrasante obtenidos en las perforaciones.

4.1. Metodología de la investigación

Con el fin de presentar una completa descripción de la metodología, como primera medida se presenta la delimitación de la zona de estudio, especificando los puntos donde fueron tomadas las muestras, y posteriormente se describirá el desarrollo de cada una de las diferentes etapas que componen la investigación.

4.1.1. Delimitación de la zona de estudio

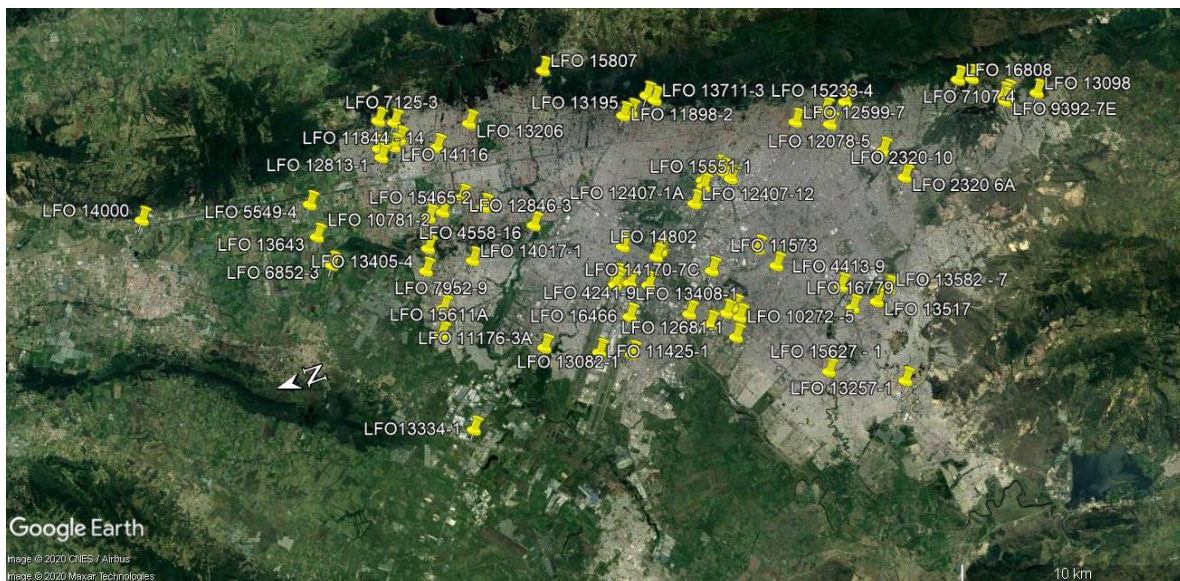


Figura 4.1 Proyectos ejecutados por LFO en la ciudad de Bogotá desde 2009 hasta 2019

Fuente: Google Earth

El estudio detallado que llevó a la determinación de la zona seleccionada fue realizado por Ruiz (2019), quien inicialmente procesó la información disponible de 83 proyectos ejecutados por la empresa LFO Ingenieros de Suelos S.A.S. desde enero de 2009 hasta enero de 2019 en la ciudad de Bogotá, los cuales contaban con ensayos de CBR sobre muestra inalterada (Figura 4.1).

4.1.1.1. Zonificación sísmica

De acuerdo a lo establecido en el Decreto 523 de 2010 (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2010), teniendo en cuenta los proyectos de la base de datos utilizada, y sabiendo que los suelos blandos de subrasante seleccionados para la investigación son de origen lacustre, se estableció que las zonas lacustres 200 y 300 podrían ser zonas potencialmente útiles (Figura 4.2) para el desarrollo del estudio.

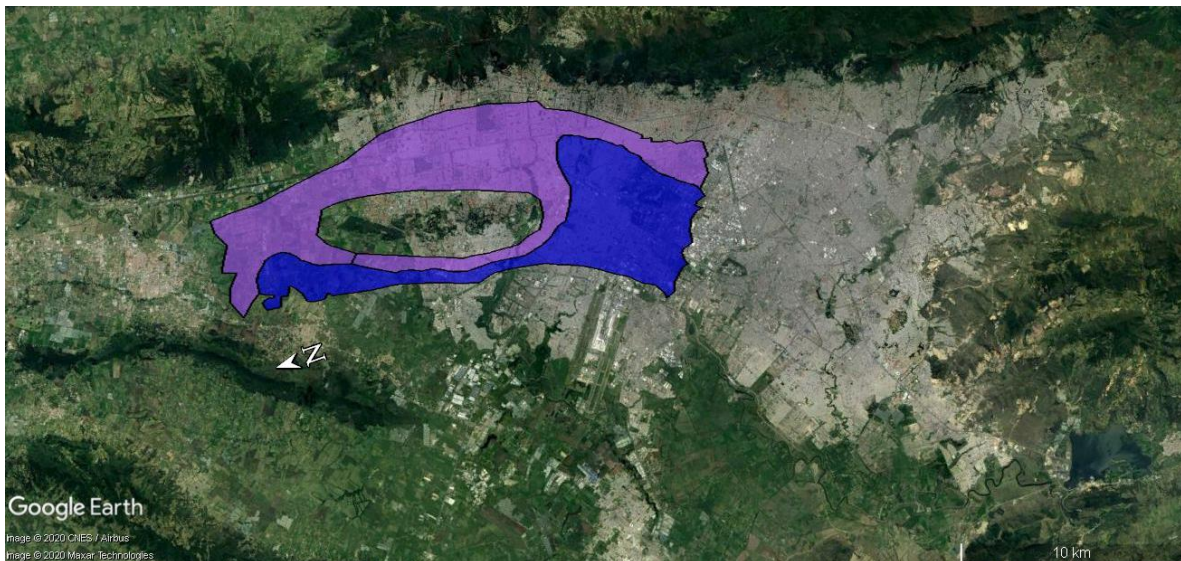


Figura 4.2 Zona lacustre 200 (Morado) y lacustre 300 (Azul)

Fuente: Google Earth

La elección de estas dos zonas en conjunto se consideró adecuada ya que ambas se reportan como suelos lacustres blandos, conformados principalmente por arcillas limosas o limos arcillosos, y en algunos sectores con intercalaciones de lentes de turba; la diferencia entre estas dos zonas radica en el espesor de los depósitos: Para lacustre 200 el espesor varía entre 100 y 200 metros, mientras que en la otra zona la variación se presenta entre 200 y 300 metros, lo cual para esta investigación en particular no presenta mayor influencia.

A pesar de tenerse esta primera delimitación de la zona de estudio, no se consideró pertinente una elección basada únicamente en la zonificación sísmica, razón por la cual también se tuvo en cuenta las zonificaciones geotécnica y geológica.

4.1.1.2. Zonificación geotécnica

De acuerdo con el mismo decreto mencionado anteriormente, la zona preliminarmente escogida (Lacustre 200 y 300) se encuentra en mayor medida en las zonas geotécnicas denominadas Lacustre A y Lacustre B (Figura 4.3).

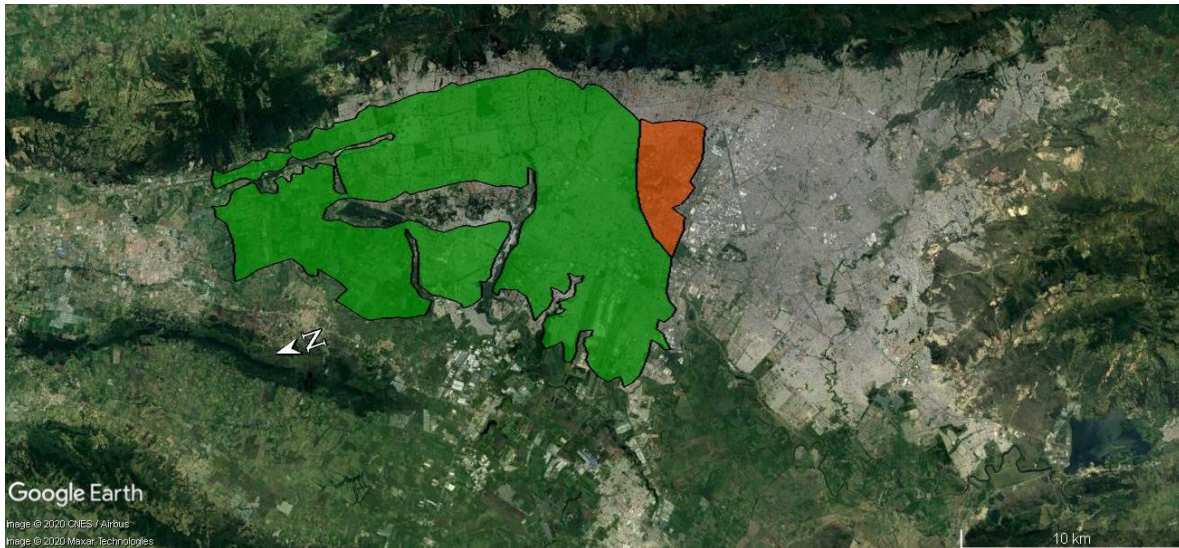


Figura 4.3 Zona Lacustre A (Verde) y Lacustre B (Naranja)

Fuente: Google Earth

Al igual que en la zonificación sísmica, aquí las zonas Lacustre A y B se consideran homogéneas para efectos de la investigación, ya que la diferencia entre ellas radica en la consistencia: predominantemente blanda en la primera zona y muy blanda en la segunda, las cuales concuerdan con el tipo de suelo de estudio. Fuera de la consistencia, estas dos zonas están compuestas por arcillas limosas, pertenecientes a la zona geológica Lacustre de Terraza Alta, con una muy baja a media capacidad portante, además de ser muy compresibles.

4.1.1.3. Zonificación geológica

Finalmente, de acuerdo con el mapa geológico de Colombia 2017 (Alcárcel & Gómez, 2017), la zona seleccionada pertenece a la unidad cronoestratigráfica Q1-I del Pleistoceno. La unidad está conformada por arcillas, turbas y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas; y localmente, capas de depósitos de diatomeas, dicha zona se muestra en la Figura 4.4.

El Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) concuerda con lo dicho anteriormente, ya que sustenta que la zona pertenece a las unidades geológicas Qsa1 y Qsa2, correspondientes a la Formación Sabana, conformada por arcillas orgánicas, turbas, arcillas arenosas y arenas arcillosas intercaladas (IDIGER, 2016).

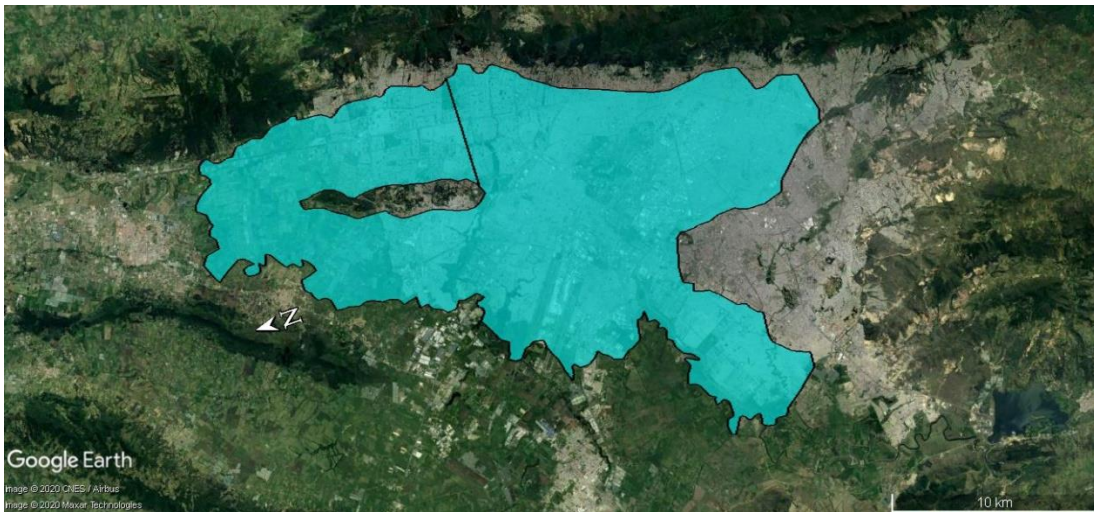


Figura 4.4 Geología de la zona Q1-I

Fuente: Google Earth

4.1.1.4. Superposición de las zonas

Una vez establecida la zona potencial de estudio de acuerdo con la sismicidad, la geotecnia y la geología de manera independiente, se pasó a superponer las tres zonas y establecer como zona definitiva de estudio el área que comparten las tres zonas, tal como se muestra en la Figura 4.5.

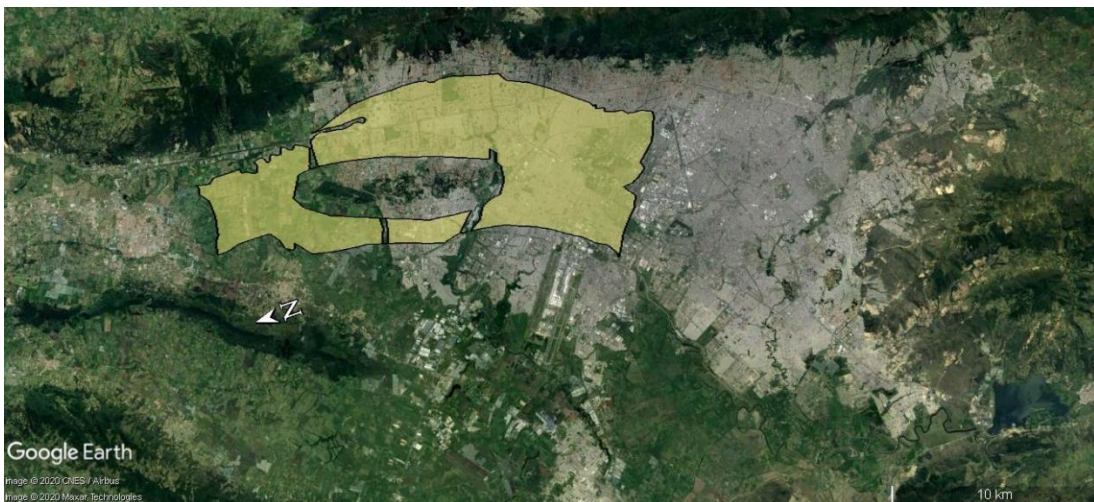


Figura 4.5 Zona de estudio definitiva (Amarillo)

Fuente: Google Earth

A partir de lo anterior, se establece que la zona de trabajo escogida para el proyecto se encuentra entre la calle 22 hasta la calle 235 en el sentido Sur-Norte, y entre la carrera 9 a

la carrera 104, aproximadamente, en el sentido Oriente-Occidente, excluyendo los cerros de suba. Cabe resaltar que, para efectos de la presente investigación, se estableció que lo un suelo blando de subrasante en Bogotá es aquel que presenta un valor de CBR como máximo del 5%, algo considerado típico en la zona.

4.1.1.5. Valores de CBR de la zona seleccionada

Una vez delimitada la zona de estudio, se procedió a filtrar los proyectos existentes en dicha área de la base de datos de LFO (Figura 4.6). En total se cuenta con 23 proyectos realizados y 70 ensayos de CBR sobre muestra inalterada, tal como se muestra en la Tabla 4.1 (Totales).

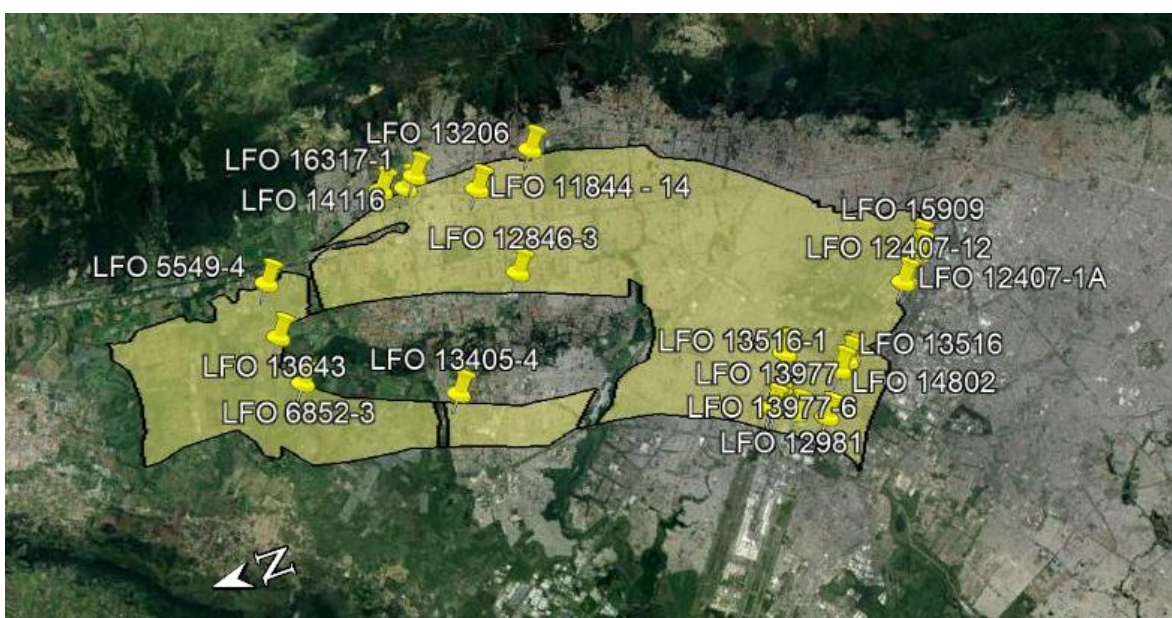


Figura 4.6 Ubicación de los 23 proyectos ejecutados por LFO en la zona de estudio

Fuente: Google Earth

Tabla 4.1 Rango de CBR de proyectos en la zona establecida de estudio

Rango CBR (%)	Totales		Filtrados	
	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
0.10 - 0.99	3	4%	3	5%
1.00 - 1.99	7	10%	6	9%
2.00 - 2.99	25	36%	24	38%
3.00 - 3.99	17	24%	15	23%
4.00 - 4.99	11	16%	9	14%
> 5.00	7	10%	7	11%
Total	70	100%	64	100%

Fuente: Tomado de Ruiz (2019)

No obstante, de estos ensayos, se excluyeron del análisis 6 muestras que fueron extraídas sobre rellenos, por lo cual realmente se procedió a realizar un análisis con 64 ensayos (Tabla 4.1 – Filtrados). De acuerdo con las muestras filtradas de la tabla anterior, el 75% de los valores de CBR se encuentran en el rango de 2% a 5%, lo cual coincide con los valores típicos empleados en diseño para la zona lacustre de Bogotá.

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 color gris a café (MH) en un 57% y arcillas de color café (CH) en un 32%, en algunos casos se pueden presentar rastros de arena, raíces y materia orgánica. Estos estratos se encuentran a profundidades que varían, dicha variación se debe a los diferentes espesores de relleno empleados en su momento para la nivelación de los terrenos (Ruiz, 2019), cabe resaltar que las muestras utilizadas en la investigación en todos los puntos fueron tomadas inmediatamente después de sobrepasar los estratos de capa vegetal y relleno.

4.1.2. Etapas de la investigación

El fin de la investigación es evaluar, desarrollar y validar el ensayo de cCBR como procedimiento de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas de suelos de subrasante inalterados. Para cumplir con este fin y los demás objetivos planteados, es importante establecer claramente las etapas de la investigación, ya que estos permite organizar las actividades requeridas y determinar cómo y cuándo se deben hacer (Verschuren & Doorewaard, 2010).

A partir de la revisión de la literatura, se lograron establecer los procedimientos y pautas más adecuadas para cada una de las cinco (5) etapas que componen la investigación. En la primera etapa se busca la calibración de los ensayos cCBR y Mr, en la segunda se obtienen las muestras inalteradas y se ejecutan los ensayos de campo; en la tercera se caracterizan y clasifican las muestras, en la siguiente etapa se ejecutan los ensayos de resistencia y rigidez, para finalizar con el análisis, la determinación de correlaciones, conclusiones y recomendaciones.

Un diagrama de flujo con las etapas antes descritas se presenta en la Figura 4.7. En ella también se observa que es posible realizar en simultaneo algunas de las etapas, esto se debe principalmente a que no se requiere información de una etapa anterior para comenzar la siguiente (Etapas 1 y 2) o que pueden ser realizadas en el laboratorio en simultaneo (Etapas 3 y 4). En dicho diagrama también es posible observar el número de ensayos en campo, exploraciones y muestras, tanto tubos de pared delgada como CBR inalterados, requeridas para cumplir con los objetivos de la investigación.

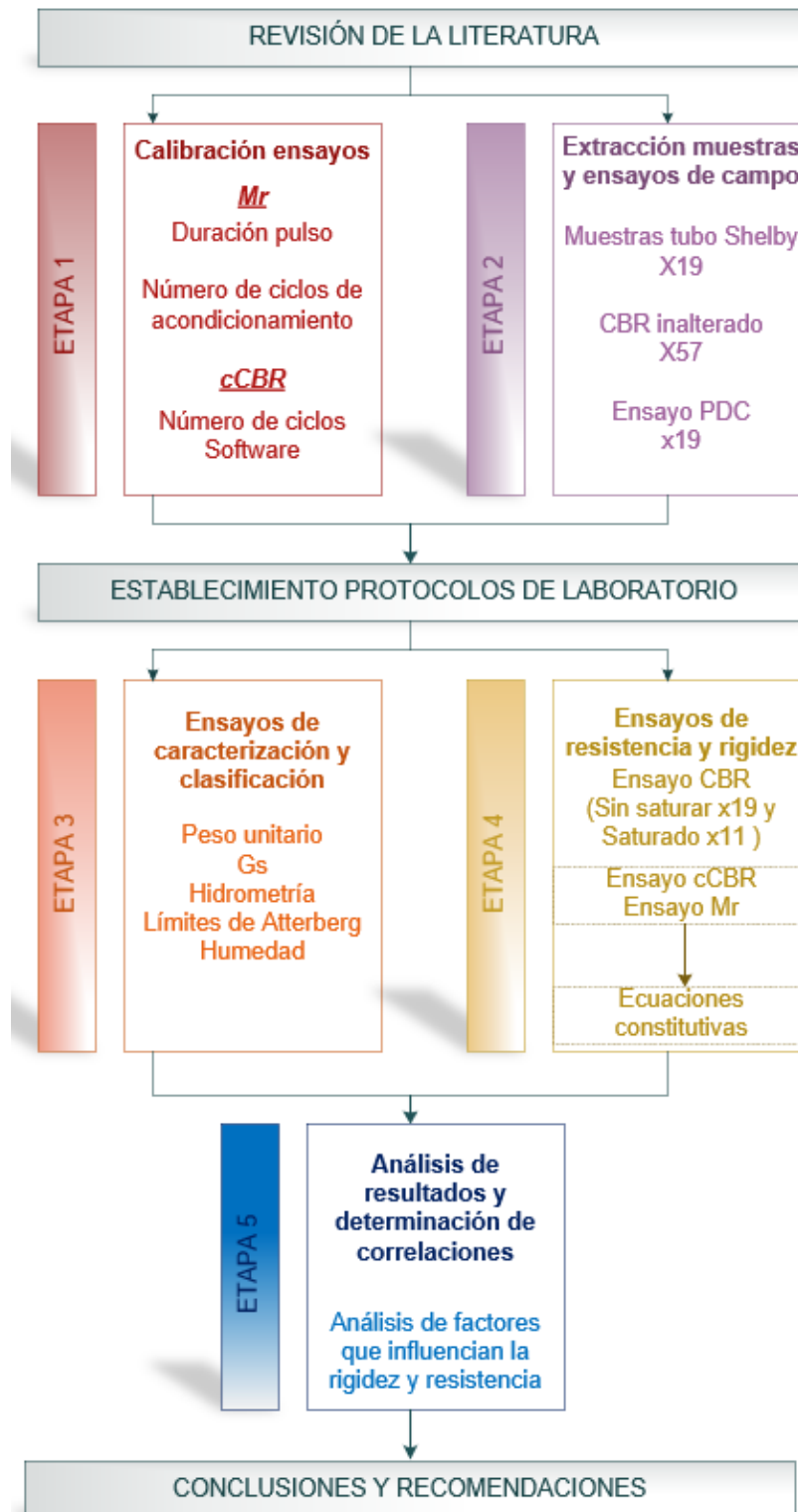


Figura 4.7 Diagrama de las etapas de la investigación

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.1. *Etapa 1. Calibración de ensayos de laboratorio*

En esta primera etapa se buscó ejecutar una serie de ensayos piloto, con el objetivo de determinar las variables precisas y más adecuadas para la correcta puesta en marcha de los ensayos sobre las muestras reales de estudio. Estas pruebas piloto se centraron en el ensayo cCBR, puesto que no es un ensayo estándar y se debía verificar si el equipo, herramientas y software con el cual se cuenta, presentan la precisión requerida y de esta manera replicar el protocolo propuesto en la literatura con una buena repetitividad. Otro ensayo al cual se le generaron pruebas fue al ensayo de módulo resiliente, ya que según normatividad INV – E - 156 (la cual está basada en la AASHTO T – 307) queda a criterio del ingeniero la selección del tiempo de reposo entre cada pulso de carga (entre 0.9 a 3 segundos) y el número de ciclos en la etapa de acondicionamiento (De 500 o 1000 ciclos).

En cuanto al ensayo de módulo resiliente, se ejecutaron un total de 10 ensayos piloto. A partir de ellos fue posible determinar que, dado que algunas muestras son de consistencia muy blanda, un mayor tiempo de reposo reduce la probabilidad de falla, permitiendo aplicar casi todas o todas las 15 secuencias de carga establecidas. Debido a que el equipo utilizado es neumático (Figura 4.8), la norma permite un ciclo en el cual el pulso de carga dura 0.1 segundos y el reposo hasta 3 segundos, el cual se reconoció como el más adecuado para evitar la falla prematura en dichas muestras blandas.



Figura 4.8 Equipo DYNAPAVE utilizado para ensayo de Mr

Fuente: Tomada por el autor

Además, en cuanto al número de repeticiones en la etapa de acondicionamiento, se observó que en gran parte de las muestras ensayadas con 500 ciclos no se logró llegar a

un estado en el cual ya no se genere un cambio en la altura de la muestra, es por esta razón que se consideró adecuado que el ciclo de acondicionamiento dure un total de 1000 repeticiones, tal como lo permite la norma en estos casos.

En lo que respecta al ensayo de cCBR, tal como se mencionó en la revisión de la literatura, el principio de este ensayo es el empleo del mismo equipo y de los mismos parámetros del ensayo tradicional de CBR, no obstante, con el fin de tener una mejor calidad en los datos obtenidos en este ensayo, se utilizó una celda de carga y un transductor de desplazamiento, los cuales son capaces de tomar entre 6 a 10 datos por segundo y los almacena en un computador a través de un software desarrollado en LabVIEW (Figura 4.9). El detalle de este sistema de adquisición de datos se presentó en el Capítulo 3.



Figura 4.9 Equipo de ensayo y adquisición de datos para el ensayo cCBR

Fuente: Tomadas por el autor

Para este caso se hicieron un total de 8 ensayos de penetración cíclica, con el objetivo de verificar la calidad de los datos tomados por el software a través de las curvas de calibración utilizadas, tanto de carga como de deformación.

4.1.2.2. Etapa 2. Extracción de muestras inalteradas y ensayos de campo

En esta etapa se realizaron las perforaciones con el objetivo de obtener muestras inalteradas en tubos Shelby de 60mm o 70mm de diámetro, de acuerdo con lo establecido en la norma INV-E-105 “Obtención de muestras de suelo mediante tubos de pared delgada” y en moldes de CBR, tal como se presenta en la norma INV-E-148 “CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada – Anexo A”. Adicionalmente, se ejecutó el ensayo de PDC, bajo lo establecido en la norma INV-E-172 “Penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad” (Figura 4.10). Lo

anterior se ejecutó inmediatamente después de atravesar la capa vegetal y el relleno de la zona.



Figura 4.10 Exploración para obtención de muestras y ensayo de campo (PDC)

Fuente: Tomadas por el autor

Adicional a la toma de muestras es importante la extracción de los tubos Shelby en el laboratorio, así como el adecuado almacenamiento tanto de estas muestras como las

muestras de CBR (Figura 4.11 y Figura 4.12). Siempre se procuró que su almacenamiento fuera el mínimo posible y en las mejores condiciones para evitar pérdida significativa de sus propiedades in-situ.



Figura 4.11 Extracción y almacenamiento de muestras tubo Shelby

Fuente: Tomadas por el autor



Figura 4.12 Almacenamiento muestra inalteradas de CBR

Fuente: Tomadas por el autor

Se realizaron un total de 19 perforaciones dentro de la zona, en las cuales se tomó un tubo Shelby, tres moldes de CBR y se ejecutó un ensayo de PDC. Este número de muestras se consideró adecuado dadas las recomendaciones de Sánchez & Campagnoli (2016) y Yoder & Witczak (1975); a su vez, es posible observar que estudios realizados con el objetivo de determinar la aplicabilidad del ensayo cCBR por diferentes autores, han considerado suficiente un número de muestras que oscila entre 5 y 20 (Molenaar, 2007; Molenaar, 2008; Araya et al., 2010; Araya et al., 2011; Araya et al., 2012; Araya, 2011; Molenaar et al., 2011; Sas et al., 2012; Sas & Gluchowski, 2013a; Sas & Gluchowski, 2013b; Sas et al., 2015; Sparsha et al., 2016; Nini, 2017; Sas et al., 2017; Haghighi et al., 2017).

En la Figura 4.13 se presentan las 5 zonas en las cuales fue posible la recolección de las 19 muestras trabajadas en la investigación. Tal como se observa en el mapa, cada una de

estas zonas se encuentra dentro del área de trabajo previamente establecida, la localización exacta de dichos puntos se presenta en la Tabla 4.2.

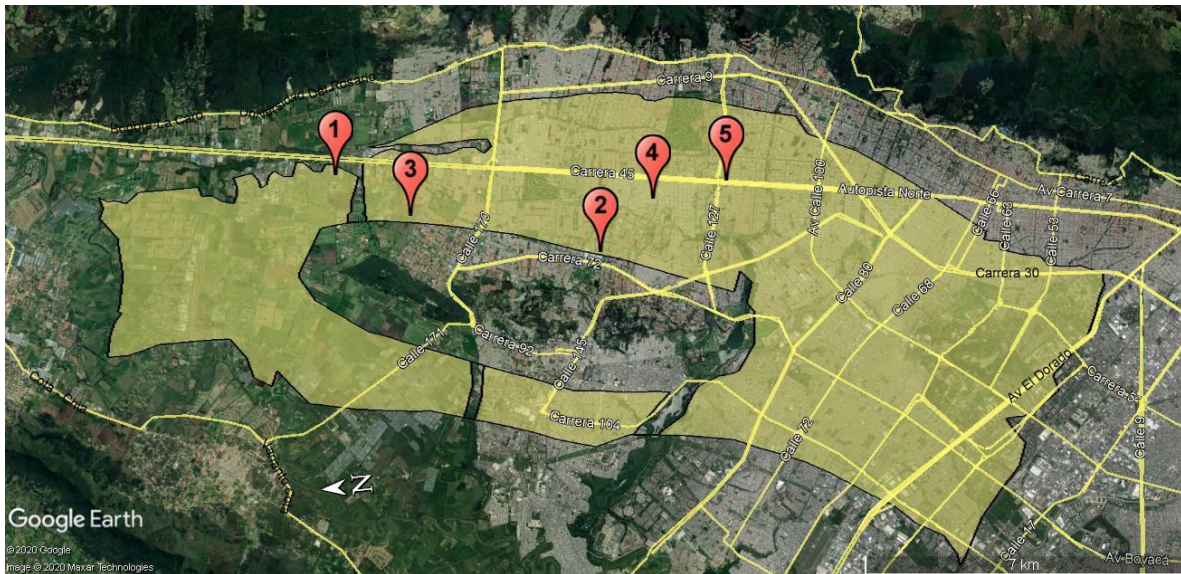


Figura 4.13 Ubicación de las zonas de exploración ejecutadas

Fuente: Google Earth

Tal como se puede observar en la Tabla 4.2, todas las exploraciones fueron ejecutadas a profundidades que varían entre 0.40 a 2.00 metros, esto debido a que para obtener las muestras de arcilla o limo que se buscaron en esta investigación, en algunos casos fue necesario atravesar los rellenos y/o la capa de materia orgánica que generalmente están presentes antes de dicho material.

Tabla 4.2 Ubicación de las exploraciones realizadas

Zona	Nº	Profundidad (m)	Ubicación
1	1	1.30 - 1.50	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, cerca pozo aguas negras
1	2	1.20 - 1.40	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, lote B
1	3	1.60 - 1.80	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L
2	4	0.80 - 1.00	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31
1	5	1.20 - 1.40	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I
1	6	1.00 - 1.20	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki
1	7	0.80 - 1.00	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes
3	8	0.50 - 0.80	Cra 72 No.181-90 (Lote San José de Bavaria)
3	9	0.50 - 0.80	Cra 72 No.181-90 (Lote San José de Bavaria)
3	10	0.50 - 0.80	Cra 72 No.181-90 (Lote San José de Bavaria)
3	11	0.50 - 0.70	Cra 72 No.181-90 (Lote San José de Bavaria)
3	12	0.60 - 0.80	Cra 72 No.181-90 (Lote San José de Bavaria)
3	13	0.40 - 0.60	Cra 72 No.181-90 (Lote San José de Bavaria)
3	14	0.50 - 0.70	Cra 72 No.181-90 (Lote San José de Bavaria)

Continúa la tabla

1	15	1.80 – 2.00	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes
4	16	0.50 - 0.70	Calle 134A # 50 - 34, Punto 1
4	17	0.50 - 0.70	Calle 134A # 50 - 34, Punto 2
5	18	0.40 - 0.70	Calle 125 con Autopista Norte, Punto 1
5	19	0.40 - 0.70	Calle 125 con Autopista Norte, Punto 2

Fuente: Elaboración propia

También es posible observar en dicha tabla que 14 de las 19 exploraciones fueron ejecutadas en dos lugares en particular: 7 en la zona 1 y 7 en la zona 3, la distribución de estas exploraciones en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (ECI) se presenta en la Figura 4.14 y en el lote del barrio de San José de Bavaria (SJB) en la Figura 4.15.



Figura 4.14 Ubicación de las 7 exploraciones ejecutadas en la ECI

Fuente: Google Earth



Figura 4.15 Ubicación de las 7 exploraciones ejecutadas en SJB

Fuente: Google Earth

4.1.2.3. Etapa 3. Caracterización y clasificación de las muestras

En la tercera etapa se desarrolló la clasificación y caracterización de las 19 muestras utilizando técnicas convencionales de mecánica de suelos, siguiendo las normas INVIAS, una descripción detallada de los procedimientos se presenta en el Anexo C.

Considerando las recomendaciones de Sánchez & Campagnoli (2016) respecto a los ensayos básicos en laboratorio para caracterizar los suelos de subrasante, se ejecutaron para cada una de las muestras ensayos de humedad, límite líquido, límite plástico, granulometría (Hidrometría), gravedad específica y peso unitario, esta última bajo normatividad ASTM ya que no se encuentra estandarizada en INVIAS.

4.1.2.4. Etapa 4. Ensayos de resistencia y rigidez

En esta etapa se determinaron las propiedades de resistencia y rigidez de las muestras mediante ensayos de laboratorio. Por un lado, las muestras inalteradas obtenidas de los tubos de pared delgada se utilizaron para los ensayos de módulo resiliente de acuerdo con la norma INV-E-156 "Módulo resiliente de suelos y agregados" (metodología AASHTO). Estas muestras, dado que se exige una relación altura/diámetro de mínimo 2, tenían una altura de 140mm y un diámetro de 70mm aproximadamente, y fueron ensayadas en las mismas condiciones de humedad y densidad de las muestras inalteradas tomadas para CBR y cCBR.

- Ensayo triaxial cíclico (Módulo Resiliente)

Esta prueba consiste en llevar la muestra a diferentes combinaciones de presiones de confinamiento y esfuerzo desviador a un número determinado de ciclos (Tabla 2.4), para luego, cuando es posible, fallarlas y obtener la resistencia al corte no drenada a un nivel de confinamiento de 27.6kPa, a una velocidad de 1% de la deformación por minuto.

Tal como se mencionó anteriormente, el pulso de carga es de 0.1 segundos por un periodo de reposo de 3 segundos y el ciclo de acondicionamiento se llevó a cabo con 1000 repeticiones, además, la forma de la carga fue Haversine y si se presentaba una deformación mayor al 5% se consideraba la falla de la muestra, todo lo anterior de acuerdo con la normatividad INVIAS.

A partir de los cálculos suministrados por el sistema de adquisición de datos análogos de la máquina DYNAPAVE, se promedian los últimos 5 pulsos, y se registra la deformación resiliente promedio al igual que el esfuerzo cíclico promedio, y a partir de estos datos se calcula el módulo resiliente (Figura 4.16).

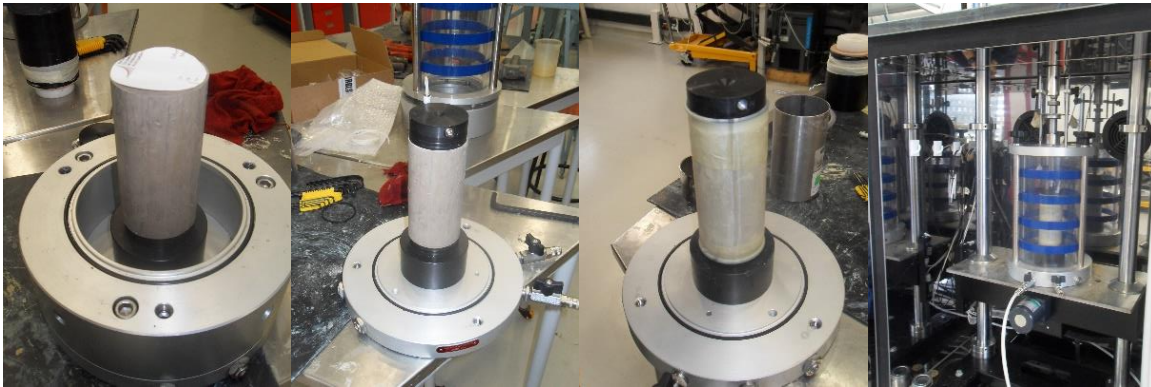


Figura 4.16 Preparación y montaje de la muestra para ensayo de Mr

Fuente: Tomada por el autor

Con el fin de evaluar la rigidez de las muestras, se generó un análisis del Mr a partir de dos ecuaciones constitutivas: (i) La propuesta por Moossazadeh & Witczak (Modelo $k - \sigma_d$) y (ii) el modelo universal (Modelo de cortante octaédrico), los cuales se presentaron en el Capítulo 2.

- Ensayo CBR

En cuanto al ensayo CBR, este se realizó de acuerdo con la norma INV-E-148 “CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada”. Tal como lo establece dicho procedimiento, las muestras inalteradas son tomadas en moldes de 152.4mm de diámetro, y penetradas hasta obtener el esfuerzo requerido para llegar a las profundidades de 2.54mm y 5.08mm por un pistón circular de diámetro conocido, a una velocidad de 1.27mm/min; el ensayo se realiza con dos sobrecargas sobre la muestra (Figura 4.17).



Figura 4.17 Ensayo de CBR

Fuente: Tomada por el autor

Cabe resaltar que, en este caso particular, se procuró realizar el ensayo sin saturar, puesto que las correlaciones que se buscan establecer son en materiales cuya condición de humedad y densidad son las mismas que en el terreno; no obstante, se tuvo la posibilidad de realizar algunas en condición saturada, lo cual permitió establecer que las muestras trabajadas no presentan expansión.

- Ensayo CBR cíclico (cCBR)

Dado que el ensayo de cCBR es un procedimiento no estandarizado los pasos utilizados fueron una recopilación de recomendaciones dadas en la literatura para su adecuada ejecución, todo lo referente a esta prueba se presenta de manera detallada en Capítulo 3, esto debido a la necesidad de establecer un adecuado protocolo para el cumplimiento del principal objetivo de la investigación.

4.1.2.5. Etapa 5. Análisis de resultados y determinación de correlaciones

En esta última etapa, además de analizar y comparar todos los resultados obtenidos con los diferentes ensayos, se evaluó si se presentaban correlaciones entre los diferentes parámetros obtenidos. Cabe resaltar que es importante determinar las ecuaciones constitutivas para los ensayos de M_r y cCBR, la ecuación para el módulo equivalente en el ensayo de cCBR y el estado de esfuerzos con el cual se compara el ensayo de PDC y CBR sin saturar, cada uno de estos parámetros se detallará más adelante en el documento.

4.2. Clasificación y caracterización de los materiales

A partir de los procedimientos y ensayos descritos en la etapa 3 de la metodología (Numeral 4.1.2.3) se obtuvo la información respecto a la caracterización física de los materiales, algunos de estos resultados son presentados en la Tabla 4.3 (Los formatos de ensayo se encuentran en el Anexo D).

Tal como se observa en dicha tabla, dentro de los tipos de suelos encontrados se tienen arcillas de alta compresibilidad (CH), limos de baja compresibilidad (ML) y limos de alta compresibilidad (MH), muchos de ellos con presencia importante de raíces y materia orgánica, tal como se muestra en la Figura 4.18.

La ciudad de Bogotá y algunas poblaciones aledañas, se encuentra construidas sobre un gran depósito de materiales térreos predominantemente arcillosos, originados a partir de partículas depositadas en zonas inundadas tipo laguna o pantanos que existieron anteriormente en este territorio (Montaña, 2013). Como valores de referencia de estos tipos de suelos es posible encontrar estudios realizados en Bogotá, como el puente de tercer nivel en las inmediaciones de la calle 92 con avenida NQS (Escobar & Moya, 2006), la calle 100 (Durán, 2003), la Escuela Colombiana de Ingeniería (Mera Solarte, 2018), el Parque Cementerio Jardines del Recuerdo en el Norte de la ciudad y las inmediaciones de la pista sur del Aeropuerto el Dorado (Montaña, 2013).

Tabla 4.3 Clasificación por sistema SUCS y granulometría de las muestras estudiadas

N°	Prof. (m)	Humedad (%)	Peso unitario (kN/m ³)	e	% Arena	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS
1	1.30 - 1.50	45,3	16,94	1,28	0	94	32	62	CH
2	1.20 - 1.40	46,4	16,97	1,29	0	98	29	69	CH
3	1.60 - 1.80	59,9	15,43	1,76	2	97	31	66	CH
4	0.80 - 1.00	81,9	13,96	2,42	46	46	40	6	ML
5	1.20 - 1.40	47,4	16,61	1,35	1	96	31	65	CH
6	1.00 - 1.20	61,4	15,72	1,74	1	99	30	69	CH
7	0.80 - 1.00	63,3	15,53	1,78	1	90	31	59	CH
8	0.50 - 0.80	102,4	12,68	3,21	30	129	72	57	MH
9	0.50 - 0.80	81,7	13,45	2,55	21	132	72	60	MH
10	0.50 - 0.80	96,1	13,32	2,87	39	125	59	66	MH
11	0.50 - 0,70	94,6	13,77	2,72	48	122	67	55	MH
12	0.60 - 0.80	106,9	13,41	3,05	47	125	75	50	MH
13	0.40 - 0.60	103,4	13,53	2,98	43	114	68	46	MH
14	0.50 - 0.70	88,7	13,30	2,73	41	120	67	53	MH
15	1.80 - 2.00	68,8	15,29	1,93	1	79	29	50	CH
16	0.50 - 0.70	108,6	13,37	3,16	47	132	64	68	MH
17	0.50 - 0.70	110,9	13,42	3,18	41	97	66	31	MH
18	0.40 - 0.70	84,7	14,55	2,34	49	104	55	49	MH
19	0.40 - 0.70	91,1	14,17	2,57	49	109	58	51	MH

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.18 Muestras utilizadas con presencia importante de raíces y materia orgánica

Fuente: Tomadas por el autor

Al comparar los suelos trabajados en dichas investigaciones con los obtenidos en el presente proyecto, se puede llegar a concluir que los suelos aquí estudiados son típicos de la zona lacustre bogotana, puesto que todos están próximos a la Línea A de la carta de Casagrande (Figura 4.19). El único material que puede llegar a considerarse "atípico" es el limo de baja compresibilidad (ML) obtenido en la exploración 4, esto se puede atribuir a que las muestras presentadas por otras investigaciones no se realizaron en inmediaciones de este lugar, y puede suceder que coincidentalmente los suelos de subrasante del lugar difieren de manera considerable con los valores típicos esperados, o que se puede tratar

de un relleno; no obstante, dado que no se obtuvieron más muestras del lugar no es posible establecerlo con seguridad.

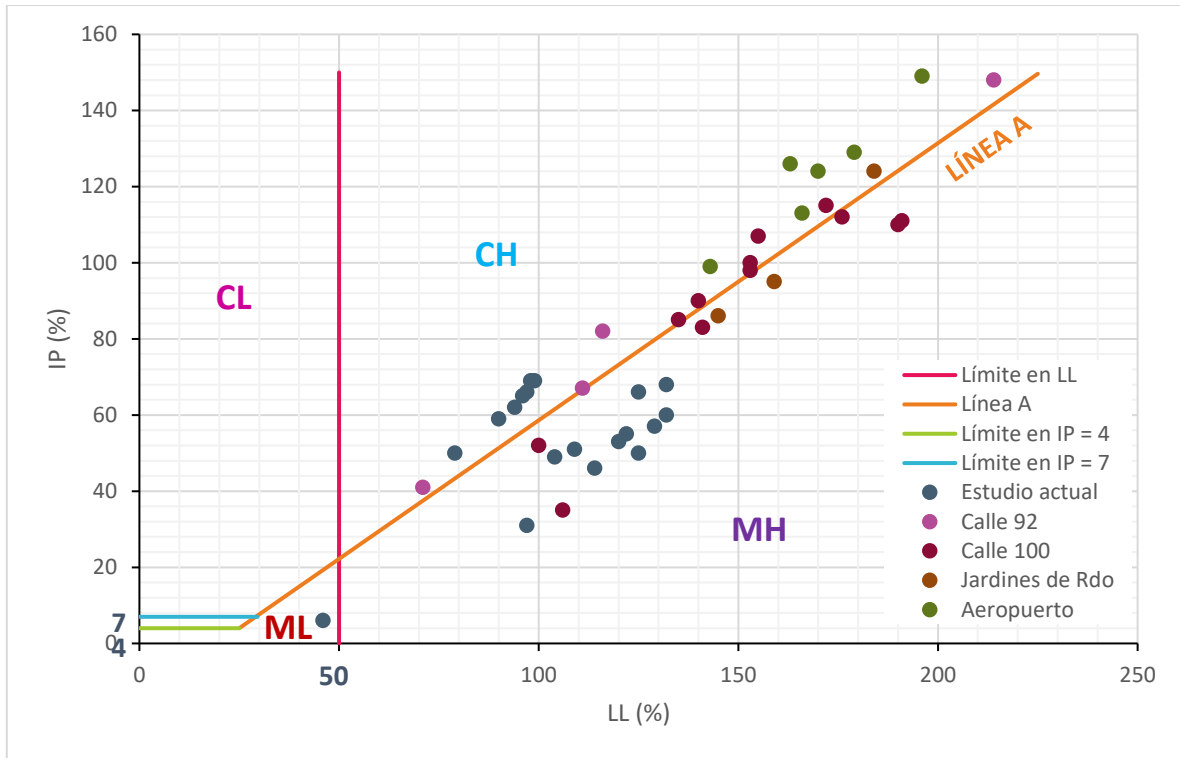


Figura 4.19 Carta de Casagrande con las muestras estudiadas

Fuente: Elaboración propia con información de Durán (2003), Escobar & Moya (2006) & Montaña (2013)

En general se puede decir que los suelos evaluados se caracterizan por tener límites líquidos e índices de plasticidad que no superan el 150% y el 70% respectivamente. Adicionalmente, en el caso de los suelos tipo CH, se presenta un porcentaje elevado de finos (prácticamente su totalidad); y en el caso de los suelos MH y ML, un contenido importante de arenas, pero principalmente compuestos por partículas finas (más del 50%).

Adicionalmente, la humedad de las muestras, de acuerdo con estudios anteriores a las profundidades aquí utilizadas, presentan resultados menores a los que se esperaban; en otras palabras, mientras que a profundidades entre 0.40 a 2.00 metros autores como Durán (2003) reportan valores de humedad entre el 70% y 85%, aquí se tienen valores en algunos casos más bajos de incluso el 45%. No obstante, dicha diferencia se puede atribuir a la temporada de pocas lluvias que se presentó en la época de las primeras exploraciones ejecutadas, ya que al pasar los meses se puede observar que la humedad aumenta de manera importante hasta valores considerados típicos en los suelos bogotanos. También se puede concluir que, en general, los suelos tipo limo presentan humedades mayores a las presentadas en los suelos tipo arcilla.

En cuanto al peso unitario, Mera Solarte (2018) sustenta que los valores típicos en la ciudad se encuentran en un rango entre 13 y 15 kN/m³, lo cual concuerda con los aquí obtenidos; también se puede observar que los suelos tipo limo presentan pesos unitarios menores a los suelos tipo arcilla. También es posible resaltar que algunos valores de peso unitario total corroboran la presencia de materia orgánica detectada con el simple acercamiento visual al material. Por otro lado, los menores pesos unitarios encontrados, concuerdan con las mayores relaciones de vacíos.

Por su parte, en lo que respecta a la relación de vacíos, aunque las muestras tipo limo presentan un valor elevado, típico en los suelos bogotanos, las muestras tipo arcilla presentan valores por debajo de esta referencia, lo cual se puede atribuir a que las arcillas más superficiales de Bogotá presentan una gran sobreconsolidación (Escobar & Moya, 2006; Montaña, 2013).

Adicional a los resultados presentados en la tabla, la gravedad específica (Gs) es relativamente uniforme en todas las muestras y es típica de finos (Entre 2.68 y 2.72); la saturación (S) en todos los casos es elevada y se presenta en un rango relativamente estrecho (entre 86% y 96%), algo de esperarse debido a que el nivel freático en la ciudad está cerca de la superficie. Todo esto siendo típico en los suelos bogotanos (Durán, 2003; Escobar & Moya; 2006 y Montaña, 2013).

4.3. Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2010). *Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C.* Bogotá D.C. Retrieved from <http://www.scg.org.co/wp-content/uploads/DECRETO-523-DE-2010-MICROZONIFICACION-BOGOTA.pdf>
- Alcárcel, F. A., Gómez, J., & Compiladores. (2017). *Mapa Geológico de Colombia 2017. Escala 1:2 000 000.* Bogotá D.C. Retrieved from <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/Geociencias/Paginas/MapaGeologico.aspx>
- Araya, A. A. (2011). *Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements.* Delft University of Technology. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:1d964e6f-e7e5-4d2a-834b-db9b3504745f/datastream/OBJ/download>
- Araya, A. A., Huurman, M., & Molenaar, A. A. A. (2011). Integrating Traditional Characterization Techniques in Mechanistic Pavement Design Approaches. In *Transportation and Development Institute Congress 2011* (pp. 596–606). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41167\(398\)57](https://doi.org/10.1061/41167(398)57)
- Araya, A. A., Huurman, M., Molenaar, A. A. A., & Houben, L. (2012). Investigation of the resilient behavior of granular base materials with simple test apparatus. *Materials and Structures*, 45, 695–705. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9790-1>
- Araya, A. A., Molenaar, A. A. A., & Houben, L. (2010). Characterization of Unbound Granular

- Materials Using Repeated Load CBR and Triaxial Testing. In *GeoShanghai 2010 International Conference* (pp. 355–363). Shanghai.
- Durán G., J. E. (2003). Optimización de un sistema de cimentación placa – pilotes en el depósito lacustre de Bogotá. *III Encuentro Nacional de Ingenieros De Suelos y Estructuras*, 65. Retrieved from http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer_ent/optimizacion_sistema_cimentacion.pdf
- Escobar, G., & Moya, J. (2006). Puente tercer nivel calle 92. *IV Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras*. Bogotá. Retrieved from http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/cimentacion/01_julio_moya_german_escobar.pdf
- Haghighi, H., Arulrajah, A., Mohammadinia, A., & Horpibulsuk, S. (2017). A new approach for determining resilient moduli of marginal pavement base materials using the staged repeated load CBR test method. *Road Materials and Pavement Design*, 19(8), 1848–1867. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1352532>
- IDIGER. (2016). *Proyecto actualización componente de gestión del riesgo para la revisión ordinaria y actualización del plan de ordenamiento territorial Vol. 1*. Bogotá. Retrieved from www.idiger.gov.co
- Mera Solarte, N. J. (2018). *Uso de la Metodología SHANSEP para la predicción de la resistencia la corte no drena en los suelos del campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Retrieved from <https://catalogo.escuelaing.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=21364%0Ahttps://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/771>
- Molenaar, A. A. A. (2007). Characterization of Some Tropical Soils for Road Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1989–2(1), 186–193. <https://doi.org/10.3141/1989-63>
- Molenaar, A. A. A. (2008). Repeated load cbr testing, a simple but effective tool for the characterization of fine soils and unbound materials. In *Transportation Reserach Board TRB 2008, Annual Meeting CD-ROM, No. 08-0516*. Washington, D.C. Retrieved from <https://docplayer.net/46837168-Repeated-load-cbr-testing-a-simple-but-effective-tool-for-the-characterization-of-fine-soils-and-unbound-materials-a-a-a.html>
- Molenaar, A. A. A., Araya, A. A., & Houben, L. (2011). Repeated load cbr testing, a simple but effective tool for the characterization of fine soils and unbound materials. In *10th Conference on asphalt pavements for Southern Africa* (pp. 1–15). KwaZulu Natal, South Africa. Retrieved from http://www.aapaq.org/q/2011st/CAPSA2011/FA4_08_75_1029.pdf
- Montaña, D. (2013). *Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Retrieved from <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/108>
- Nini, R. (2017). Effect of Cyclic Load on California Bearing Ratio of Soaked Clay. In *Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental*

- Engineering* (pp. 1–8). Barcelona. <https://doi.org/10.11159/icgre17.127>
- Ruiz, S. (2019). Protocolo de tesis: Mini CBR-CBR. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sánchez, F., & Campagnoli, S. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras: Guía práctica para lo estudios y diseños*. (Escuela Colombiana de Ingeniería, Ed.) (1ra ed.). Bogotá D.C.
- Sas, W., & Gluchowski, A. (2013a). Application of cyclic cbr test to approximation of subgrade displacement in road pavement. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 12, 51–61.
- Sas, W., & Gluchowski, A. (2013b). Rutting prediction for stabilized soils based on the cyclic CBR test. *Roads and Bridges*, 12, 411–423. <https://doi.org/10.7409/rabdim.013.026>
- Sas, W., Gluchowski, A., Gabrys, K., & Szymanski, A. (2015). Application of cyclic CBR test for the estimation of resilient modulus in the pavement construction. In *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development* (pp. 3747–3752). Institution of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1680/ecsmge.60678>
- Sas, W., Gluchowski, A., & Miturski, M. (2017). Studies on resilient modulus value from cyclic loading tests for cohesive soil. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation*, 49(2), 117–127. <https://doi.org/10.1515/sggw-2017-0010>
- Sas, W., Gluchowski, A., & Szymansky, A. (2012). Determination of the Resilient modulus MR for the lime stabilized clay obtained from the repeated loading CBR tests. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW Land Reclamation*, 44(2), 143–153. <https://doi.org/10.2478/v10060-011-0070-0>
- Sparsha, N., Robinson, R., & Murali, J. (2016). Use of repeated load CBR test to characterize pavement granular materials. In *Functional Pavement Design* (pp. 965–974). Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315643274-106>
- Verschuren, P., & Doorewaard, H. (2010). *Designing a Research Project* (Second). Eleven International Publishing.
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of Pavement Design*. (John Wiley & Sons Inc., Ed.) (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Capítulo 5. Resultados experimentales y análisis

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos de resistencia: CBR, penetrómetro dinámico de cono (PDC), CBR cíclico (cCBR), módulo resiliente (Mr) y, en los casos que fue posible, resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$) (Los formatos de ensayo se encuentran en el Anexo D).

5.1. Resultados ensayos de resistencia al corte

Tal como se mencionó en el numeral 4.1.2.2, el ensayo de PDC se realizó al momento de la toma de muestras de tubo de pared delgada y de CBR inalterado. En aquellas oportunidades en la cuales no se tuvo que profundizar más allá de 1 metro en la exploración, el ensayo se ejecutó a nivel de superficie del terreno; por su parte, en aquellas exploraciones que requirieron excavar mayor profundidad, el ensayo se ejecutó al mismo nivel de la toma de muestras. También cabe resaltar que el PDC reportado del ensayo es el obtenido en el estrato del que fueron tomadas las muestras inalteradas, el resto de los estratos obtenidos no se tuvieron en cuenta para el análisis.

En cuanto al ensayo de CBR, dado que algunas muestras fueron utilizadas para otra investigación, se lograron obtener datos de CBR con y sin inmersión en dichas exploraciones, no obstante, dado que el objetivo es correlacionar estos valores con resultados de otros ensayos de resistencia como el Mr y cCBR, que se ejecutan en muestras sin saturar, los datos aquí utilizados para el análisis son únicamente los obtenidos sin inmersión.

En cuanto a la resistencia no drenada ($\Delta\sigma_f$), esta fue obtenida de las muestras inalteradas de tubo Shelby utilizadas para el ensayo de Mr, ya que la norma exige dicha prueba de corte rápido si la muestra no falla en las 15 secuencias de carga contempladas. Dada la velocidad de aplicación de la carga (1% de la altura de la muestra), es una resistencia no drenada, pero no es confinada, ya que se pide una presión de cámara de 27.6kPa (Numeral 4.1.2.4).

Los resultados de estos tres ensayos de resistencia para las 19 exploraciones y algunas de sus características previamente determinadas (Numeral 4.2) se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Resultados de caracterización física y mecánica de las muestras utilizadas

N°	Prof. (m)	Caracterización y clasificación							Ensayos resistencia al corte			
		Humedad (%)	P. unit. (kN/m ³)	e	% Arena	LL (%)	IP (%)	SUCS	DN* (mm/gol.)	$\Delta\sigma_f$ (kPa)	%CBR natural	%CBR* saturado
1	1.30 - 1.50	45.3	16.94	1.28	0	94	62	CH	163	110.7	2.5	-
2	1.20 - 1.40	46.4	16.97	1.29	0	98	69	CH	184	101.3	2.4	-
3	1.60 - 1.80	59.9	15.43	1.76	2	97	66	CH	203	43.7	1.8	-
4	0.80 - 1.00	81.9	13.96	2.42	46	46	6	ML	-	77.8	4.9	3.4
5	1.20 - 1.40	47.4	16.61	1.35	1	96	65	CH	82	122.1	4.0	-
6	1.00 - 1.20	61.4	15.72	1.74	1	99	69	CH	310	80.8	1.4	1.1
7	0.80 - 1.00	63.3	15.53	1.78	1	90	59	CH	327	58.8	1.7	-
8	0.50 - 0.80	102.4	12.68	3.21	30	129	57	MH	69	118.5	5.0	2.2
9	0.50 - 0.80	81.7	13.45	2.55	21	132	60	MH	100	80.8	3.4	3.3
10	0.50 - 0.80	96.1	13.32	2.87	39	125	66	MH	100	157.1	3.9	3.6
11	0.50 - 0.70	94.6	13.77	2.72	48	122	55	MH	100	158.7	4.0	3.5
12	0.60 - 0.80	106.9	13.41	3.05	47	125	50	MH	44	247.4	2.7	2.6
13	0.40 - 0.60	103.4	13.53	2.98	43	114	46	MH	46	92.4	3.2	2.2
14	0.50 - 0.70	88.7	13.3	2.73	41	120	53	MH	44	182.2	4.2	-
15	1.80 - 2.00	68.8	15.29	1.93	1	79	50	CH	330	48.8	1.7	-
16	0.50 - 0.70	108.6	13.37	3.16	47	132	68	MH	18	-	3.6	1.2
17	0.50 - 0.70	110.9	13.42	3.18	41	97	31	MH	50	-	4.4	3.0
18	0.40 - 0.70	84.7	14.55	2.34	49	104	49	MH	100	92.7	4.5	4.4
19	0.40 - 0.70	91.1	14.17	2.57	49	109	51	MH	50	-	3.6	-

* - indica que no se hizo el ensayo

Fuente: Elaboración propia

A partir de dichos resultados es posible ver que los suelos estudiados son los considerados típicos blandos de la zona lacustre de Bogotá, puesto que el CBR siempre fue máximo del 5%, incluso en los casos donde no se realizó inmersión (Ruiz, 2019). También cabe resaltar que en aquellos ensayos donde fue posible saturar la muestra, no presentó expansión y, como es de esperarse, se generó una reducción en el CBR.

A nivel general, se puede observar que los suelos de todas las exploraciones presentan números dinámicos (DN) considerablemente elevados, lo cual va en concordancia con los bajos porcentajes de CBR obtenidos. Así mismo, cabe resaltar que las muestras de limo presentan DN menores que las arcillas y, por ende, mayores valores de CBR; esto se le puede atribuir a la presencia importante de raíces mencionada anteriormente y al gran porcentaje de arenas que contienen.

Por su parte, el $\Delta\sigma_f$ de las muestras es en general bajo. La muestras en las cuales se presentaron los menores valores fueron aquellas con una presencia importante de raíces, esto se debe a que estas raíces funcionan con superficies potenciales de falla de estos suelos. Adicionalmente, respecto a la forma de falla, aquellas con poca presencia de raíces fallaron por deformación (Deformación unitaria axial del 5%), mientras que aquellas con raíces fallaron antes de dicha deformación, en el sentido de las raíces que contenían (Figura 5.1).



Figura 5.1 Muestras luego de la prueba rápida de corte del ensayo de Mr

Fuente: Tomadas por el autor

Es posible encontrar en la literatura la consistencia de los suelos en función de la resistencia al corte no drenada (q_u) (Tabla 5.2), al seguir dicha clasificación se podría llegar a la conclusión que las muestras de este estudio presentan una consistencia entre media y muy firme. No obstante, dicha clasificación está en función de una prueba no confinada (Sin presión de cámara), razón por la cual es muy probable que los suelos sean de consistencia blanda y muy blanda y que, gracias a la presión de cámara que se exige en la prueba de Mr, presenten una mayor resistencia.

Tabla 5.2 Consistencia de los suelos en función de resultados de compresión inconfiada

Consistencia del suelo	Resistencia al corte no drenado Su (kPa)
Muy blando	< 12.5
Blando	12.5 - 25
Mediano	25 - 50
Firme	50 -100
Muy firme	100 - 200
Dura	>200

Fuente: Tomado de Montaña (2013)

5.1.1. Relación entre CBR sin saturar y DN

Dado que 14 de las 19 muestras fueron obtenidas de dos zonas en particular (Escuela Colombiana de Ingeniería – ECI y lote de San José de Bavaria – SJB), se consideró adecuado intentar determinar correlaciones entre el CBR sin saturar y DN con los 19 puntos (Suelos CH, MH y ML), y de manera individual establecer correlaciones de las 7 muestras de la ECI (Suelos CH) y de las 7 muestras del lote de San José de Bavaria (Suelos MH), tal como se observa en la gráficas de la Figura 5.2.

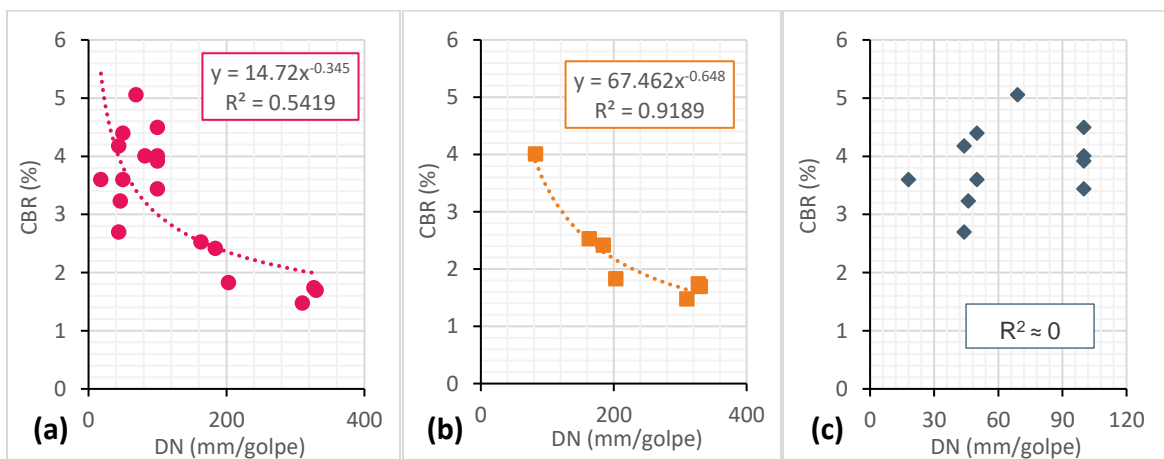


Figura 5.2 Correlaciones CBR sin saturar y DN de (a) Todas las muestras (●), (b) Muestras ECI (■) y (c) Muestras SJB (◆)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo presentado en el Capítulo 2, existe una relación inversamente proporcional entre el CBR y el DN, con una expresión de la forma:

$$CBR = A * DN^{-B}$$

Ecuación 5-1

Al analizar este comportamiento en los tres escenarios presentados en la Figura 5.2, se puede observar, de acuerdo con el criterio de Rehman et al. (2017) presentado en la Tabla 5.3, que: (i) Utilizando todos los puntos existe una correlación aceptable ($R^2=0.5419$), (ii) Haciendo uso únicamente de los resultados de las muestras de la ECI se tiene un ajuste excelente ($R^2=0.9189$) y, (iii) Utilizando únicamente los datos de SJB no existe correlación alguna debido a la dispersión de los puntos.

Tabla 5.3 Criterio de buen ajuste estadístico

Criteria	R^2
Excellent	> 0.9
Good	0.7-0.89
Fair	0.4-0.69
Poor	0.2-0.39
Very Poor	< 0.2

Fuente: Tomado de Rehman et al. (2017)

Es por lo anterior que se puede presentar la Ecuación 5-2 como una correlación entre CBR sin saturar (%) y DN (mm/golpe) para las arcillas de alta compresibilidad (CH) de los suelos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

$$CBR(\%) = 67.462 * DN(mm/golpe)^{-0.648} \rightarrow R^2 = 0.9189$$

Ecuación 5-2

Con el fin de validar la expresión determinada en la investigación con otras presentadas para suelos colombianos en la literatura (INVIAS, 2013; Perez et al., 2013; Campagnoli, 2014 & Florez et al., 2016), en la Figura 5.3 se presenta gráficamente todas las ecuaciones, únicamente en el rango entre 0% y 5% de CBR, puesto que este es el rango típico de los suelos blandos de subrasante estudiados. Es posible ver que existen variaciones entre las correlaciones, esto se debe especialmente a que los suelos de subrasante en el país no son iguales, es posible encontrar suelos tipo CH, CL, MH, ML y CL-ML, en diferentes condiciones de humedad, densidades, profundidades, entre otras características, lo cual hace que el comportamiento mecánico de los suelos sea único para cada material.

Al comprar las correlaciones, es posible observar que a nivel general la mayor diferencia entre las ecuaciones se presenta cuando el DN es grande, es decir, cuando los CBR son bajos. Además, es posible decir que la ecuación obtenida en esta investigación es la que da como resultado valores de CBR más elevados, en especial cuando el DN es elevado. Este podría dar como resultado un subdimensionamiento de una estructura de pavimento, de no utilizarse con criterio las expresiones propuestas.

También es posible observar a partir de la gráfica que las correlaciones obtenidas con suelos de baja compresibilidad son aquellas que dan como resultado los valores de CBR más bajos (Florez et al., 2016); y se podría llegar a decir que los suelos utilizados para

obtener la expresión propuesta por el MOPT son relativamente similares a los utilizados por Florez et al. (2016), caso contrario a lo presentado por el INP.

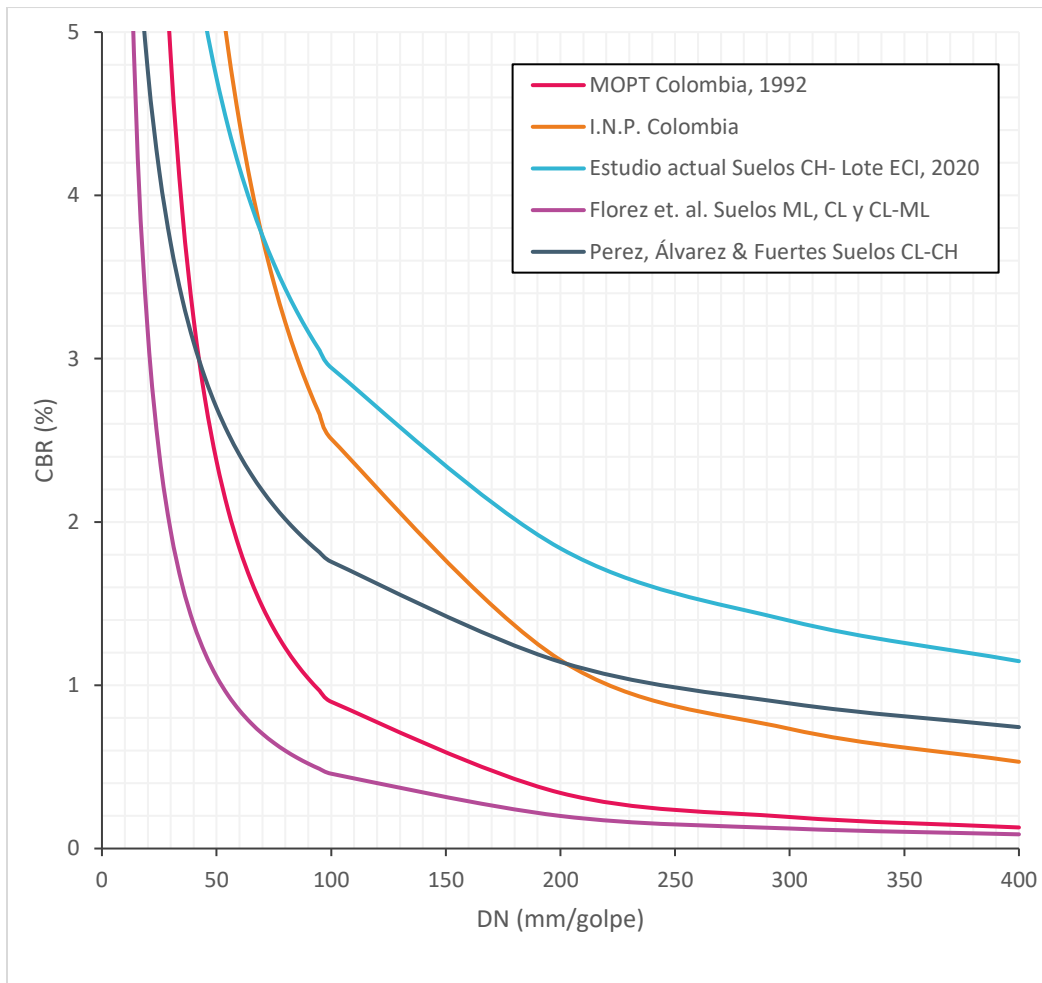


Figura 5.3 Comparación de correlaciones encontradas en la literatura con la obtenida en la investigación

Fuente: Elaboración propia a partir de la información de INVIAS (2013), Perez et al. (2013), Campagnoli (2014) y Florez et al. (2016)

Todo lo anteriormente presentado demuestra nuevamente que cada una de las correlaciones aquí comparadas fueron obtenidas en condiciones muy particulares y que la selección de una correlación ajena debe ser una decisión tomada con precaución y criterio.

5.1.2. Relación entre CBR sin saturar y resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$)

Al igual que en el numeral anterior, se buscó establecer correlaciones a partir de todos los puntos y de manera individual para cada uno de los dos lotes principales utilizados, tal como se presenta en las gráficas de la Figura 5.4.

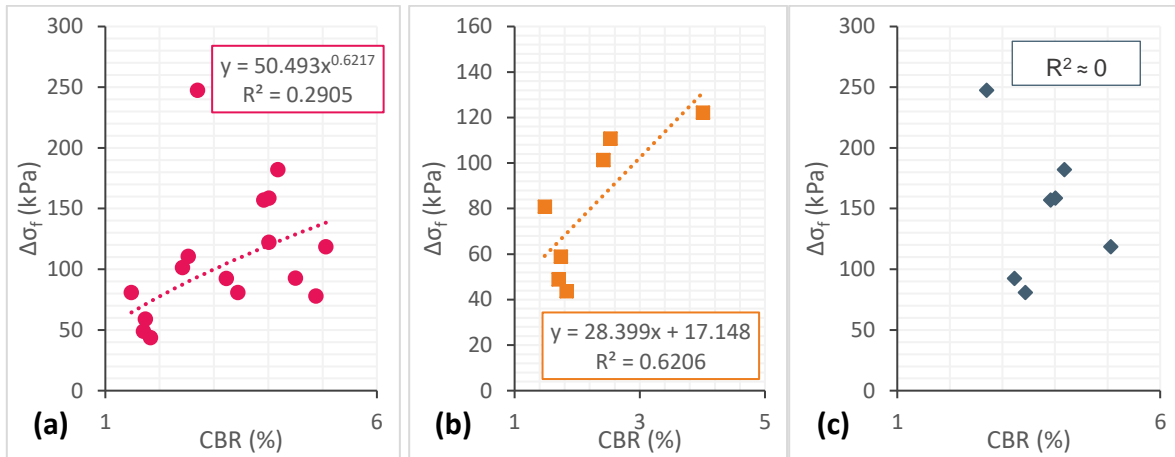


Figura 5.4 Correlaciones CBR sin saturar y $(\Delta\sigma_f)$ de (a) Todas las muestras (●), (b) Muestras ECI (■) y (c) Muestras SJB (◆)

Fuente: Elaboración propia

A partir de las gráficas anteriores, es posible ver que al analizar todas las 19 muestras y de manera individual el SJB, no es posible establecer una correlación al menos aceptable entre las variables ($R^2 < 0.4$); por otra parte, al analizar los resultados de las muestras obtenidas en la ECI, se cuenta con una correlación aceptable (Ecuación 5-3). No obstante lo anterior, se puede decir que, a nivel general, aunque fue posible obtener una correlación aceptable, la dispersión de los datos es relativamente alta.

$$\Delta\sigma_f(kPa) = 28.399 * CBR(\%) + 17.148 \quad \rightarrow \quad R^2 = 0.6206$$

Ecuación 5-3

5.1.3. Relación entre DN y resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$)

Al igual que en los numerales anteriores, en la Figura 5.5 se presentan las gráficas que correlacionan las dos variables de estudio en los tres escenarios establecidos.

Como es de esperarse, en todos los casos existe una relación inversamente proporcional entre las variables, es decir, entre menor es la resistencia al corte no drenada, mayor es el número dinámico. No obstante, es posible ver que la correlación es demasiado baja en el caso de las muestras del lote SJB ($R^2 < 0.4$); mientras que en el caso del lote de la ECI y utilizando los 19 puntos de estudio, fue posible obtener correlaciones aceptables ($0.4 < R^2 < 0.69$); las correlaciones de estas dos últimas se presentan en la Ecuación 5-4 y en la Ecuación 5-5.

$$\Delta\sigma_f(kPa) = 1156.49 * DN(mm/golpe)^{-0.511} \quad \rightarrow \quad R^2 = 0.5600$$

Ecuación 5-4

$$\Delta\sigma_f(kPa) = -0.2431 * DN(mm/golpe) + 136.41 \quad \rightarrow \quad R^2 = 0.5516$$

Ecuación 5-5

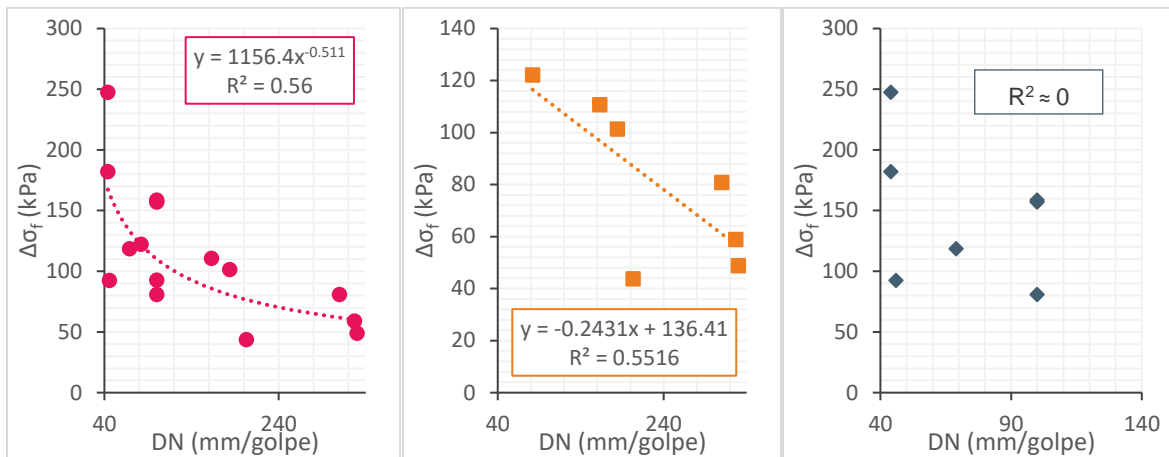


Figura 5.5 Correlaciones DN y resistencia al corte no drenada ($\Delta\sigma_f$) de (a) Todas las muestras (●), (b) Muestras ECI (■) y (c) Muestras SJB (◆)

Fuente: Elaboración propia

5.2. Resultados ensayo Mr

Los valores de Mr de las 19 exploraciones para los diferentes niveles de esfuerzo establecidos en la norma (Tabla 2.4), durante las 15 secuencias de carga, se presentan en la Tabla 5.4. De dicha tabla se puede establecer que los valores de Mr para los suelos de subrasante estudiados varían entre 15.2 y 87.8MPa; en caso particular de los suelos CH los módulos varían entre 20.8 y 87.8MPa y en los suelos MH/ML la variación está entre 15.2 y 59.5MPa. Adicionalmente, es posible decir que en promedio el módulo de los suelos es 35.9MPa con una desviación estándar de 12.1MPa, específicamente los suelos CH en promedio presentan un módulo de 43.3MPa con una desviación de 14.6MPa y los suelos MH/ML un promedio de 31.6MPa con una desviación de 7.7MPa.

Tabla 5.4 Mr (en MPa) para diferentes condiciones de esfuerzos de las 19 exploraciones realizadas

Secuencia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	SUCS	
σ_d (kPa)*	12.4	24.8	37.3	49.7	62.0	12.4	24.8	37.3	49.7	62.0	12.4	24.8	37.3	49.7	62.0		
σ_3 (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		
Exploración	1	62.1	55.6	47.3	42.9	37.4	53.1	48.0	45.9	37.6	37.5	57.0	52.9	48.9	43.0	39.5	CH
	2	87.3	67.1	52.4	41.6	43.5	87.8	63.8	51.3	41.8	39.9	72.1	56.4	47.2	36.8	38.7	CH
	3	35.9	27.9	24.3	24.7	21.9	35.1	29.4	26.2	20.8	22.6	36.3	28.3	25.4	21.6	22.5	CH
	4	53.8	36.6	36.7	34.0	25.7	45.5	33.6	33.3	30.5	29.7	40.9	33.9	29.2	23.8	20.4	ML
	5	83.5	75.8	56.6	56.2	53.3	76.3	66.2	55.0	51.7	51.6	68.0	56.0	49.3	43.2	45.4	CH
	6	64.9	48.9	42.0	38.8	36.0	54.8	51.9	47.3	42.8	39.5	55.0	48.8	47.3	37.6	32.7	CH
	7	48.6	44.4	36.2	33.5	30.2	48.6	38.2	33.1	30.2	30.7	43.9	40.0	36.8	32.5	27.9	CH
	8	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
	9	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
	10	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

Continúa la tabla

Exploración	11	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
	12	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
	13	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
	14	52.5	44.0	43.7	40.2	36.6	48.4	42.1	38.2	35.6	30.5	45.5	38.2	36.0	30.1	28.5	MH
	15	38.0	32.7	27.5	28.9	26.4	36.9	29.8	31.4	27.6	28.1	47.6	37.3	30.6	26.8	29.3	CH
	16	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
	17	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
	18	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
	19	29.1	27.5	26.6	22.7	21.9	28.4	27.5	26.6	26.3	22.3	28.9	28.2	27.3	24.8	21.0	MH

*Los valores de esfuerzo presentados aquí son los exigidos por la norma, los cuales difieren un poco de los reales desarrollados por la máquina triaxial al momento del ensayo, para ver los esfuerzo reales dirigirse al Anexo D

Fuente: Elaboración propia

Aunque son muchas las variables que influyen en el valor de M_r en los suelos, una de las razones por las cuales las muestras limosas presentaron en general un rango menor de módulo, es debido a que la presencia de raíces en estas muestras fue mucho mayor que en las muestras tipo arcilla. No obstante, estas muestras limosas son más uniformes en su valor de módulo, puesto que su desviación estándar es menor (7.7MPa en comparación con 14.6MPa de las arcillas).

5.2.1. Ecuaciones constitutivas

Tal como se presentó en la revisión de la literatura, existe una gran variedad de expresiones potencialmente útiles para suelos blandos de subrasante que definen el comportamiento del M_r . Por un lado, autores como Li & Selig (1994), Garnica et al. (2001), Elias et al. (2004), Rahim (2005), Kim & Siddiki (2006) y Rondón et al. (2012), resaltan la influencia del esfuerzo desviador en el M_r de suelos finos. Por otro lado, de acuerdo con Witczak (2003), es importante que dicha ecuación presente ciertas características para ser más precisa: (i) Dado que en todos los materiales, tanto finos como granulares, el módulo resiliente es función tanto del esfuerzo bulk como del desviador en alguna medida, ambos parámetros deberían estar presentes, (ii) Generalmente los modelos log-log presentan mejores correlaciones que los modelos semi-log, y (iii) Las ecuaciones normalizadas a la presión atmosférica presentan la ventaja de que las constantes determinadas son adimensionales.

A partir de las afirmaciones anteriores, se consideró importante, como primera medida, utilizar la expresión presentada por Moossazadeh & Witczak (1981), la cual es conocida como el *modelo* $k - \sigma_d$, en la cual se usa el esfuerzo desviador como único atributo del modelo, y las constantes experimentales son adimensionales:

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$$

Ecuación 5-6

Donde M_r es el módulo resiliente, P_a es la presión atmosférica (102kPa en este caso) y σ_d el esfuerzo desviador.

Adicionalmente, dado que el esfuerzo bulk no se tiene en cuenta en la expresión anterior y se recomienda usarlo, la segunda opción utilizada fue la Ecuación 5-7, la cual se conoce como el *Modelo Universal*, propuesta por la MEPDG en el 2002 (Witczak, 2003; Titi & English, 2011).

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$$

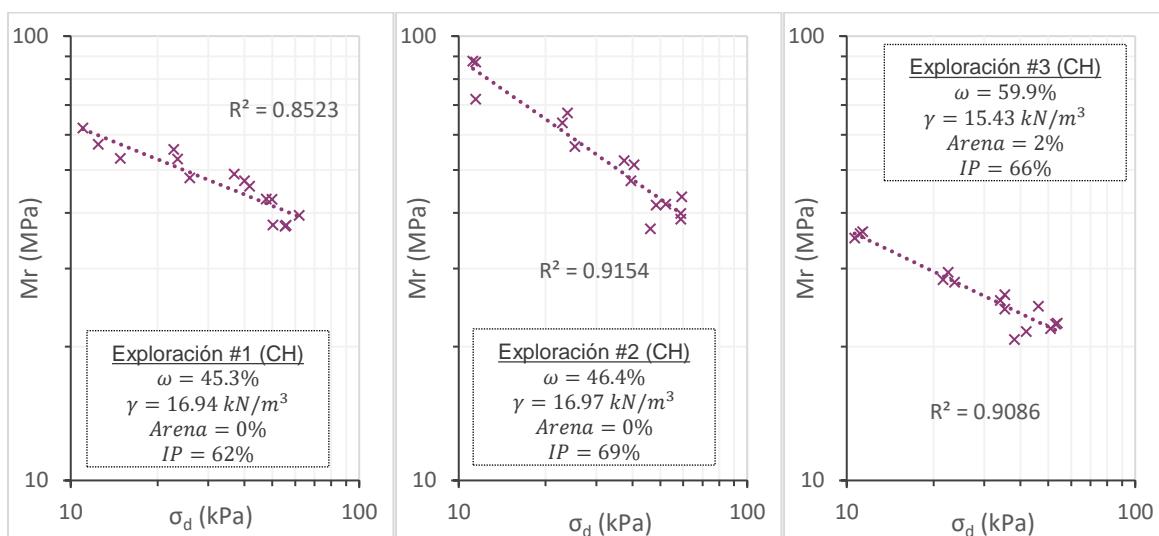
Ecuación 5-7

Donde M_r es el módulo resiliente, P_a es la presión atmosférica (102kPa en este caso), θ el esfuerzo bulk y τ_{oct} el cortante octaédrico.

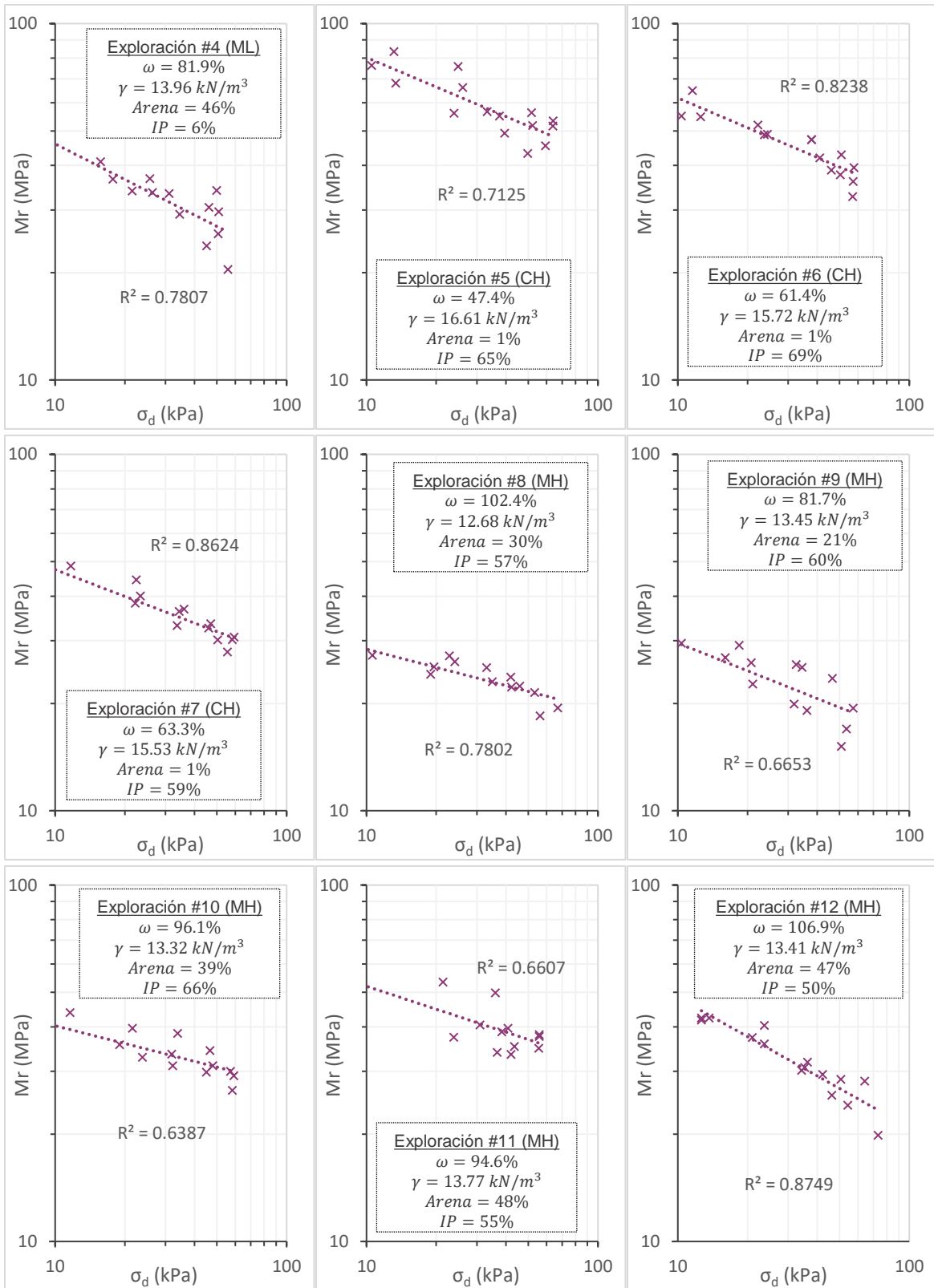
5.2.1.1. Modelo $k - \sigma_d$

En las gráficas mostradas a continuación (Figura 5.6) se presenta el comportamiento del M_r frente al esfuerzo desviador (σ_d) para todas las muestras evaluadas en la investigación. En general, es posible observar la dependencia de este módulo frente a esta variable (En la mayoría de los casos $R^2 > 0.7$), independientemente de cambios en las diferentes características del suelo, como lo son la humedad, el peso unitario, la granulometría y la plasticidad.

Dado que σ_d es el único a tributo en el *modelo $k - \sigma_d$* (Ecuación 5-6), estas gráficas permiten demostrar que el uso de esta expresión para analizar el M_r es adecuado en este caso.



Continúa la figura



Continúa la figura

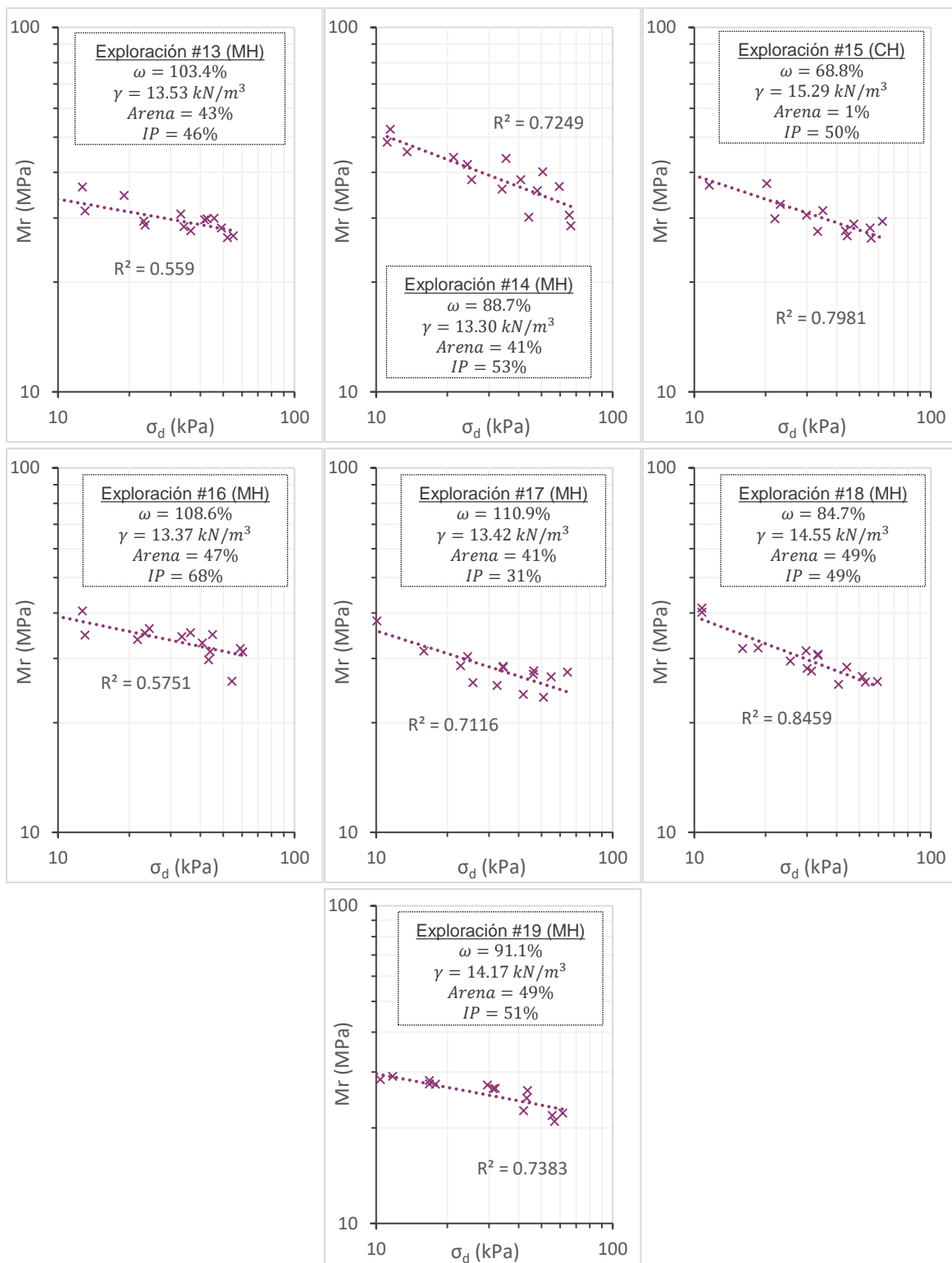
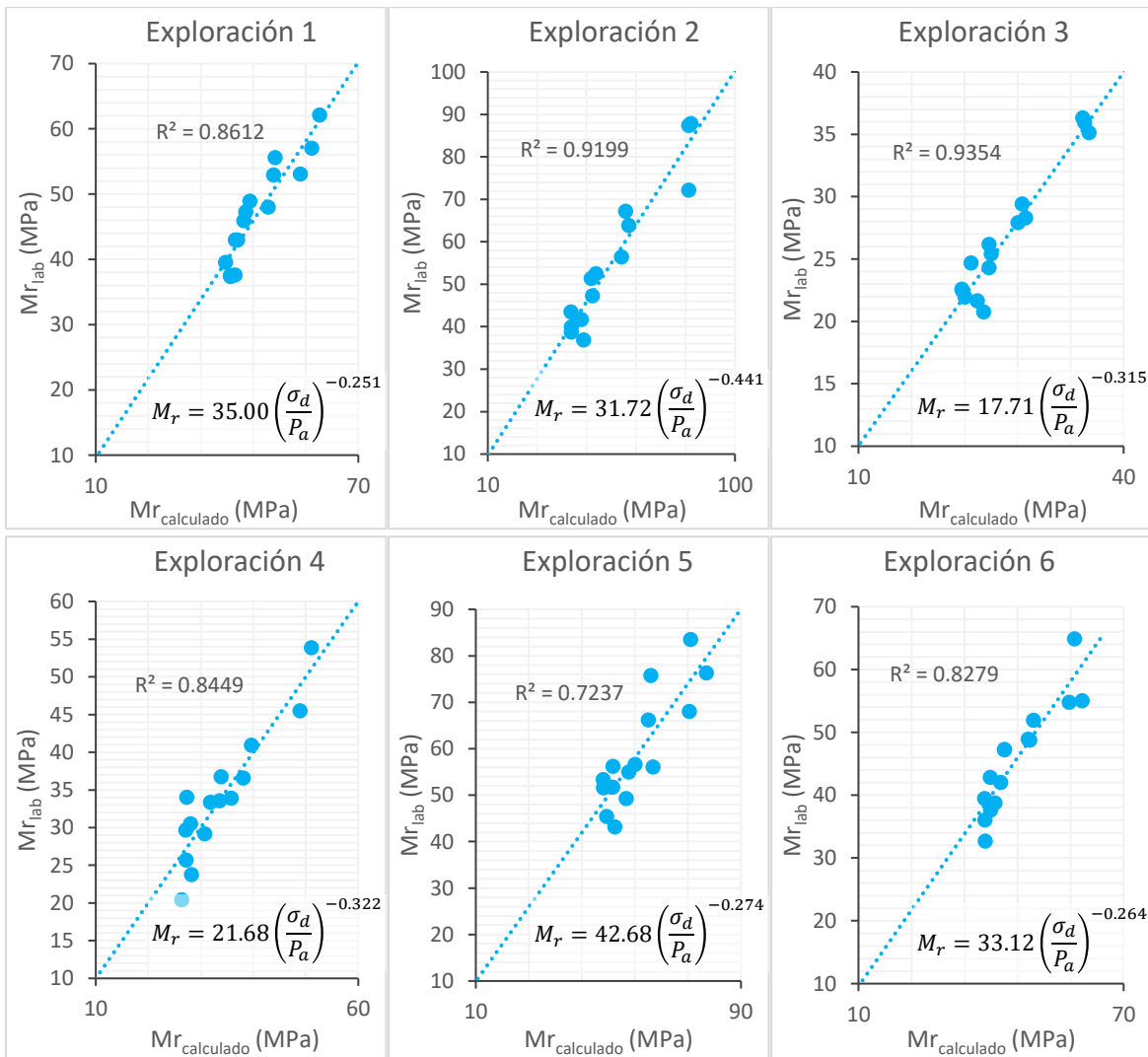


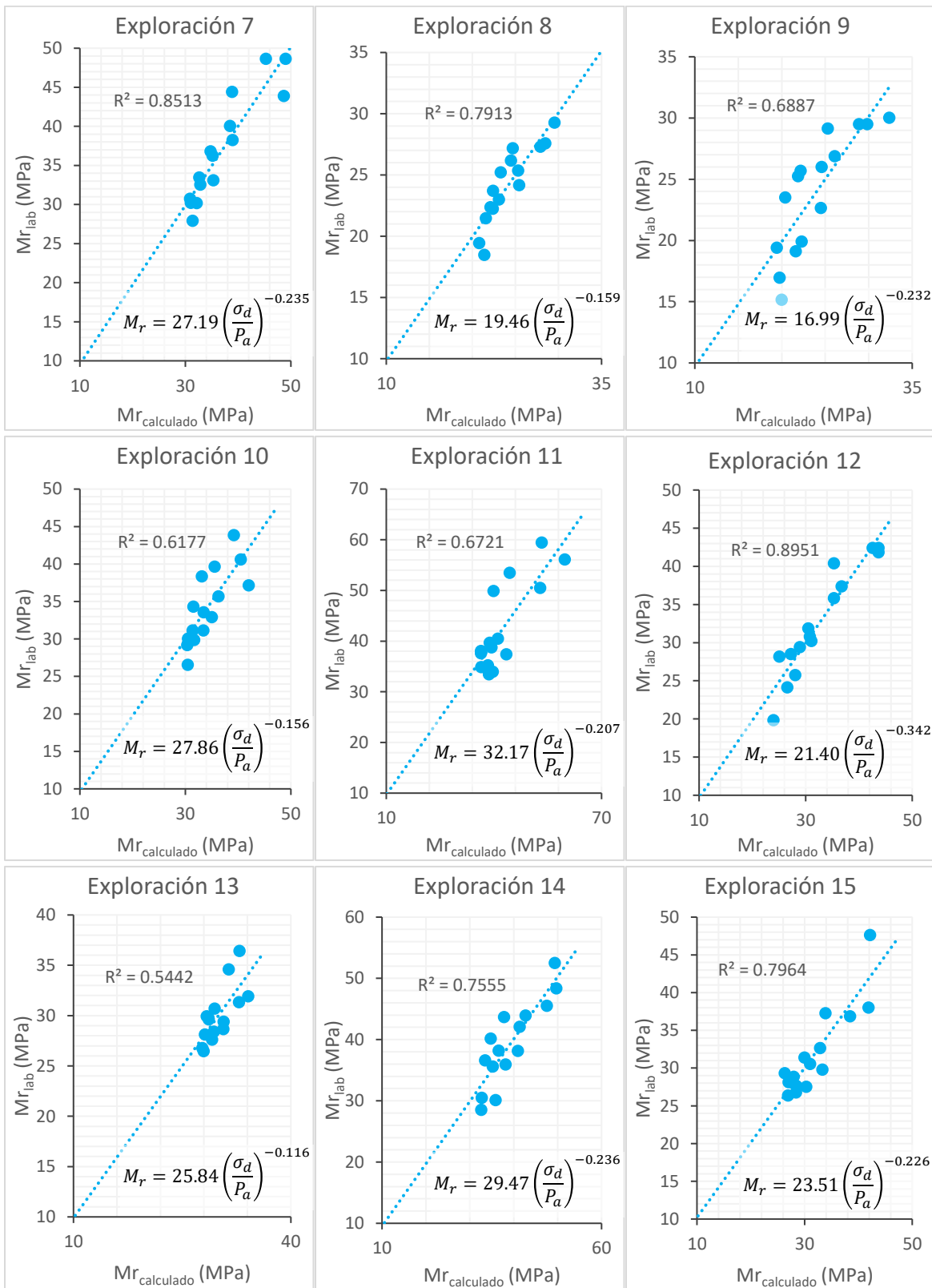
Figura 5.6 Resultados individuales de M_r Vs σ_d para todas las 19 muestras de estudio

Fuente: Elaboración propia

Una vez demostrado que el *modelo* $k - \sigma_d$ es adecuado para analizar el comportamiento del M_r de los suelos de subrasante estudiados, es posible obtener los valores de las constantes k_1 y k_2 presentes en dicho modelo a partir de un análisis estadístico y la aplicación de la metodología de mínima diferencias cuadradas. En la Tabla 5.5 se presenta un resumen de los valores obtenidos para dichas constantes experimentales, así como ajuste de cada uno de estos modelos (R^2), al comprar los valores de M_r obtenidos en el laboratorio respecto a los calculados con el modelo (Gráficas en la Figura 5.7).



Continúa la figura



Continúa la figura

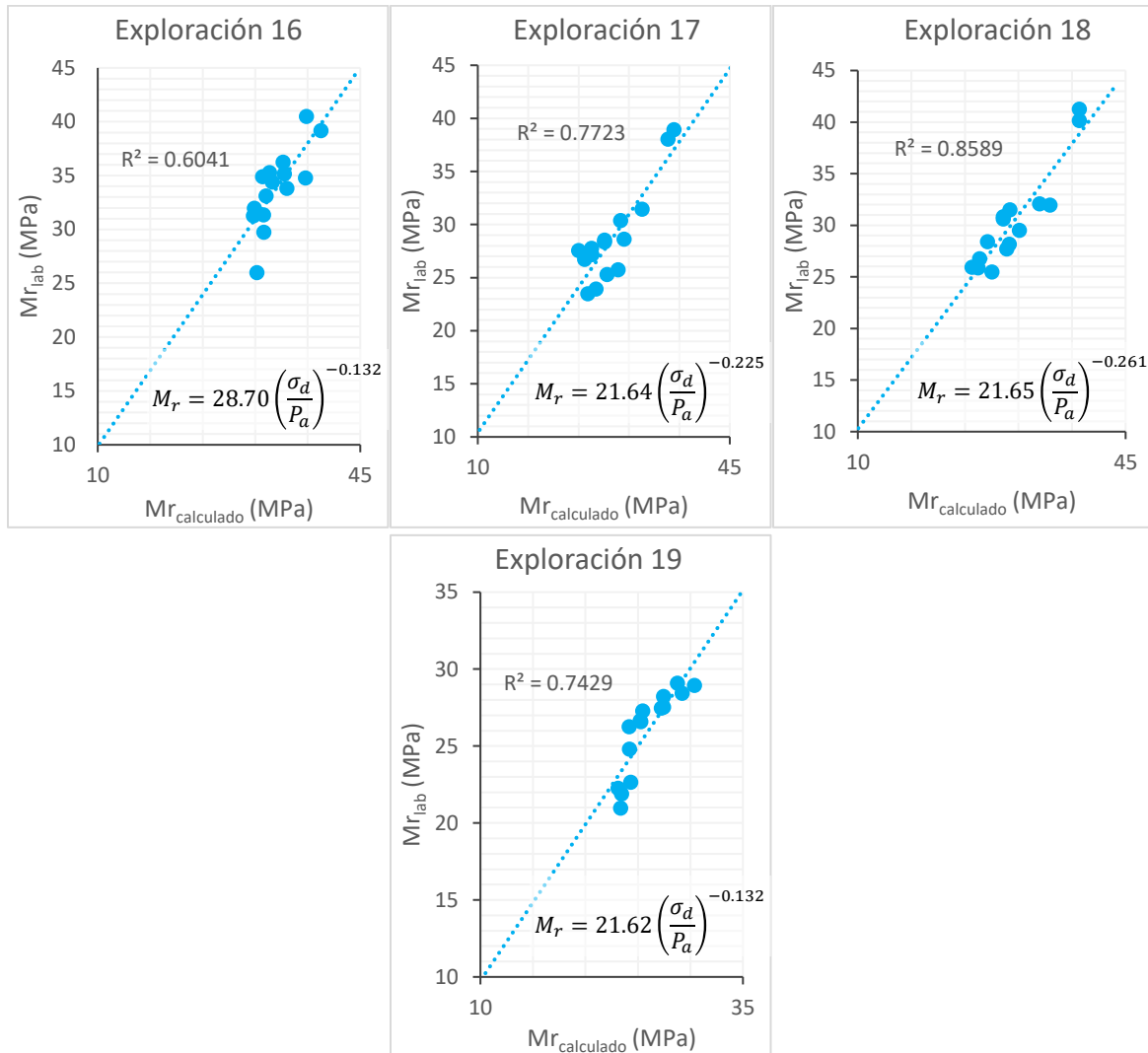


Figura 5.7 Comparación Mr obtenido en el laboratorio Vs Mr calculado mediante el modelo $k - \sigma_d$ para todas las 19 muestras de estudio

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 5.5 y de la Figura 5.7, es posible observar que los valores de k_1 son mayores a la unidad y los valores de k_2 son negativos, lo cual cumple con las restricciones presentadas por el modelo en la literatura y corrobora la idea de que el Mr de los suelos disminuye a medida que el esfuerzo desviador aplicado aumenta (Garnica et al., 2001; Witczak, 2003; Elias et al., 2004; Rahim, 2005).

Adicionalmente, de la tabla también es posible establecer que los valores de k_1 varían entre 16.99 y 42.68 y de la constante k_2 entre -0.441 y -0.116. Si se analizan de manera independiente los arcillas y los limos, las primeras presentan valores de k_1 entre 17.71 y 42.68, y de k_2 entre -0.441 y -0.226; mientras que para los segundos k_1 varía entre 16.99 y

32.17, y k_2 entre -0.342 y -0.116. Lo cual indica que, aunque ambos esta influenciados de manera importante por el esfuerzo desviador, dicha influencia es mayor en las arcillas.

Tabla 5.5 Valor constantes experimentales modelo $k - \sigma_d$ ensayo M_r

Exploración	SUCS	k_1	k_2	R^2
1	CH	35.00	-0.251	0.861
2	CH	31.72	-0.441	0.920
3	CH	17.71	-0.315	0.935
4	ML	21.68	-0.322	0.845
5	CH	42.68	-0.274	0.724
6	CH	33.12	-0.264	0.828
7	CH	27.19	-0.235	0.851
8	MH	19.46	-0.159	0.791
9	MH	16.99	-0.232	0.689
10	MH	27.86	-0.156	0.618
11	MH	32.17	-0.207	0.672
12	MH	21.40	-0.342	0.895
13	MH	25.84	-0.116	0.544
14	MH	29.47	-0.236	0.756
15	CH	23.51	-0.226	0.796
16	MH	28.70	-0.132	0.604
17	MH	21.64	-0.225	0.772
18	MH	21.65	-0.261	0.859
19	MH	21.62	-0.132	0.743

Fuente: Elaboración propia

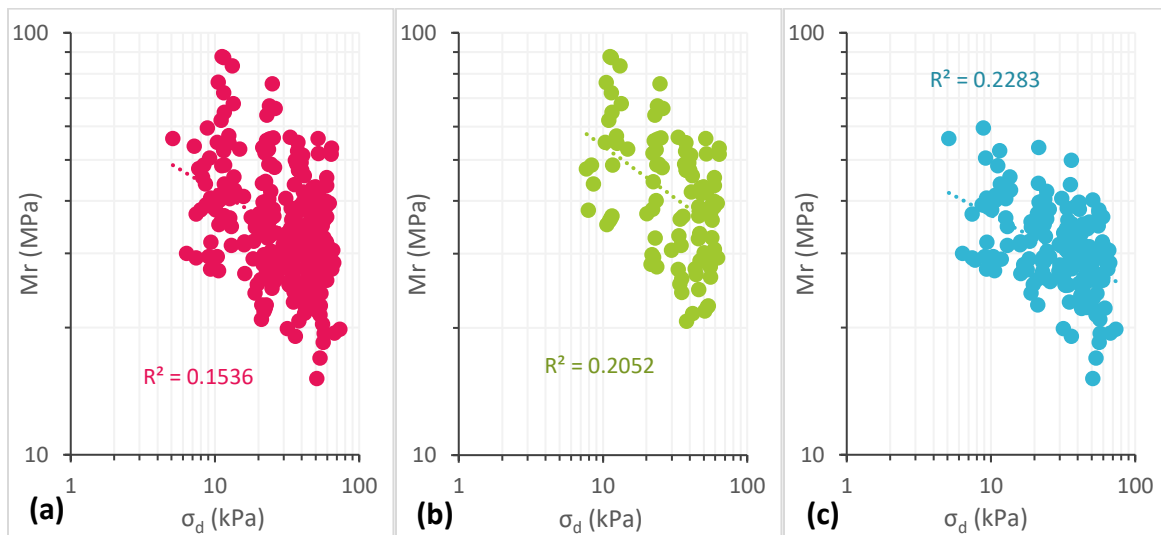


Figura 5.8 Resultados en conjunto de M_r Vs σ_d para todas las 19 muestras de estudio: (a) Todas las muestras, (b) Muestras arcilla y (c) Muestras limo

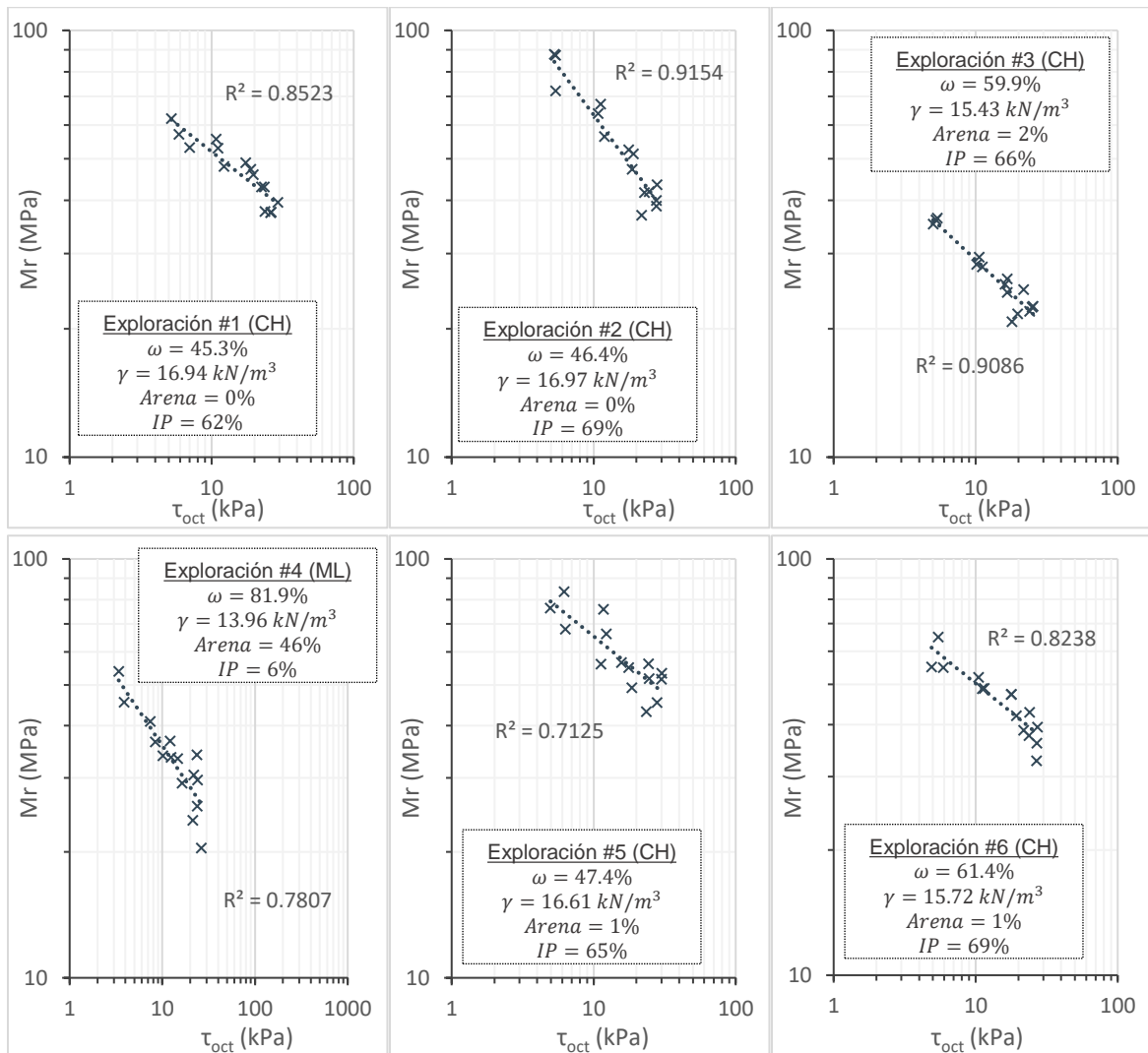
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se buscó establecer un modelo constitutivo único para los suelos de subrasante de la ciudad, no obstante, los resultados no fueron favorables, dado el bajo nivel de

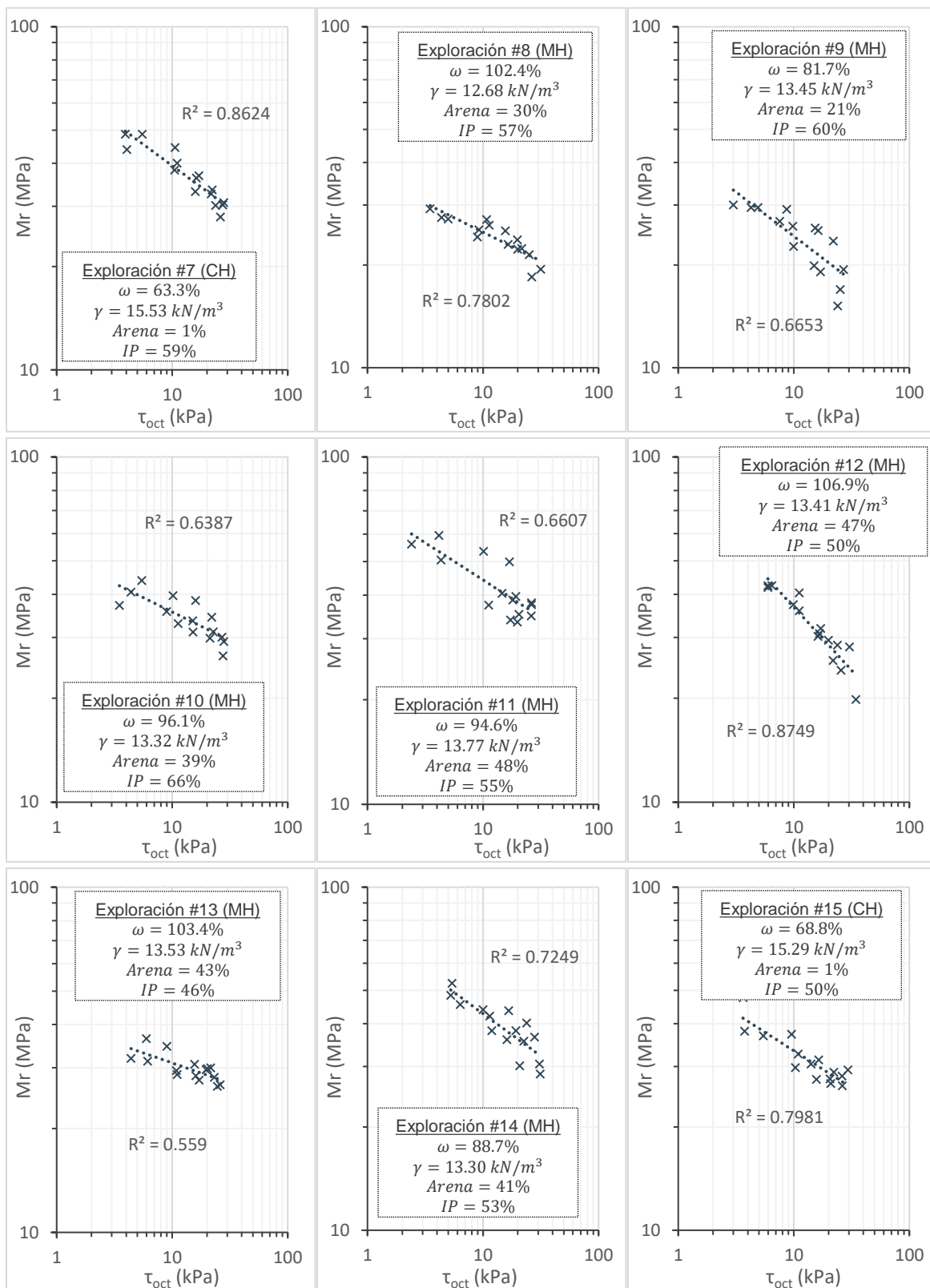
correlación (R^2) entre los valores de M_r y σ_d cuando son graficados en conjunto (Figura 5.8a). Esto se da como resultado de la variabilidad en las propiedades de los suelos estudiados. De igual manera se intentó establecer una ecuación independiente para los limos y las arcillas, pero la conclusión fue la misma (Figura 5.8b y Figura 5.8c).

5.2.1.2. Modelo Universal

En las gráficas mostradas a continuación (Figura 5.9) se presenta el comportamiento del M_r frente al cortante octaédrico (τ_{oct}) para todas las muestras utilizadas en la investigación. En general, es posible observar la dependencia de este módulo frente a esta variable (En la mayoría de los casos $R^2 > 0.7$), independientemente de cambios en las diferentes características del suelo, como lo son la humedad, el peso unitario, la granulometría y la plasticidad.



Continúa la figura



Continúa la figura

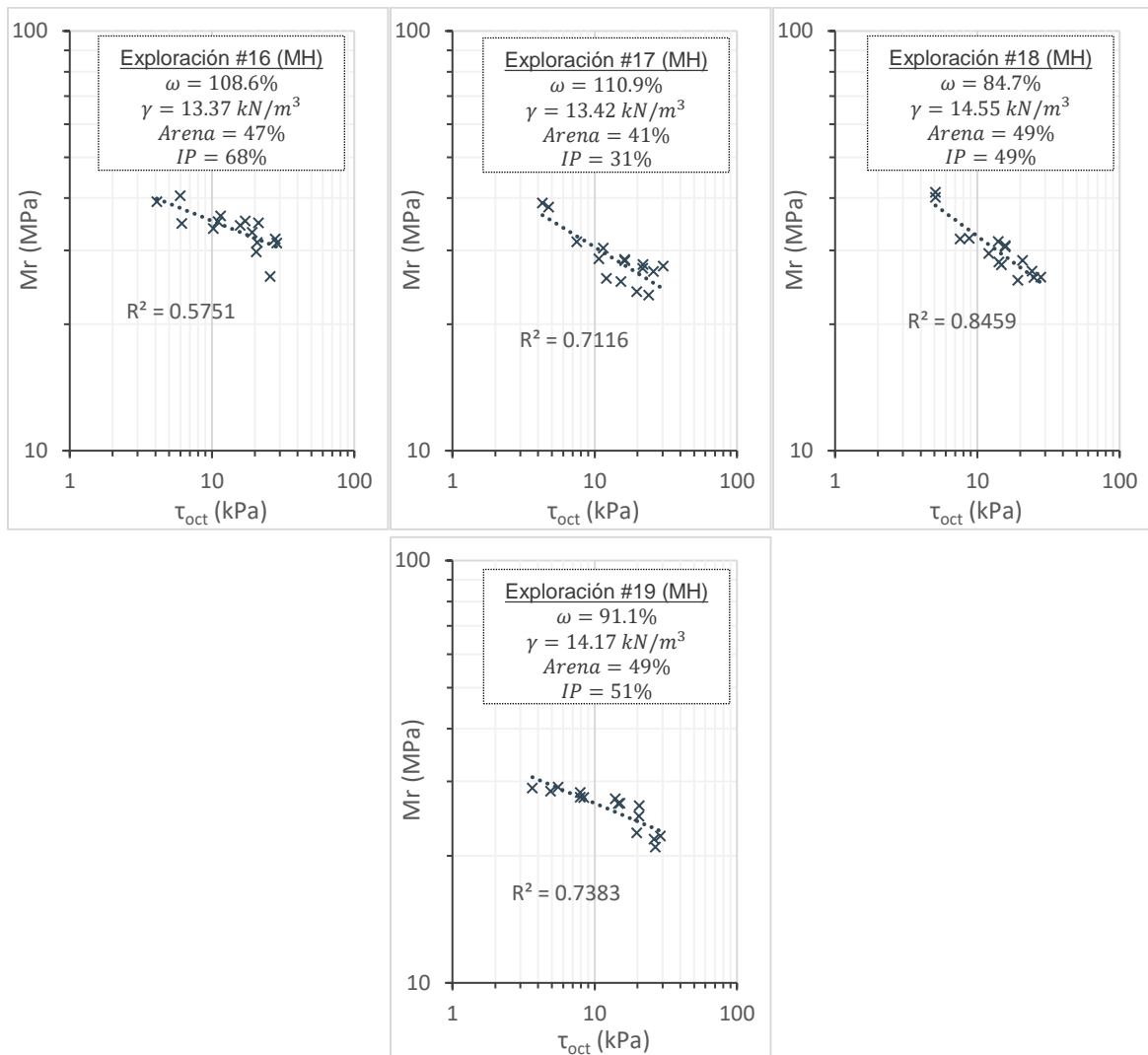


Figura 5.9 Resultados individuales de M_r Vs τ_{oct} para todas las 19 muestras de estudio

Fuente: Elaboración propia

Dado que τ_{oct} es una de las dos variables del *modelo universal* (Ecuación 5-7), estas gráficas demuestran que el uso de esta expresión para analizar el M_r es adecuado en este caso.

En la Tabla 5.6 se presentan los valores de las constantes experimentales k_1 , k_2 y k_3 del presente modelo, obtenidas mediante un análisis estadístico y la aplicación de la metodología de mínima diferencias cuadradas; adicional, en dicha tabla también se presentan los valores R^2 , al comprar los valores de M_r obtenidos en el laboratorio respecto a los calculados con el modelo (Gráficas en la Figura 5.10).

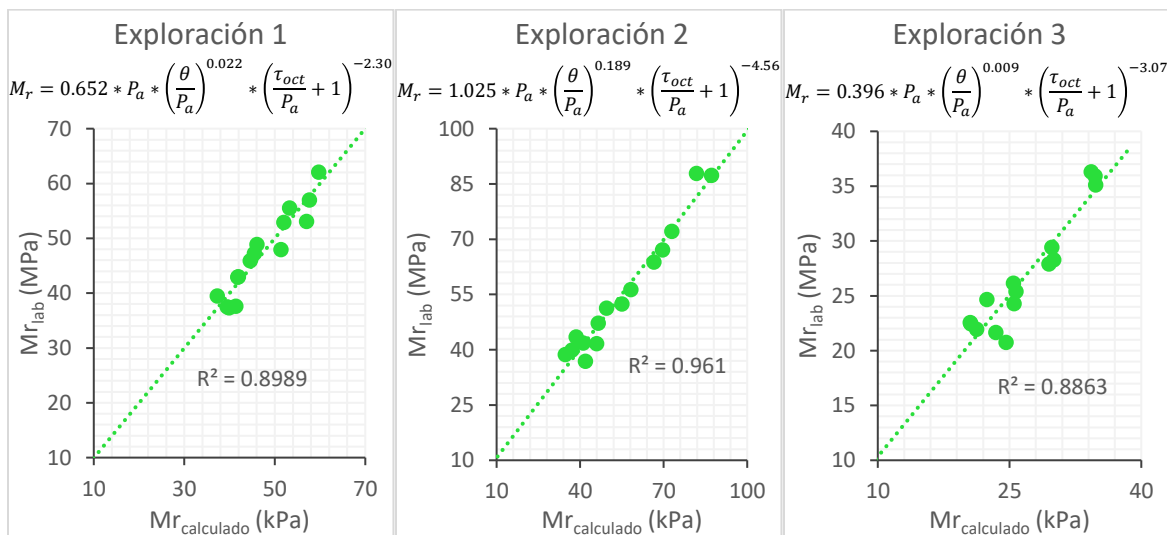
De la Tabla 5.6 se puede inferir que, en general, los valores de k_1 y k_2 son, en valor absoluto, menores a la unidad; mientras que el valor de k_3 es siempre negativo, indicativo de la disminución del valor de módulo cuanto el cortante octaédrico incrementa. También cabe

resaltar que, según la teoría, el valor de k_2 debería ser siempre positivo, en otras palabras, que las muestras incrementan su módulo a medida que el nivel de confinamiento también lo hace, no obstante, es posible ver que dicho comportamiento no se cumple en algunas exploraciones (12, 15 y 19); sin embargo, estos valores de constantes dan cercanos a cero.

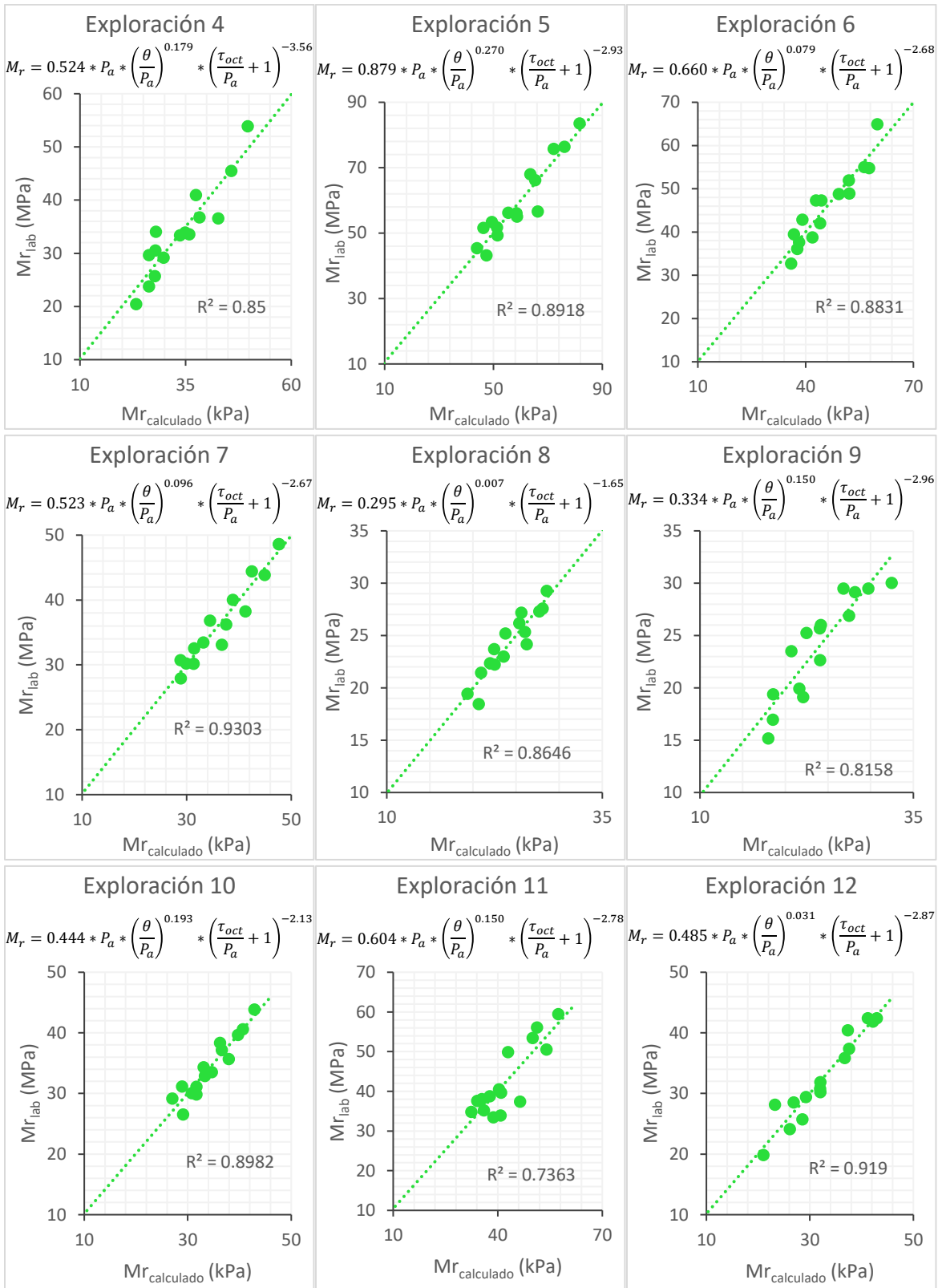
Tabla 5.6 Valor constantes experimentales modelo universal ensayo Mr

Exploración	SUCS	k_1	k_2	k_3	R^2
1	CH	0.652	0.022	-2.30	0.899
2	CH	1.025	0.189	-4.56	0.961
3	CH	0.396	0.009	-3.07	0.886
4	ML	0.524	0.179	-3.56	0.850
5	CH	0.879	0.270	-2.93	0.892
6	CH	0.660	0.079	-2.68	0.883
7	CH	0.523	0.096	-2.67	0.930
8	MH	0.295	0.007	-1.65	0.865
9	MH	0.334	0.150	-2.96	0.816
10	MH	0.444	0.193	-2.13	0.898
11	MH	0.604	0.150	-2.78	0.736
12	MH	0.485	-0.031	-2.87	0.919
13	MH	0.351	0.123	-1.37	0.753
14	MH	0.543	0.216	-2.45	0.911
15	CH	0.398	-0.166	-1.73	0.791
16	MH	0.408	0.098	-1.49	0.713
17	MH	0.378	0.098	-2.13	0.641
18	MH	0.415	0.085	-2.51	0.782
19	MH	0.303	-0.010	-1.32	0.854

Fuente: Elaboración propia



Continúa la figura



Continúa la figura

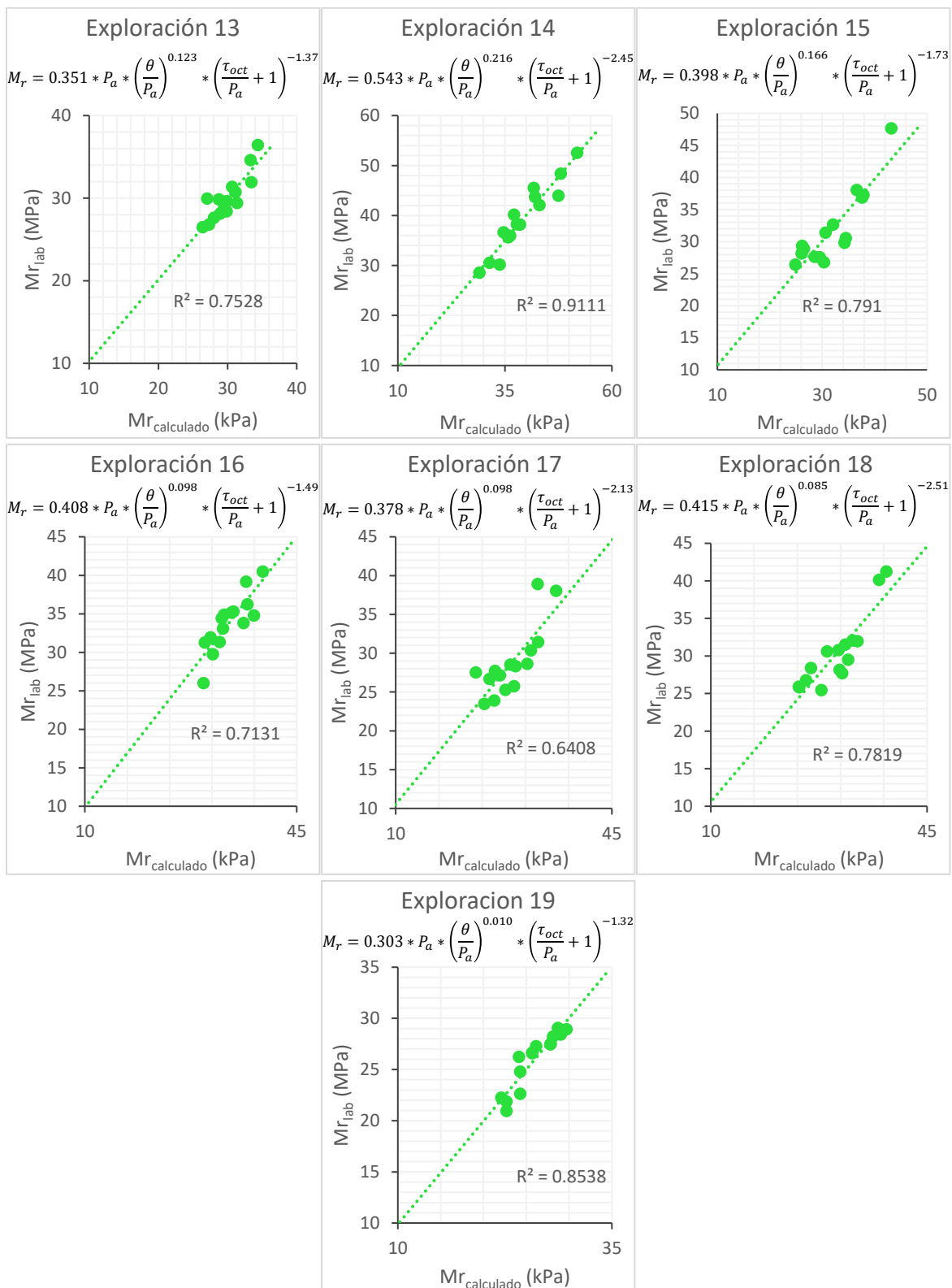


Figura 5.10 Comparación Mr obtenido en el laboratorio Vs Mr calculado mediante el modelo universal para todas las 19 muestras de estudio

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se puede observar que los valores de k_1 varían entre 0.295 y 1.025; la constante k_2 entre -0.166 y 0.270, y k_3 entre -4.56 y -1.32. Todo lo anterior corrobora la gran dependencia de los suelos blandos de subrasante ante el esfuerzo desviador (aquí tenido en cuenta mediante el cortante octaédrico) y la poca influencia del nivel de confinamiento (Esfuerzo Bulk) en el M_r , tal como lo presenta la literatura (Li & Selig, 1994; Garnica et al., 2001; Witczak, 2003; Elias et al., 2004; Rahim, 2005; Kim & Siddiki, 2006; Rondón et al., 2012).

Por otra parte, al igual que con el *modelo* $k - \sigma_d$, se buscó establecer un modelo único para los suelos de subrasante de la ciudad, un modelo para las arcillas y uno para los limos utilizados, sin embargo, tampoco fue posible establecer una buena correlación (Figura 5.11). Este hallazgo demuestra la heterogeneidad presente en los suelos de la zona lacustre bogotana, la cual en muchas ocasiones se ignora para propósitos de diseño de pavimentos, ya que se considera homogénea.

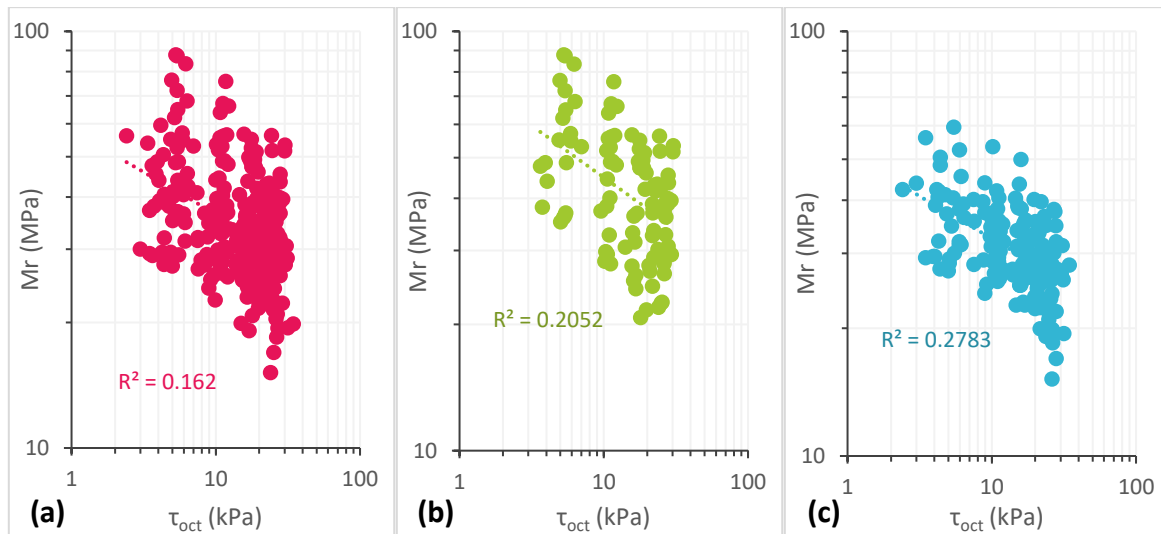


Figura 5.11 Resultados en conjunto de M_r Vs τ_{oct} para todas las 19 muestras de estudio: (a) Todas las muestras, (b) Muestras arcilla y (c) Muestras limo

Fuente: Elaboración propia

Para terminar, al comparar la Tabla 5.5 con la Tabla 5.6, es posible establecer que el *modelo universal* se postula como el mejor, puesto que en promedio su valor de R^2 es de 0.841, mientras que el del *modelo* $k - \sigma_d$ es 0.774. Esta conclusión apoya la postura de Witczak (2003) sobre la necesidad de utilizar un modelo constitutivo que contemple tanto el esfuerzo desviador (en este caso mediante el cortante octaédrico) como el esfuerzo Bulk, ya que el módulo resiliente de los suelos es función de ambas variables en alguna medida.

5.2.2. Cálculo M_r a un nivel de esfuerzos

El valor de M_r de un suelos no es una constante, y el uso de modelos constitutivos permite obtener dicho valor a diferentes niveles de esfuerzo; no obstante, para propósitos de diseño y de comparación con otros valores de resistencia no dependientes del esfuerzo, es imprescindible determinar un único valor de módulo; dicho *valor de diseño* se debe establecer a un nivel de esfuerzo que represente de la manera más real posible las cargas a las que es sometida una subrasante cuando transita un vehículo sobre ella (Jones & Witczak, 1977; Ping et al., 2001; Ji et al., 2014).

Para obtener este valor representativo de campo, los esfuerzos típicos resultantes en la superficie de la subrasante por un eje simple estándar de 80kN con una presión de contacto de 689kPa, fueron estimados usando el código computacional ELSYM5 mediante un análisis elástico-lineal de un sistema de pavimento (Herath et al., 2005). El pavimento seleccionado para el análisis de esfuerzos consideró una capa asfáltica de 150mm, una base granular de 200mm y una subrasante arcillosa semi-infinita. Como resultado se presentó que el esfuerzo vertical típico era de 42kPa con un esfuerzo de confinamiento de 14kPa sobre la subrasante por las cargas de tráfico.

Por su parte, Rahim (2005) desarrolló un estudio en Misisipi, el cual mostró que un eje estándar de 80kN genera un esfuerzo vertical cíclico de 37kPa y un confinamiento de 14kPa en la superficie de una subrasante típica. La estructura de pavimento utilizada consistía en una capa asfáltica de 150mm y una subrasante limosa tratada de 150mm. Adicionalmente, Herath et al. (2005) sostienen que someter el suelo a un esfuerzo desviador mayor a 41.3kPa no genera un cambio representativo en el módulo resiliente. Huang (2004), reporta que un gran número de correlaciones existentes en la literatura entre M_r y CBR son a estos niveles de esfuerzo debido a las razones anteriormente mencionadas.

Finalmente, The Asphalt Institute (1989) recomiendan el uso del módulo resiliente de la subrasante a un esfuerzo desviador de 41.3kPa y un esfuerzo de confinamiento de 14kPa para el diseño de pavimentos flexibles. Sobre la base de estas estimaciones de los esfuerzos de la subrasante que resultan de las cargas de tráfico, se seleccionó un esfuerzo desviador representativo de campo aproximado de 41.3 kPa y un esfuerzo de confinamiento de 14 kPa para interpolar el valor de módulo correspondiente.

Ahora, dado que los modelos constitutivos fueron obtenidos mediante herramientas de regresión, al calcular un valor de módulo se sabe que existe cierto grado de incertidumbre, ya que en ninguna ocasión es posible obtener un $R^2 = 1$; esto hace que sea recomendable calcular los valores de M_r con un cierto grado de confiabilidad, aceptando que la resistencia real del material puede diferir de la calculada.

Para hacer uso del grado de confiabilidad, lo primero que se debe determinar son los *intervalos de predicción*, de acuerdo con Wonnacott & Wonnacott (1993), este ejercicio

consiste en la estimación de un intervalo de valores en el que se producirá una observación futura con determinada probabilidad, dado lo que ya se ha observado.

Para calcular los *intervalos de predicción*, asumiendo que los datos de Mr se ajustan a una distribución normal, se hace uso de la Ecuación 5-8, donde m es la pendiente de la regresión, p el punto de corte con el eje y , n el número de datos (15 en este caso, que corresponden a los obtenidos en el ensayo de Mr), s es una constante calculada con la Ecuación 5-9, z es el nivel de confianza (Para este caso en particular, se realizó el análisis para determinar los intervalos de predicción con un 95% de confiabilidad, $z = 1.96$) y \bar{x} es el promedio de los valores del nivel de esfuerzo.

$$y_i(\pm) = m * x_i + p \pm z * s * \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2} + \frac{1}{n} + 1}$$

Ecuación 5-8

$$s = \sqrt{\frac{\sum(y_i - (m * x_i + p))^2}{n - 2}}$$

Ecuación 5-9

En la Figura 5.12 se puede observar un esquema de los intervalos de predicción y la regresión de un grupo de datos. Tal como allí se plantea, una vez establecidos los intervalos y conociendo el nivel de esfuerzos representativo ($\sigma_d = 41.3kPa$ y $\sigma_3 = 14kPa$), es posible determinar con un 95% de confiabilidad el rango de módulo resiliente que presenta el material. No obstante lo anterior, dado que es necesario establecer un único *valor de diseño*, se considera adecuado escoger el valor menor de este rango, ya que se estaría trabajando del lado seguro en el diseño.

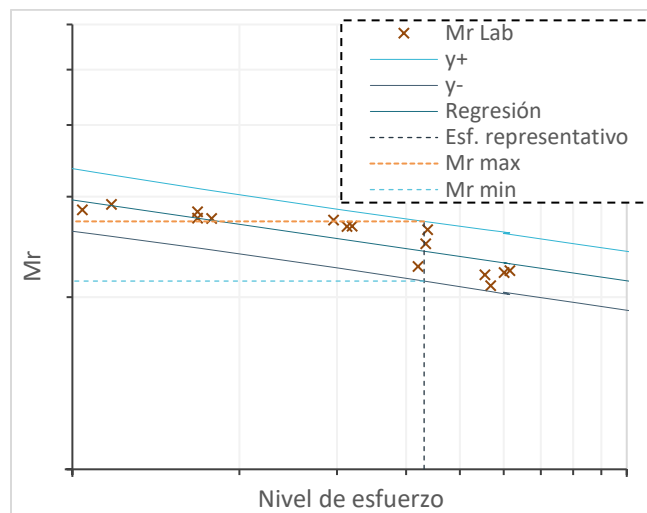
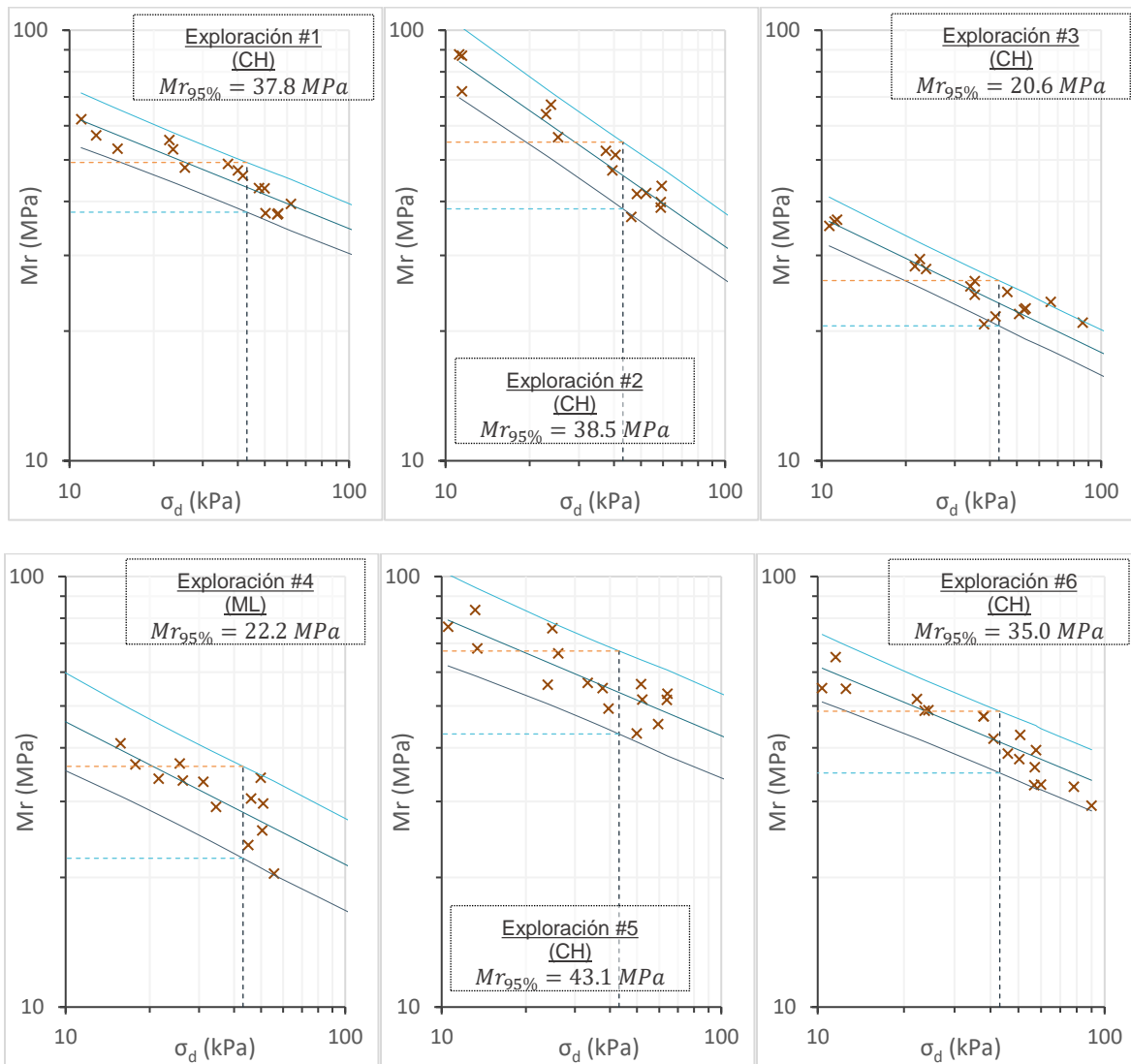


Figura 5.12 Representación de los intervalos de predicción y del valor de Mr al nivel de esfuerzo representativo

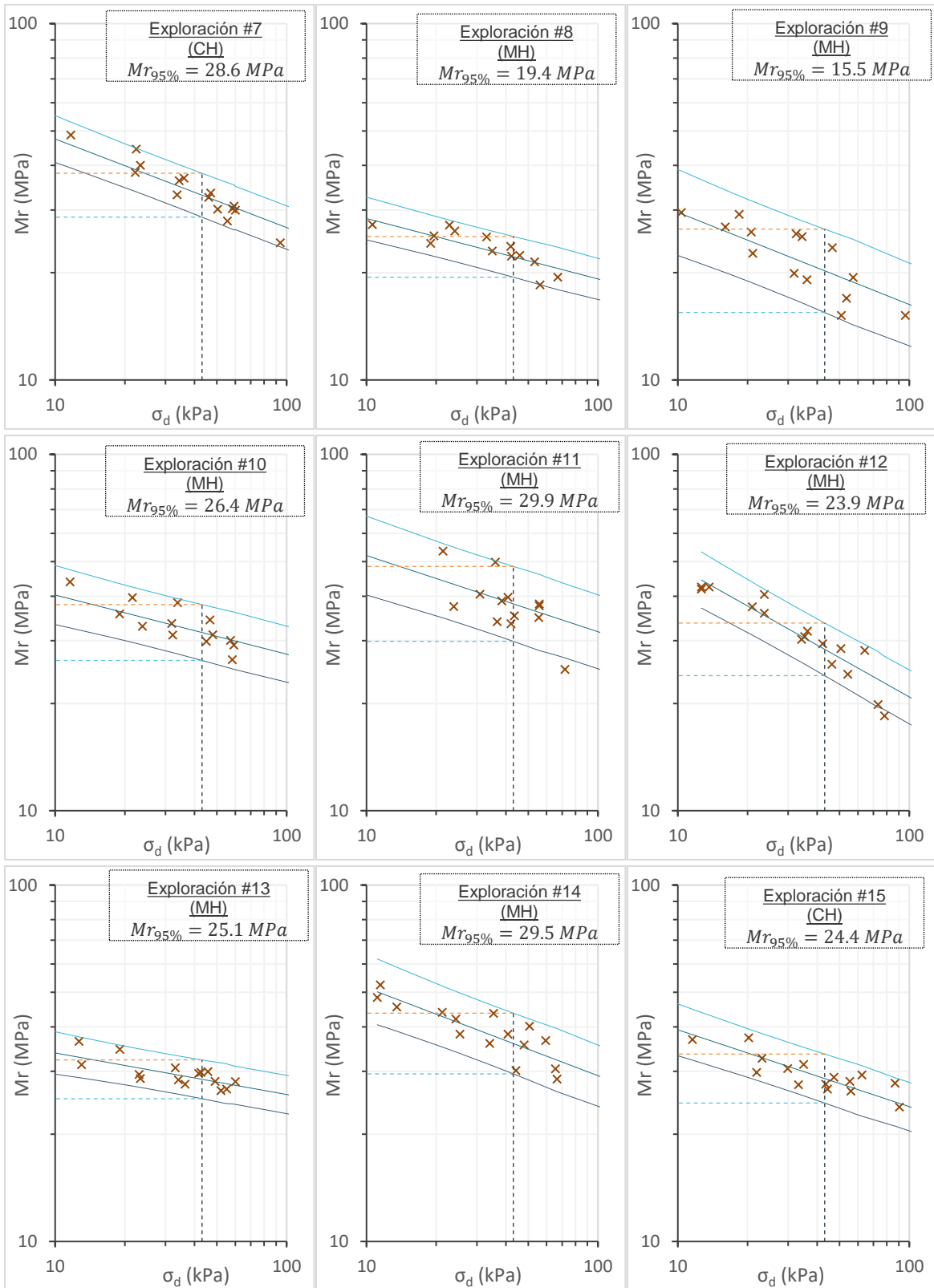
Fuente: Elaboración propia

5.2.2.1. Modelo $k - \sigma_d$

A partir de lo anterior, en la Figura 5.13 y en la Tabla 5.7 se presentan los resultados de intervalos de predicción y el valor de M_r , con un 95% de confiabilidad, calculado para cada una de las 19 muestras analizadas, usando el modelo $k - \sigma_d$.



Continúa la figura



Continúa la figura

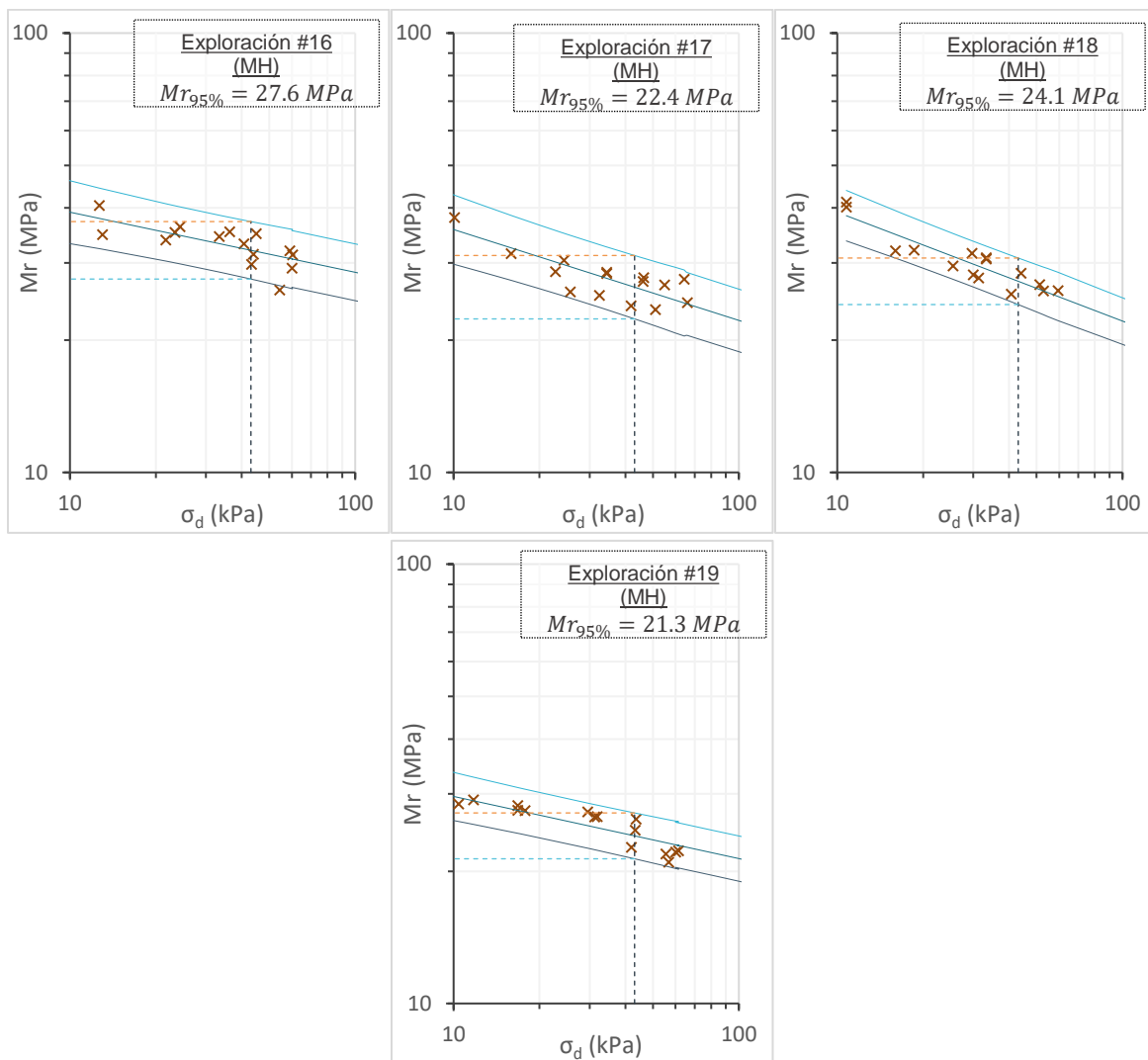


Figura 5.13 Resultados individuales de intervalos de predicción y Mr con 95% de confiabilidad para todas las 19 muestras de estudio mediante el *modelo k-σ_d*

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.2. Modelo Universal

Dado que el *modelo universal* presenta una ecuación que depende de dos variables (τ_{oct} y θ), es necesario fijar una de las dos, y así volver el modelo únicamente dependiente de un esfuerzo, ya que la metodología de intervalos de predicción presentada así lo requiere.

Puesto que se demostró que los suelos blandos de subrasante estudiados presentan una gran dependencia de τ_{oct} en comparación de θ , se decide fijar el valor del esfuerzo de confinamiento (σ_3) al valor representativo (14kPa), tal como se muestra en la Ecuación 5-10.

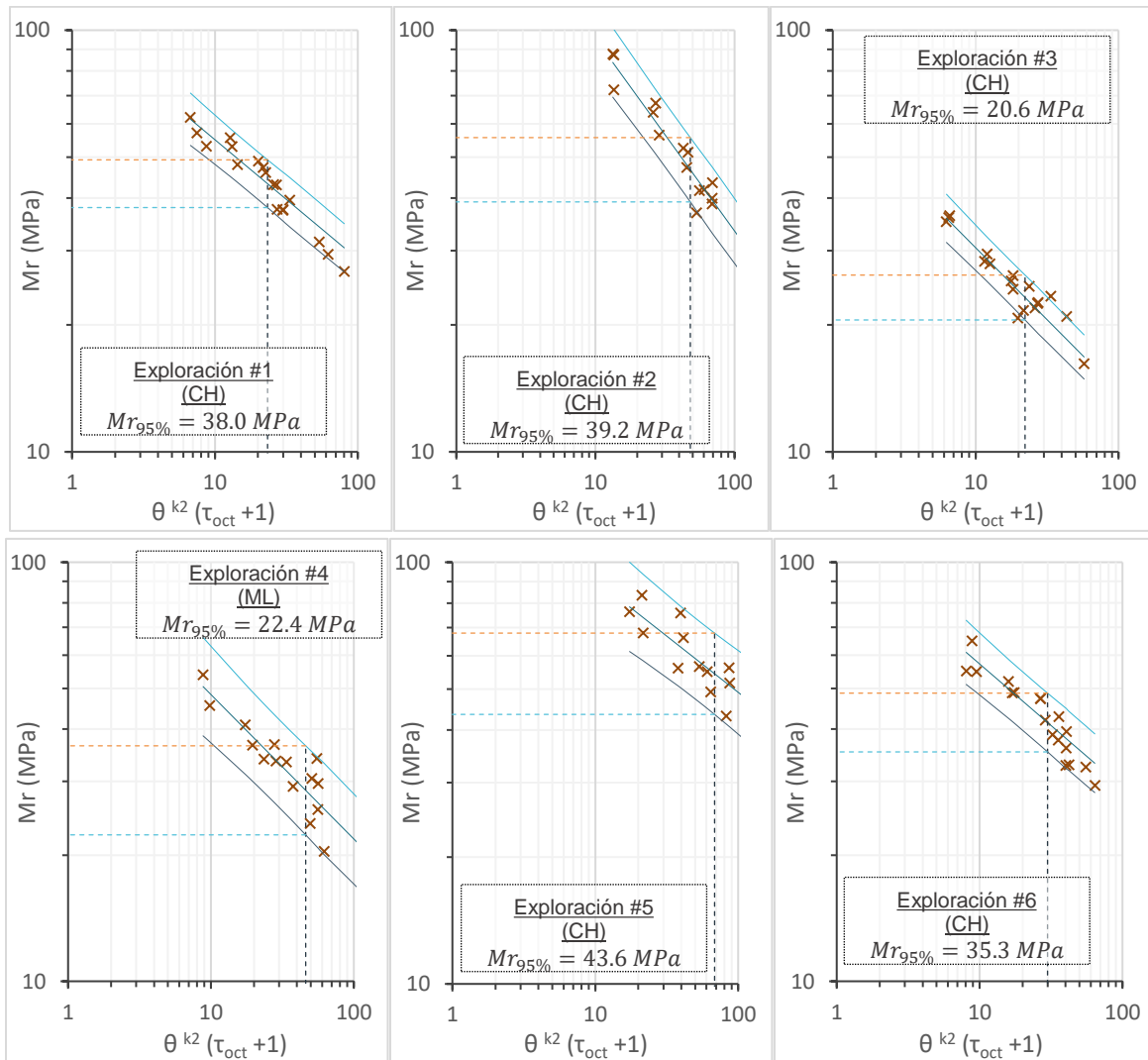
$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3} \rightarrow \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3 = \sigma_d + 3 * 14 = \sigma_d + 42$$

$$\rightarrow \tau_{oct} = \sqrt{2}/3 * \sigma_d$$

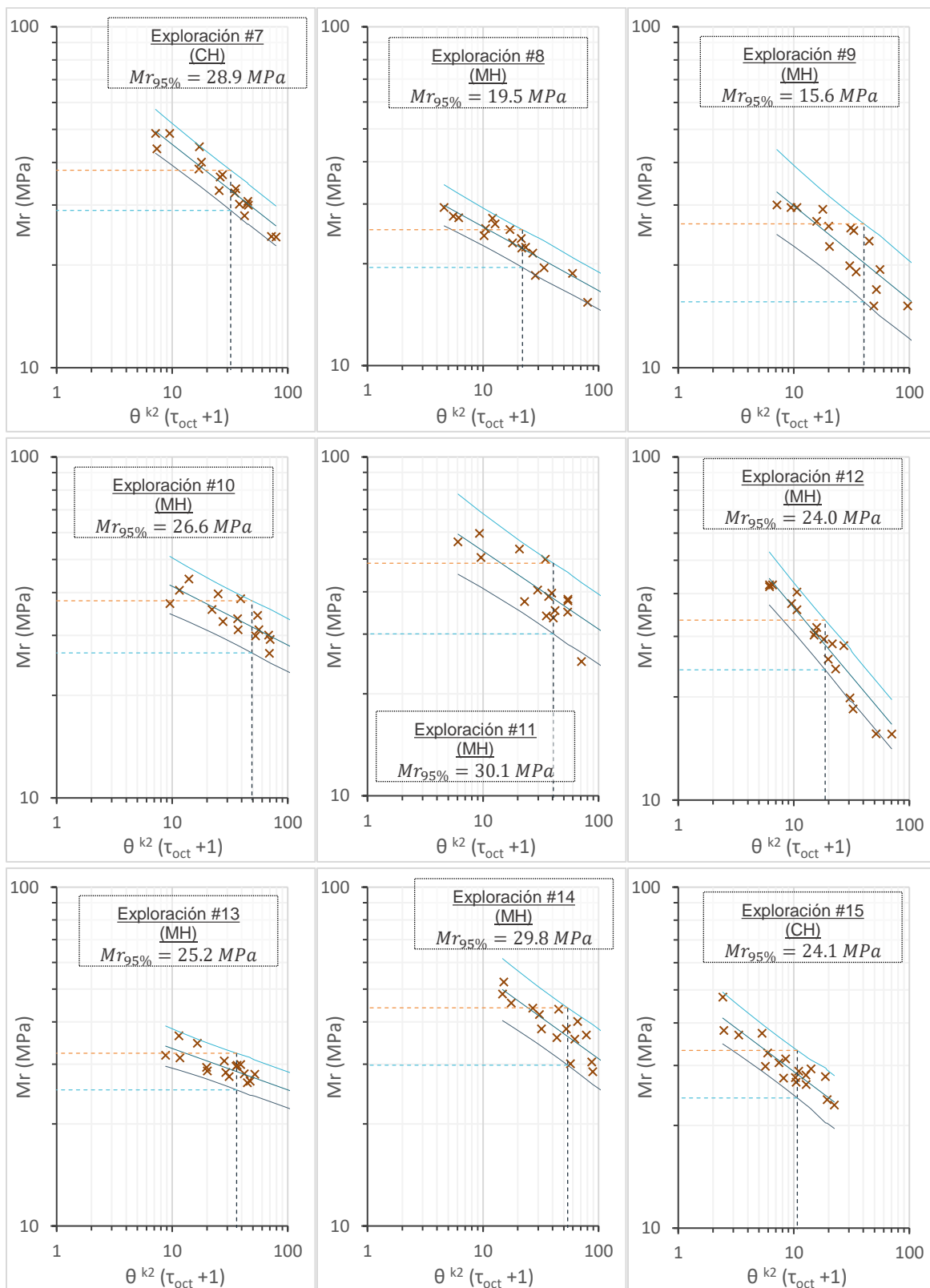
$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\sigma_d + 42}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{(\sqrt{2}/3) * \sigma_d}{P_a} + 1\right)^{k_3}$$

Ecuación 5-10

Una vez establecido el modelo en función de una variable, la explicación e interpretación de los resultados presentados en la Figura 5.12 tienen validez en el análisis aquí presentado. En la Figura 5.14 se presentan las gráficas correspondientes a los resultados de Mr e intervalos de predicción, con un 95% de confiabilidad, de las 19 muestras trabajadas, usando el *modelo universal* presentado en la Ecuación 5-10.



Continúa la figura



Continúa la figura

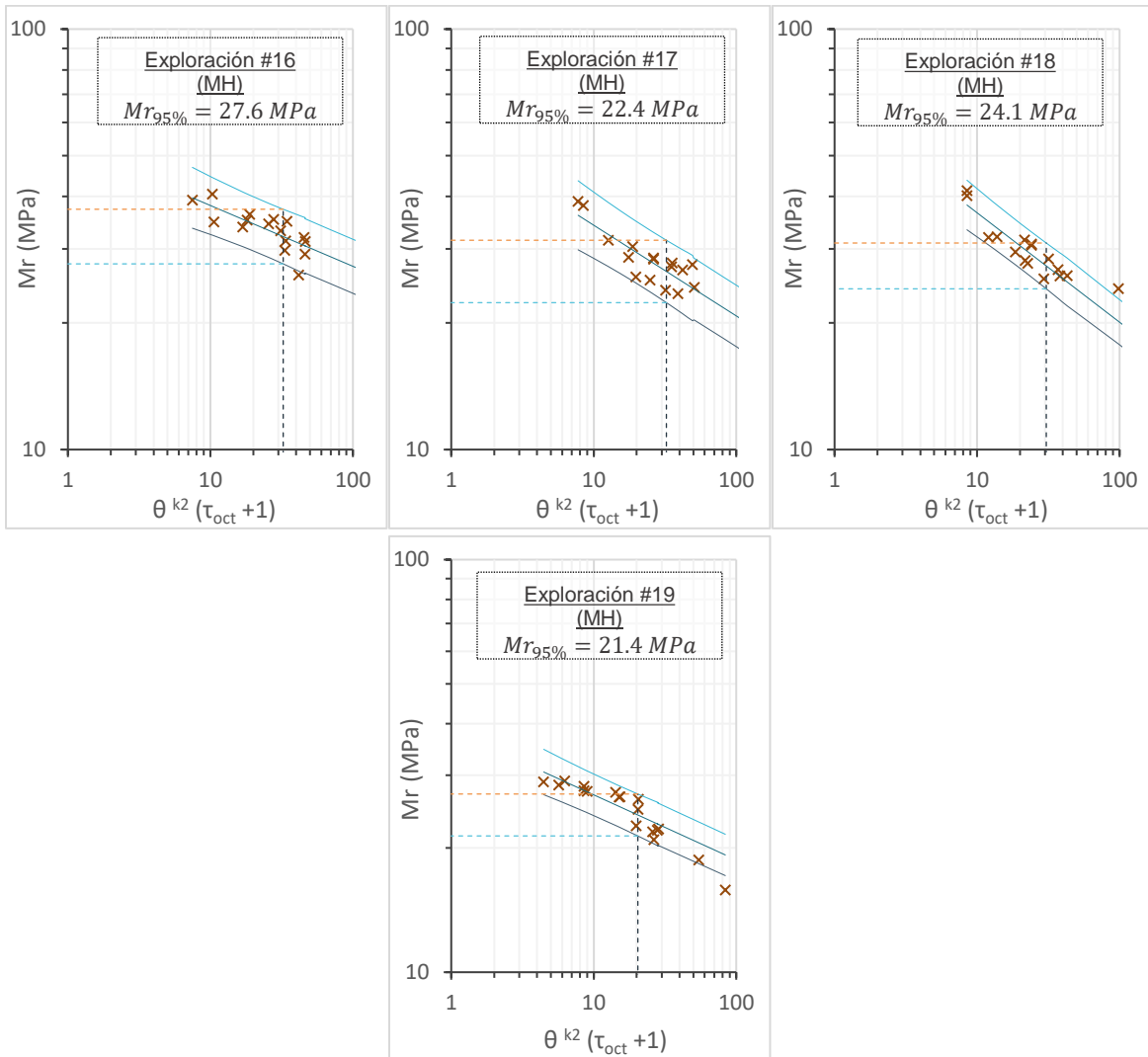


Figura 5.14 Resultados individuales de intervalos de predicción y Mr con 95% de confiabilidad para todas las 19 muestras de estudio mediante el *modelo universal*

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.3. Comparación entre los modelos constitutivos

En la Tabla 5.7 y en la Figura 5.15 se presentan los resultados del módulo obtenidas mediante los dos modelos constitutivos seleccionados; tal como se observa, los resultados son muy similares y por ende el uso de cualquiera de estos dos modelos llevará a diseños similares. Esto comprueba una vez más la gran influencia del esfuerzo desviador en el Mr de los suelos blandos de subrasante.

Tabla 5.7 Resultados de Mr con 95% de confiabilidad mediante modelo k-σ_d y modelo universal

Exploración	SUCS	M. k - σ _d Mr _{95%} (MPa)	M. Universal Mr _{95%} (MPa)
1	CH	37.8	38.0
2	CH	38.5	39.2
3	CH	20.6	20.6
4	ML	22.2	22.4
5	CH	43.1	43.6
6	CH	35.0	35.3
7	CH	28.6	28.9
8	MH	19.4	19.5
9	MH	15.5	15.6
10	MH	26.4	26.6
11	MH	29.9	30.1
12	MH	23.9	24.0
13	MH	25.1	25.2
14	MH	29.5	29.8
15	CH	24.4	24.1
16	MH	27.6	27.6
17	MH	22.4	22.4
18	MH	24.1	24.1
19	MH	21.3	21.4

Fuente: Elaboración propia

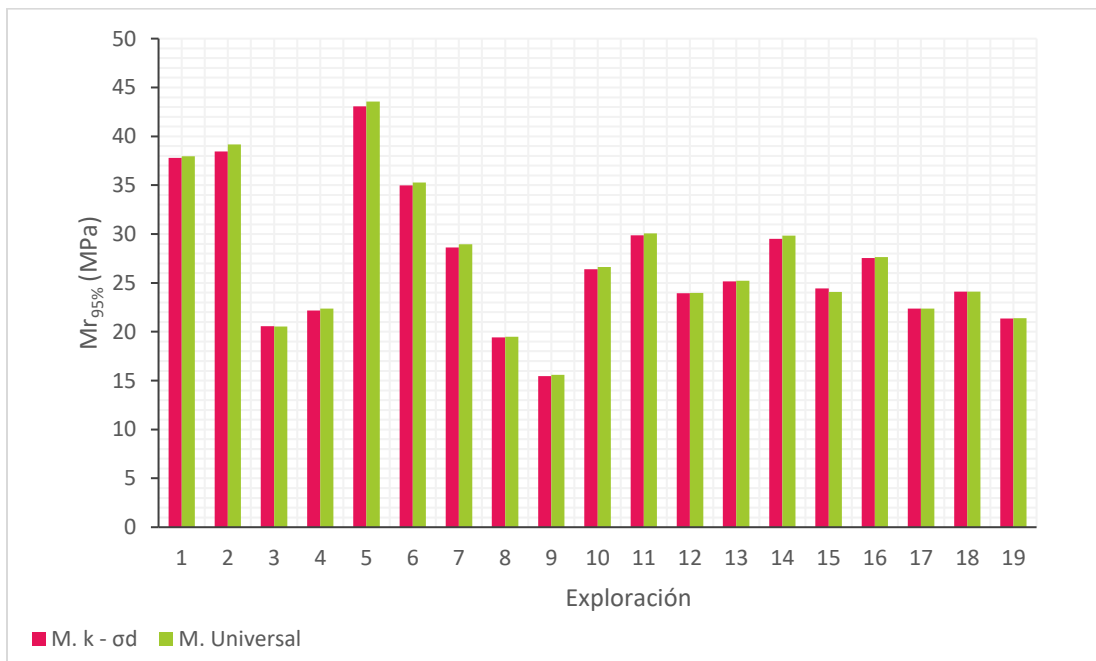


Figura 5.15 Comparación de los valores de Mr mediante el modelo k-σ_d y el modelo universal

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, estos resultados también demuestran la baja resistencia de los suelos de subrasante estudiados y su gran heterogeneidad; lo anterior es un llamado a que asumir un valor de resistencia para el suelo bogotano en general, debe ser una decisión tomada con criterio y precaución.

5.2.3. Influencia de las características físicas del suelo en el valor de M_r

A lo largo de los años se ha logrado generar un sustancial trabajo experimental que ha permitido un mejor entendimiento del comportamiento de los suelos blandos de subrasante ante cargas cíclicas (Nieto Leal & Kaliakin, 2016). Dentro de las propiedades de los suelos finos que más influyen en el módulo resiliente se encuentra la humedad, el peso unitario y la relación de vacíos; sin embargo características como la granulometría y la plasticidad también juegan un papel importante (Li & Selig, 1994).

En cuanto al efecto de la densidad y la relación de vacíos, autores como George (2004), Yang et al. (2005) y Kim & Siddiki (2006), aseguran que a medida que la densidad del suelo aumenta, menos volumen es ocupado por los vacíos, y en consecuencia esto resulta en un incremento en el módulo resiliente, un comportamiento que se obtuvo en la investigación, tal como se observa en las gráficas de la Figura 5.16.

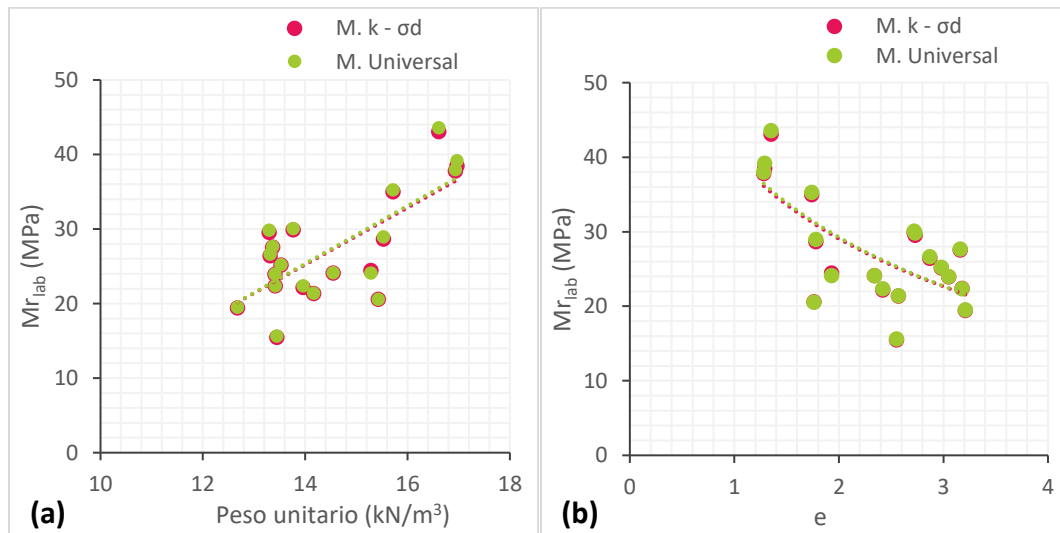


Figura 5.16 Valores de M_r (mediante ambos modelos) Vs (a) peso unitario y (b) relación de vacíos de las muestras

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, el módulo resiliente se ve afectado negativamente con el incremento en el contenido de agua (Li & Selig, 1994; Garnica et al., 2001; Andrei et al., 2009). Esto se logró observar en las muestras de la investigación, tal como se presenta en las gráficas de la Figura 5.17.

En cuanto a la granulometría, la teoría sustenta que un incremento en la cantidad de arena contribuye a una mejor rigidez. En esta investigación, esta influencia no se observó claramente al utilizar las muestras con elevados contenidos de arena en conjunto con aquellas con bajos contenidos (Figura 5.18a), no obstante, al trabajar de manera independiente las muestras que reportaron elevados contenidos de arena, el aporte de este material a la rigidez del suelo es notorio (Figura 5.18b).

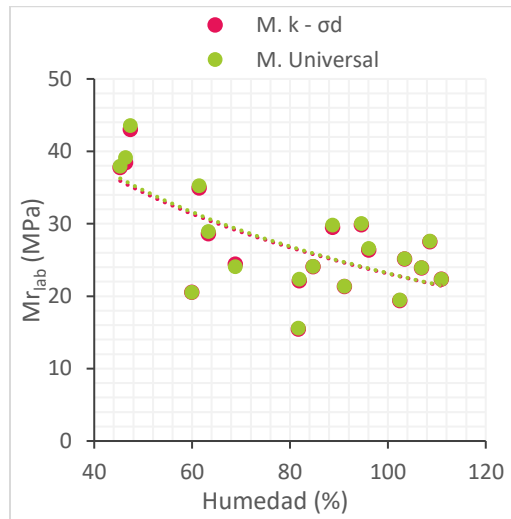


Figura 5.17 Valores de Mr (mediante ambos modelos) Vs Humedad

Fuente: Elaboración propia

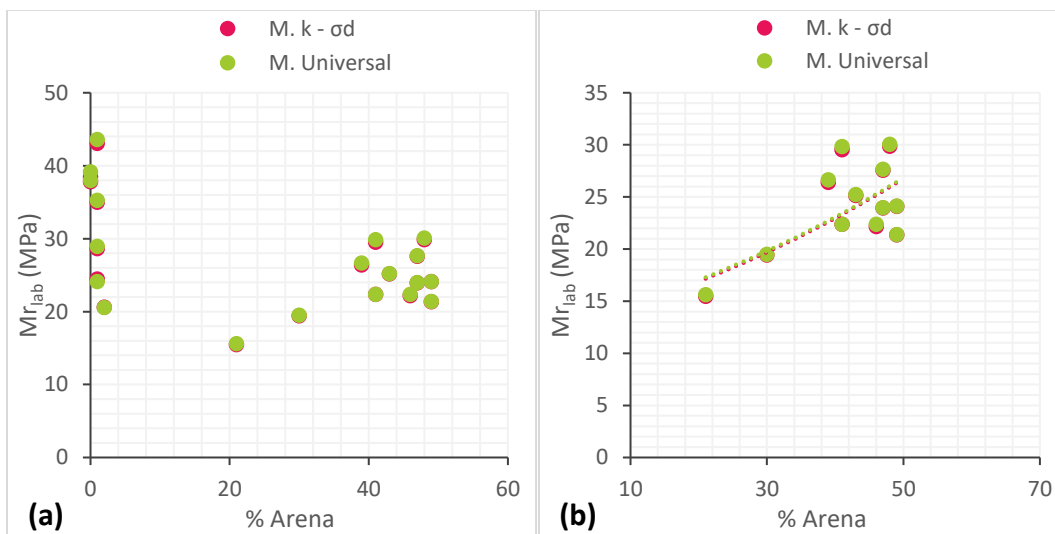


Figura 5.18 Valores de Mr (mediante ambos modelos) Vs % arena de (a) todas las muestras y (b) muestras como elevados contenidos de arena

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en lo que respecta a los límites de consistencia, tal como se presenta en las gráficas de la Figura 5.19, al parecer no existe una influencia importante de esta propiedad en el módulo resiliente de los suelos blandos de subrasante.

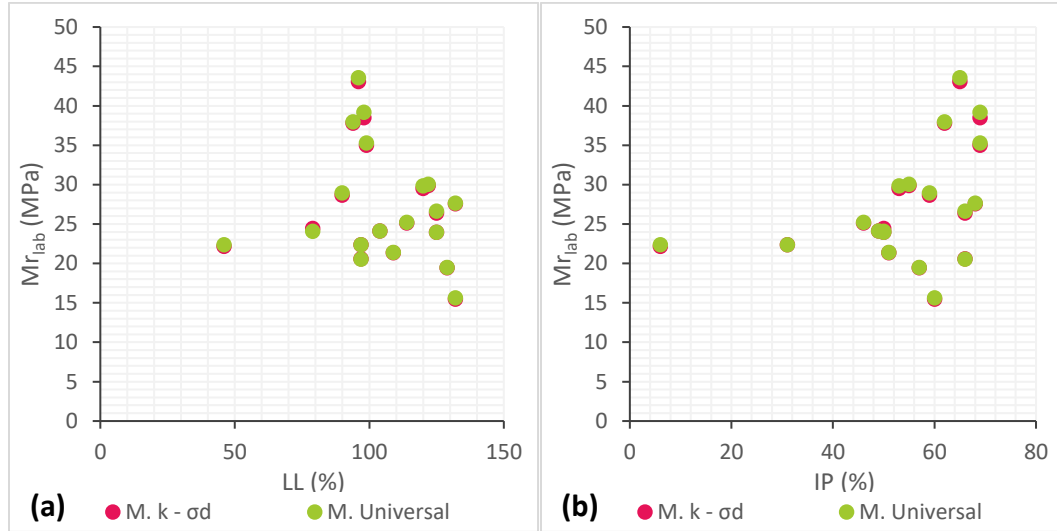


Figura 5.19 Valores de M_r (mediante ambos modelos) Vs (a) Límite líquido (LL) e (b) Índice de plasticidad (IP) de las muestras

Fuente: Elaboración propia

Aunque en general es posible ver tendencias en la influencia de la humedad, peso unitario, relación de vacíos y granulometría en los valores de rigidez de los suelos de estudio, es claro que en ninguna ocasión existe una buena correlación entre ellos. Esto quiere decir que, como es de esperarse, el módulo resiliente de un suelo no es función de una sola característica del suelo, sino que se ve influenciado por muchos factores en simultáneo.

5.2.4. Resistencia al corte – Prueba rápida de corte

Como ya se mencionó anteriormente, por medio del ensayo triaxial, siguiendo la metodología presentada, se obtuvo la resistencia al corte no drenada de las muestras de estudio que no fallaron antes de las 15 secuencias de carga contempladas. Cabe resaltar, que a la gran mayoría de ellas (16 de 19 muestras) fue posible aplicarles la prueba rápida de corte, solo aquellas con la mayor cantidad de raíces fallaron durante el ensayo de M_r ; esto se atribuye a que dichas raíces funcionaron como superficies de debilidad y aceleraron la falla en las muestras.

Aunque en la Tabla 5.1 ya se habían presentado dichos resultados numéricamente, en la Figura 5.20 se muestran gráficamente, con el fin de compararlos fácilmente. En las gráficas de la Figura 5.21. se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de esta prueba rápida de corte.

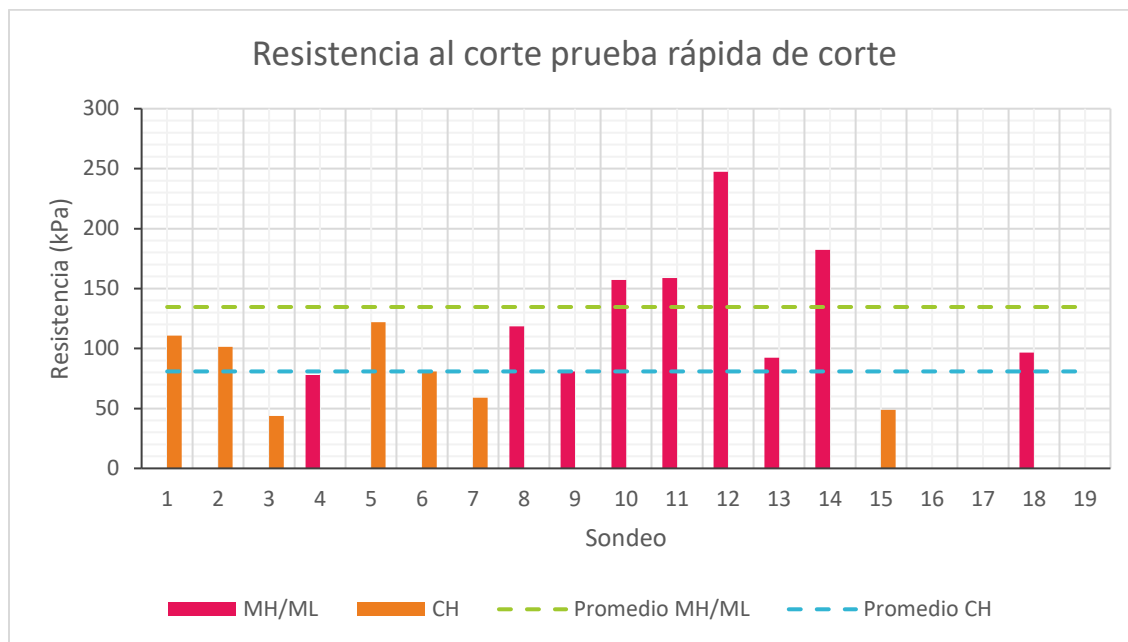


Figura 5.20 Resultados resistencia al corte de todas las muestras

Fuente: Elaboración propia

Tal como se observa en la Figura 5.20, las resistencias de los suelos se encuentran entre 43.71MPa hasta 247.41, lo cual abarca un rango amplio de resistencia. No obstante, estos valores de resistencia son bajos, algo a esperar en suelos de consistencia blanda de subrasante de la ciudad de Bogotá. La variabilidad de la resistencia se atribuye a que las muestras fueron ensayadas a contenidos de agua, saturación, porosidad, relación de vacíos, cantidad de raíces y profundidad diferentes. Adicionalmente, también es posible notar que en promedio los limos presentaron mayor resistencia que las arcillas.

Por su parte, tal como se observa en las gráficas esfuerzo-deformación de la Figura 5.21, se puede concluir que, en general, las muestras de arcilla presentan un comportamiento dúctil y los limos uno frágil. Las muestras de arcilla presentaron deformaciones mayores antes de la falla, pero a niveles de esfuerzo más bajos de los requeridos para una muestra tipo limo. Este comportamiento de mayor resistencia, se puede atribuir a la arena presente en los limos, lo cual se ha comprobado que incrementa la resistencia al corte de los suelos (Araujo & Ruiz, 2016). Adicionalmente, en cuanto al comportamiento frágil, este se puede adjudicar a que las muestras de limo trabajadas presentaban una gran cantidad de raíces, que en la mayoría de las ocasiones funcionaron como planos de falla de los materiales, lo cual no se presentó en las muestras de arcilla.

Finalmente, en estas gráficas también es posible ver que el módulo elástico de las muestras de arcilla y limo (por separado) son similares, esto debido a que casi todas las curvas de las gráficas en la zona elástica tienden a ser paralelas entre ellas, especialmente en los limos.

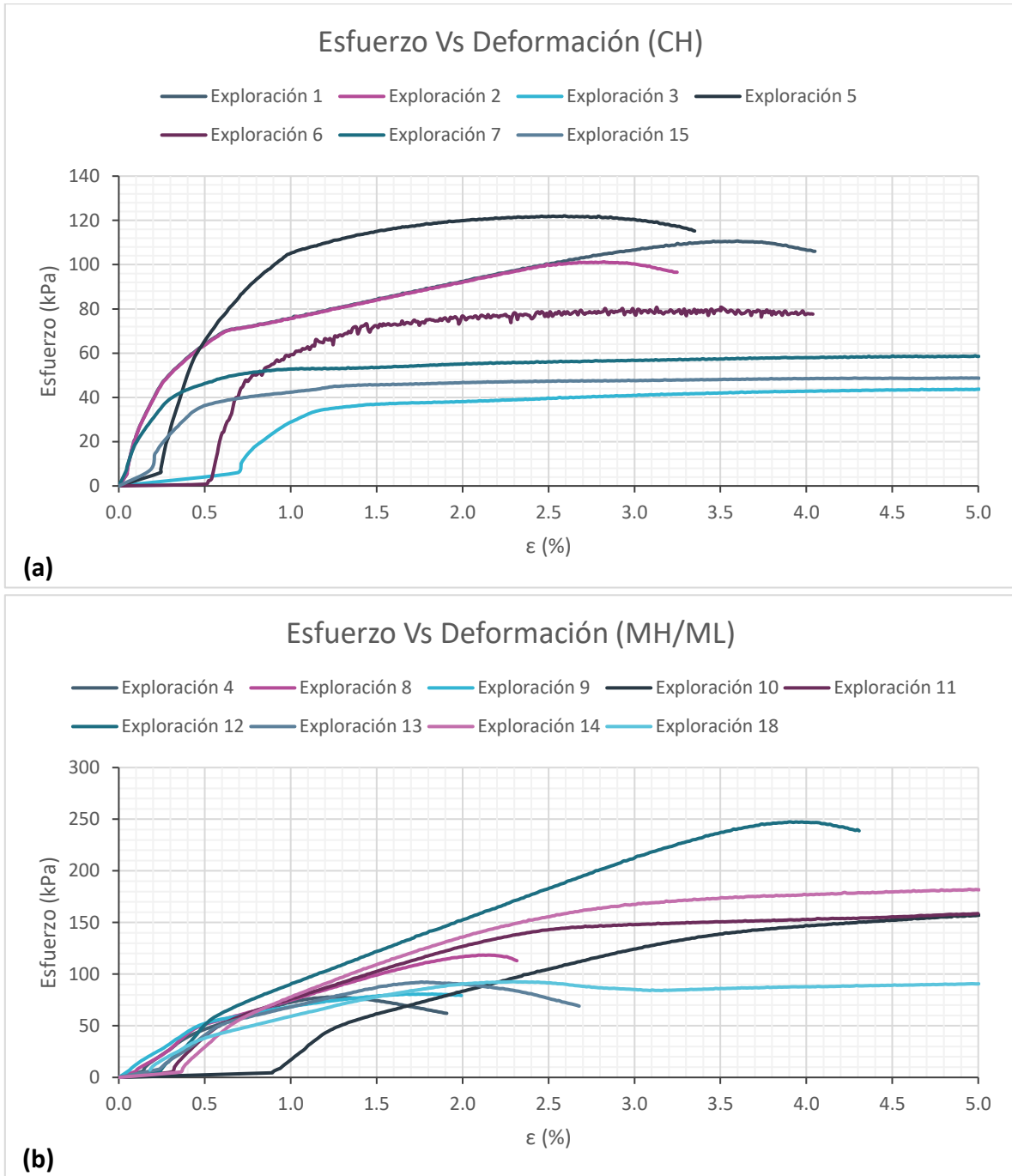


Figura 5.21 Curvas esfuerzo-deformación prueba rápida de corte para las muestras de **(a)** Arcilla (CH) y **(b)** Limo (MH/ML)

Fuente: Elaboración propia

5.3. Resultados ensayo cCBR

Tal como se estableció en el Capítulo 3 y Capítulo 4, el ensayo de cCBR consiste en utilizar 3 muestras inalteradas idénticas, contenidas en moldes de CBR, y penetrar cada una de ellas a una profundidad diferente (Aproximadamente 2.54mm, 1.27mm y 0.625mm), registrando el esfuerzo requerido para alcanzar esa profundidad; este esfuerzo se aplica de manera sucesiva durante al menos 100 ciclos a una velocidad de 1.27mm/min, hasta alcanzar un comportamiento resiliente, donde la variación en la deformación permanente entre ciclos consecutivos es menor a 3%. Para asegurar un contacto permanente entre la muestra y el pistón, en el proceso de descarga se llega a una carga equivalente de aproximadamente el 10% de la registrada para la *penetración objetivo*. La deformación resiliente que se utiliza para los análisis corresponde al promedio de las presentadas en los últimos 5 ciclos de carga. Los resultados de todos los ensayos se presentan a detalle en el Anexo D, y el protocolo de ensayo se encuentra en el Anexo A.

Como ya también se había mencionado en el Capítulo 1, uno de los principales alcances de esta investigación es desarrollar una técnica de caracterización sencilla del comportamiento mecánico de suelos de subrasante, y uno de los principales parámetros que puede ser utilizado en el análisis y diseño de pavimentos es el módulo de rigidez; el cual es aquí representado por el *módulo equivalente* (E_{equi}), una medida promedio de la rigidez de una muestra. Los valores de este módulo para las 19 exploraciones, a las tres penetraciones objetivo, se presentan en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 E_{equi} (en MPa) a diferentes penetraciones objetivo de las 19 exploraciones realizadas

		E_{equi} (en MPa)			
		2.54	1.27	0.625	SUCS
Exploración	Penetración objetivo (mm)				
		1	31.4	29.4	26.7
2		31.7	29.5	28.6	CH
3		23.4	20.9	16.2	CH
4		19.5	14.8	14.1	ML
5		41.5	33.4	32.7	CH
6		32.8	32.5	29.3	CH
7		29.9	24.3	24.2	CH
8		18.7	15.4	14.2	MH
9		15.2	13.1	11.9	MH
10		27.0	19.5	19.1	MH
11		24.9	22.5	18.2	MH
12		18.4	15.6	15.6	MH
13		28.1	20.9	20.5	MH
14		27.7	24.4	22.7	MH
15		27.8	23.8	23.0	CH
16		29.2	24.3	22.1	MH
17		24.3	23.2	16.9	MH
18		24.1	13.8	13.4	MH
19		22.1	18.7	15.8	MH

Fuente: Elaboración propia

Tal como se puede observar en la tabla anterior, los valores de E_{equi} para los suelos de subrasante estudiados varían entre 41.5 a 11.9MPa, en el caso particular de los suelos CH, los módulos varían entre 41.5 y 16.2MPa y en los suelos MH la variación es entre 29.2 y 11.9MPa, órdenes de magnitud menores a los obtenidos mediante los ensayos de Mr, lo cual es de esperarse, puesto que los niveles de esfuerzo trabajados en el cCBR son mayores, específicamente el esfuerzo desviador.

De manera similar a lo reportado en los ensayos de Mr, los limos presentan valores de E_{equi} menores que las arcillas, lo cual demuestra una vez más el efecto en la rigidez que tienen las raíces en los suelos.

En cuanto a la uniformidad de los valores de módulo, en ambos tipos de suelos se presentan desviaciones estándar similares (5.5MPa para arcillas y 4.8MPa para limos), las cuales son menores a las presentadas en el ensayo de Mr; esto demuestra que la rigidez de los suelos a elevados niveles de esfuerzo tiende a ser constante y, por ende, se explica el uso de modelos logarítmicos para describir su comportamiento.

5.3.1. Ecuaciones constitutivas

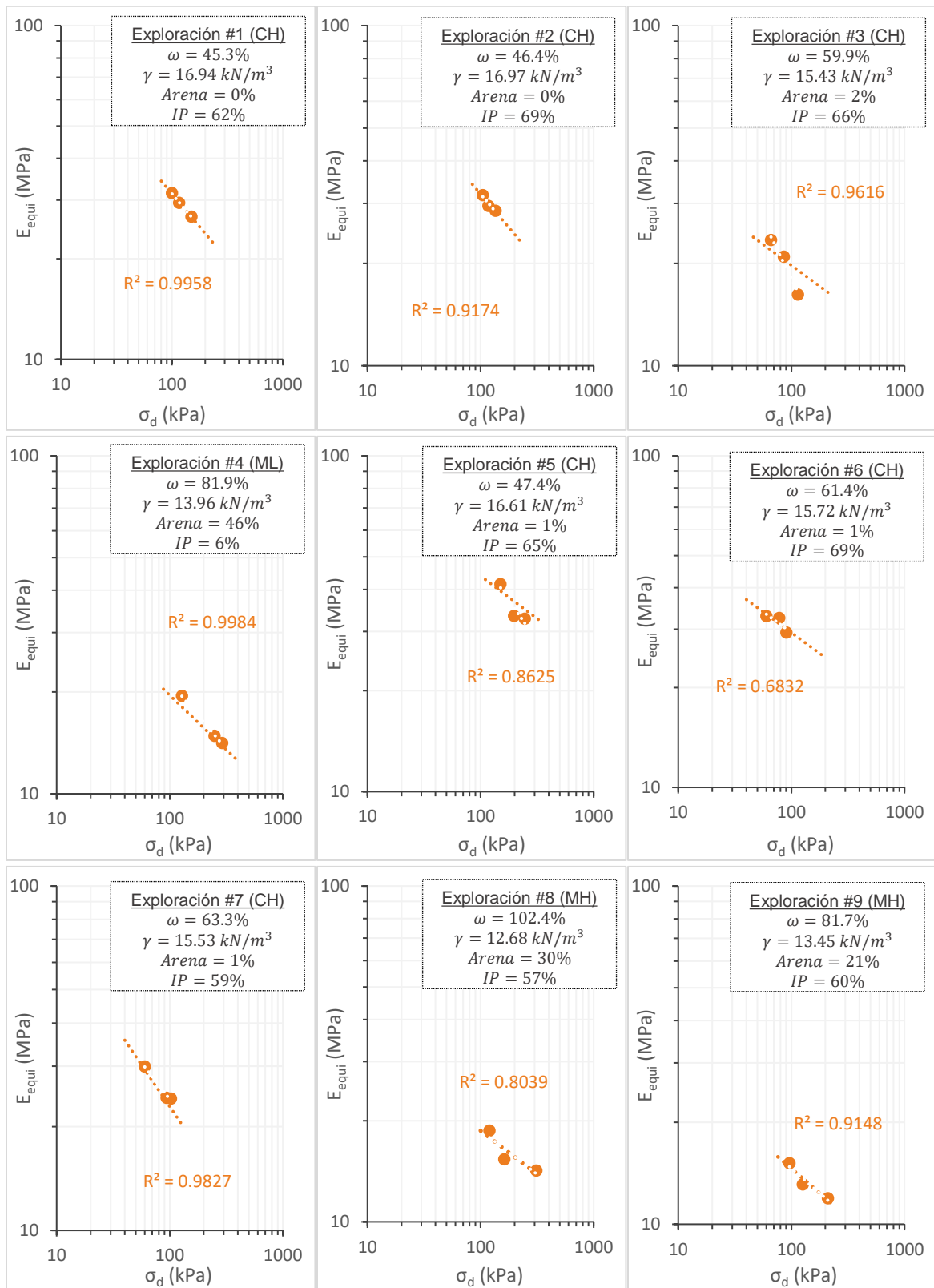
Dado que uno de los fines de esta investigación es comparar los resultados entre el Mr y el E_{equi} para establecer la utilidad o no del ensayo de cCBR, se realizó el análisis de los mismos modelos constitutivos utilizados para el módulo resiliente.

5.3.1.1. Modelo $k - \sigma_d$

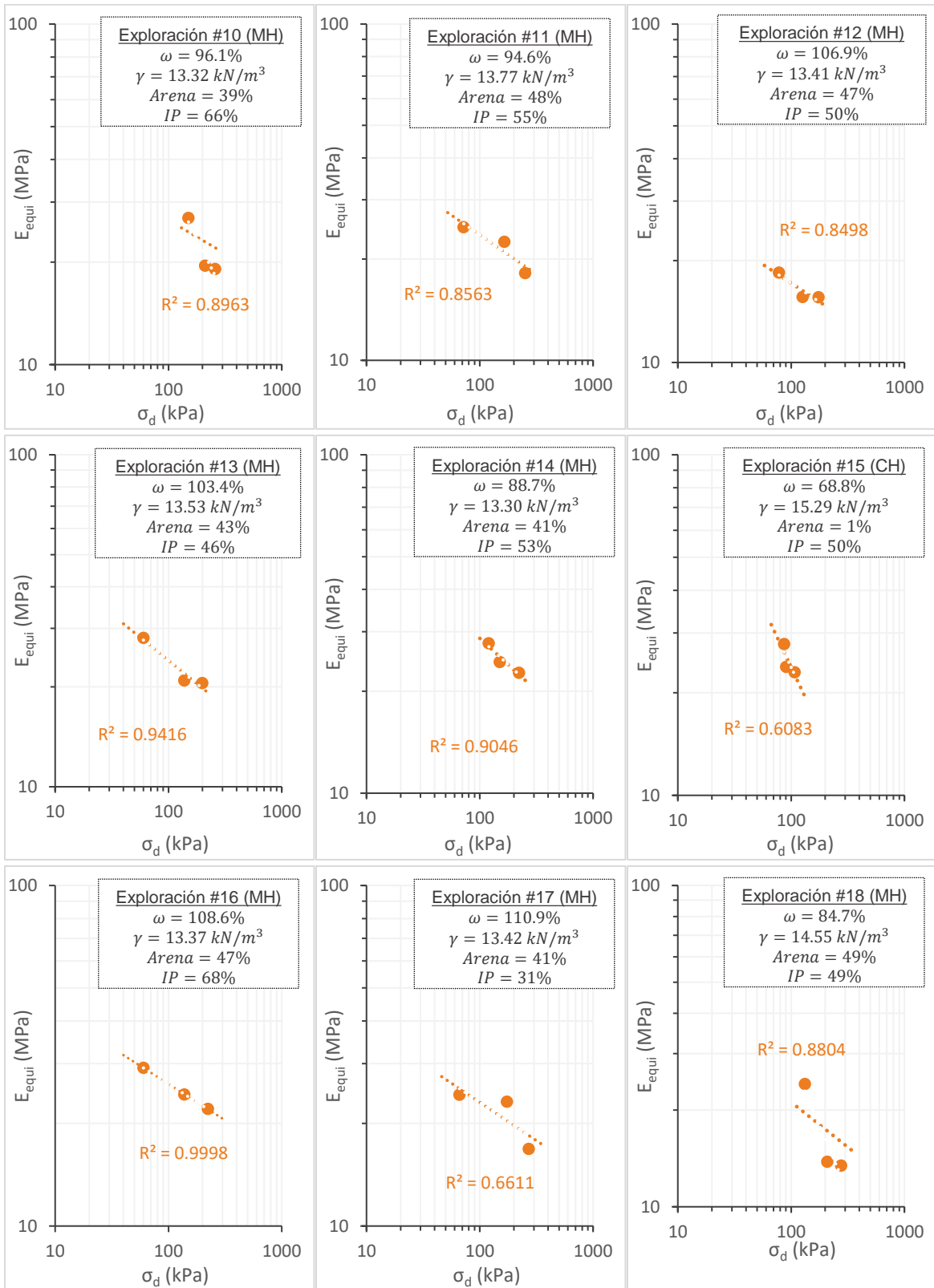
En las gráficas mostradas a continuación (Figura 5.22) se presenta el comportamiento del E_{equi} frente al esfuerzo desviador (σ_d) para todas las muestras evaluadas en la investigación. Al igual que lo presentado en el ensayo de Mr, se observa una dependencia del E_{equi} frente al esfuerzo desviador (En la mayoría de los casos $R^2 > 0.7$), independientemente de cambios en la humedad, peso unitario, granulometría y plasticidad de los suelos.

Dado que σ_d es el único a tributo en el *modelo $k - \sigma_d$* (Ecuación 5-6), estas gráficas permiten demostrar que el uso de esta expresión para analizar el E_{equi} es adecuado en este caso; con lo cual se procede a obtener los valores de las constantes k_1 y k_2 de dicho modelo a partir de un análisis estadístico y la aplicación de la metodología de mínima diferencias cuadradas.

En la Tabla 5.9 se presenta un resumen de los valores obtenidos para dichas constantes experimentales, así como el ajuste de cada uno de estos modelos (R^2), al comparar los valores de E_{equi} obtenidos en el laboratorio respecto a los calculados con el modelo (Gráficas en la Figura 5.23).



Continúa la figura



Continúa la figura

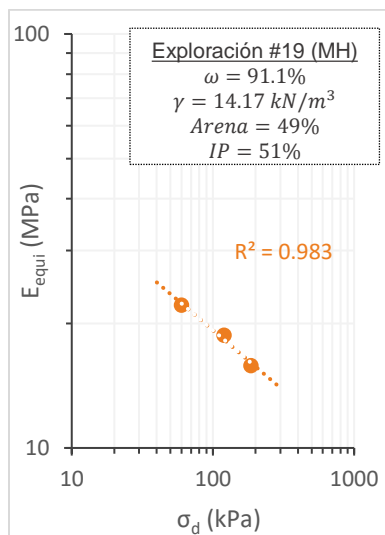


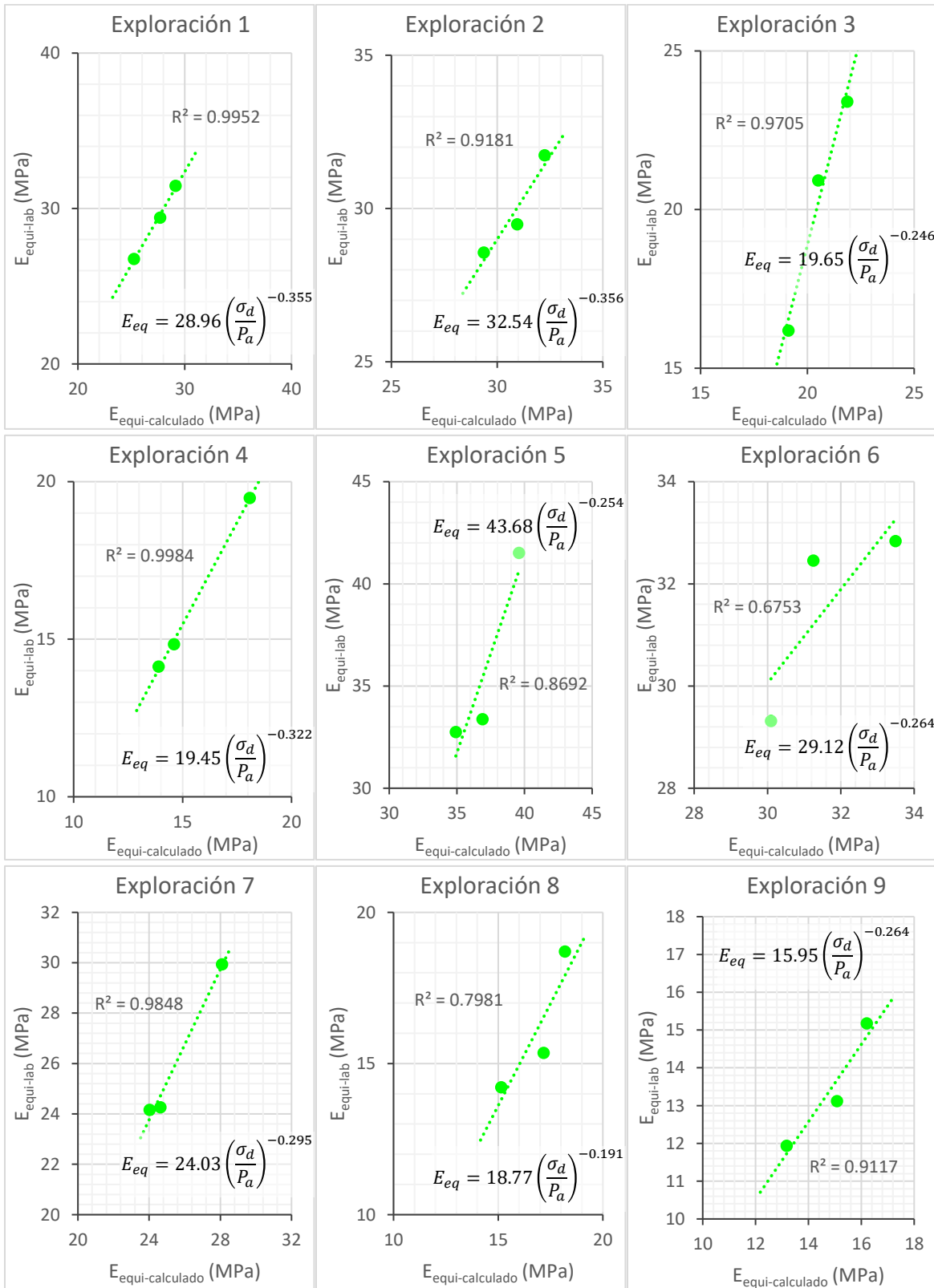
Figura 5.22 Resultados individuales de E_{equi} Vs σ_d para todas las 19 muestras de estudio

Fuente: Elaboración propia

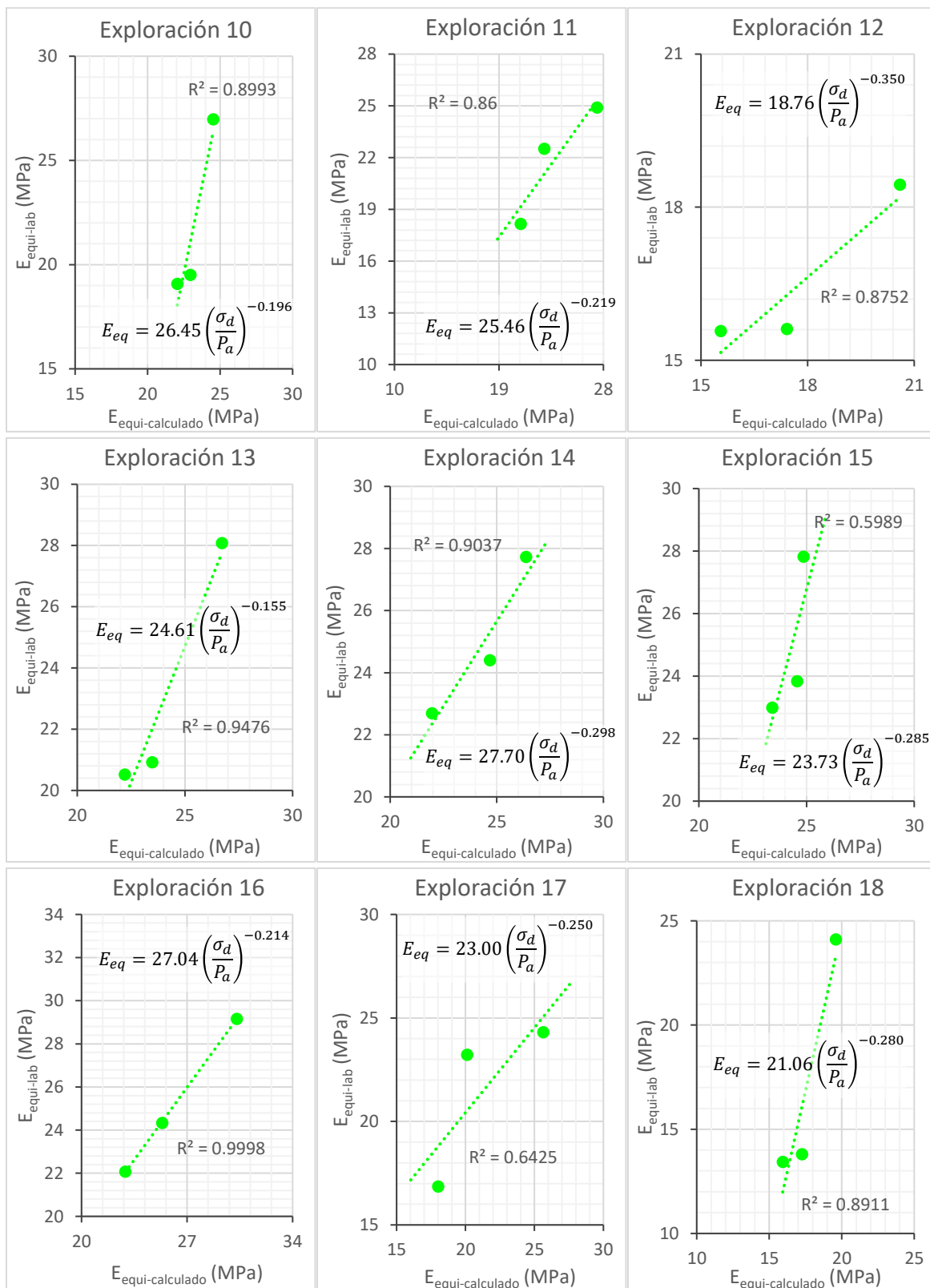
Tabla 5.9 Valor constantes experimentales modelo k - σ_d ensayo cCBR

Exploración	SUCS	k_1	k_2	R^2
1	CH	28.96	-0.355	0.995
2	CH	32.54	-0.356	0.918
3	CH	19.65	-0.246	0.971
4	ML	19.45	-0.322	0.998
5	CH	43.68	-0.254	0.869
6	CH	29.12	-0.264	0.675
7	CH	24.03	-0.295	0.985
8	MH	18.77	-0.191	0.798
9	MH	15.95	-0.264	0.912
10	MH	26.45	-0.196	0.899
11	MH	25.46	-0.219	0.860
12	MH	18.76	-0.350	0.875
13	MH	24.61	-0.155	0.948
14	MH	27.70	-0.298	0.904
15	CH	23.73	-0.285	0.599
16	MH	27.04	-0.214	1.000
17	MH	23.00	-0.250	0.643
18	MH	21.06	-0.280	0.891
19	MH	19.25	-0.155	0.989

Fuente: Elaboración propia



Continúa la figura



Continúa la figura

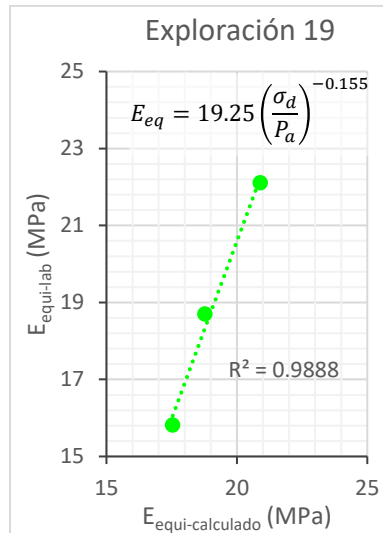


Figura 5.23 Comparación E_{equi} obtenido en el laboratorio Vs E_{equi} calculado mediante el modelo $k - \sigma_d$ para todas las 19 muestras de estudio

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 5.9 y de la Figura 5.23, es posible decir que los valores de las constantes experimentales de los modelos cumplen con los establecido en la teoría, en otras palabras, todos los valores de k_1 son positivos y los de k_2 negativos, lo cual resalta el hecho de que el E_{equi} disminuye con el incremento en el esfuerzo desviador, tal como sucede con el valor de M_r (Garnica et al., 2001; Witczak, 2003; Elias et al., 2004; Rahim, 2005).

Por otra parte, los resultados también permiten establecer que los valores de k_1 varían entre 15.95 y 43.68 y de la constante k_2 entre -0.356 y -0.155. Si se analizan de manera independiente los arcillas y los limos, las primeras presentan valores de k_1 entre 19.65 y 15.95, y de k_2 entre -0.356 y -0.246; mientras que para los segundos k_1 varía entre 16.99 y 32.17, y k_2 entre -0.350 y -0.155; esto permite concluir que las arcillas se ven más influenciada por el esfuerzo desviador en comparación con los limos. Estos resultados son similares a los obtenidos mediante el ensayo M_r , dando los primeros indicios de que es posible llegar a resultados similares mediante el ensayo cCBR.

Finalmente, al igual que con el ensayo M_r , se buscó establecer un modelo constitutivo único para los suelos de subrasante de la ciudad, no obstante, los resultados no fueron favorables, dado el bajo nivel de correlación (R^2) entre los valores de E_{equi} y σ_d cuando son graficados en conjunto (Figura 5.24a). Esto se da como resultado de la variabilidad en las propiedades de los suelos estudiados. De igual manera se intentó establecer una ecuación independiente para los limos y las arcillas, pero la conclusión fue la misma (Figura 5.24b y Figura 5.24c).

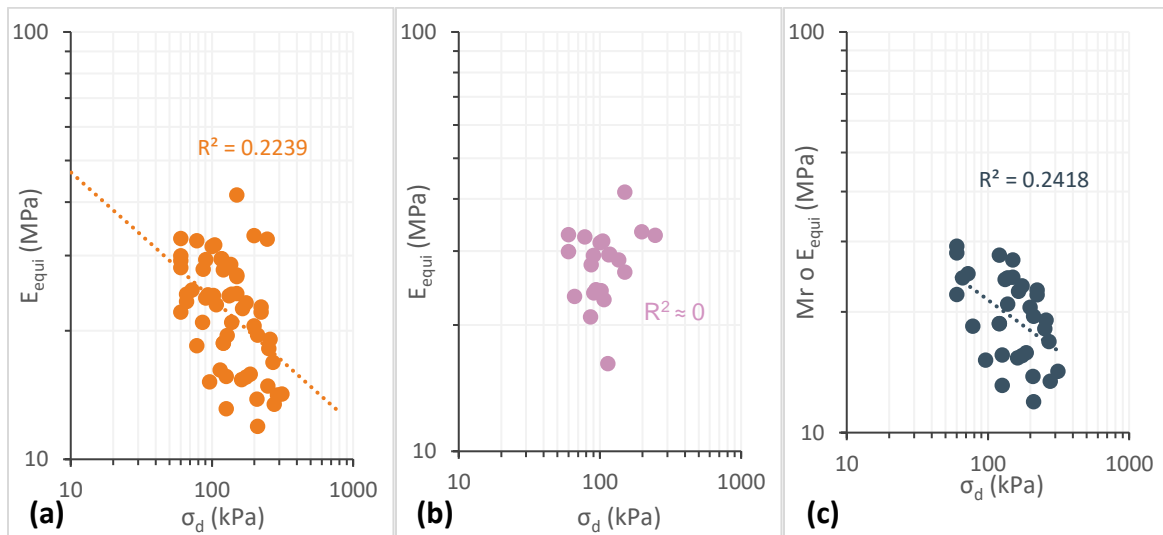
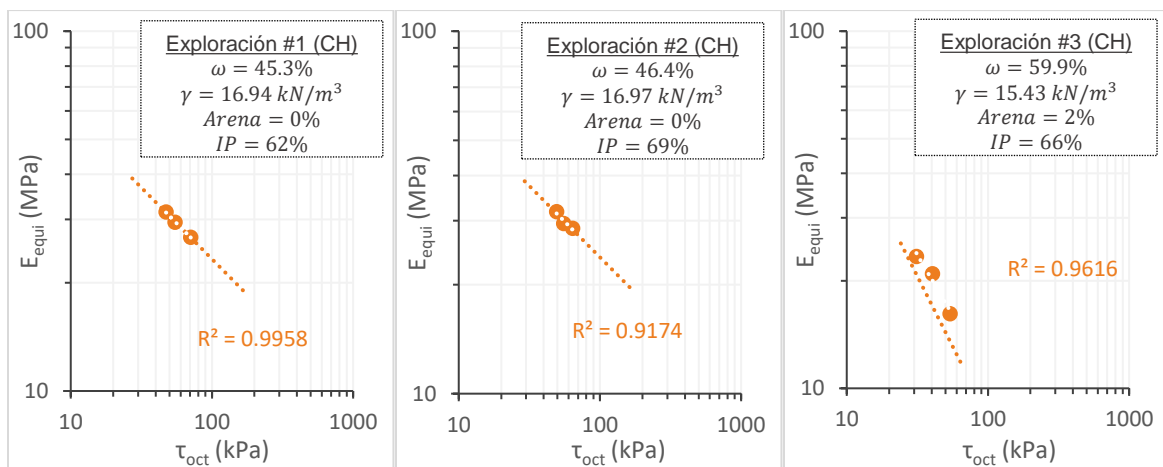


Figura 5.24 Resultados en conjunto de E_{equi} Vs σ_d para todas las 19 muestras de estudio: (a) Todas las muestras, (b) Muestras arcilla y (c) Muestras limo

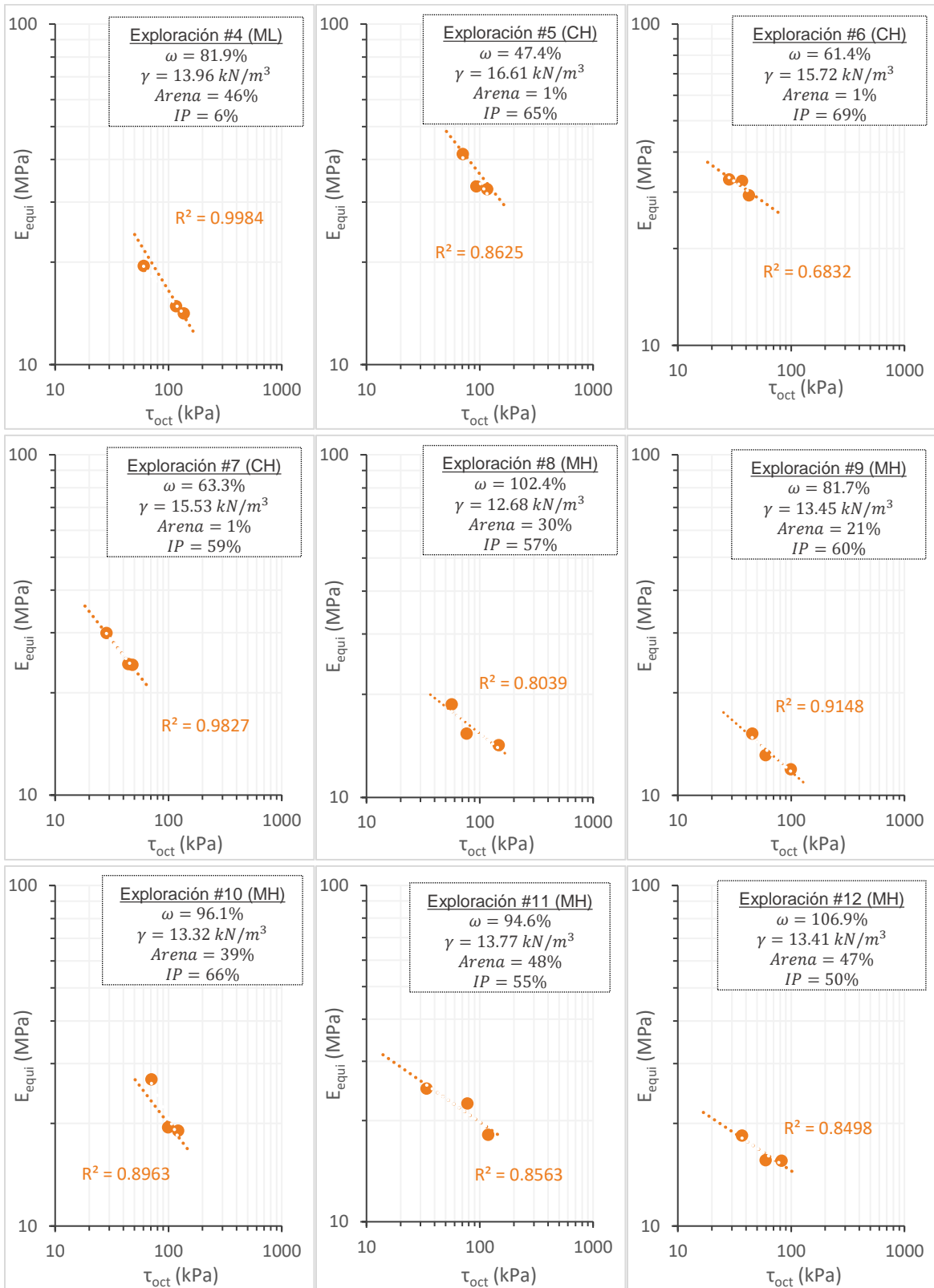
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.2. Modelo Universal

En las gráficas mostradas a continuación (Figura 5.25) se presenta el comportamiento del E_{equi} frente al cortante octaédrico (τ_{oct}) para todas las muestras evaluadas en la investigación. En general, es posible observar la dependencia del E_{equi} frente a esta variable (En la mayoría de los casos $R^2 > 0.7$), independientemente de cambios en las diferentes características del suelo, como lo son la humedad, el peso unitario, la granulometría y la plasticidad.



Continúa la figura



Continúa la figura

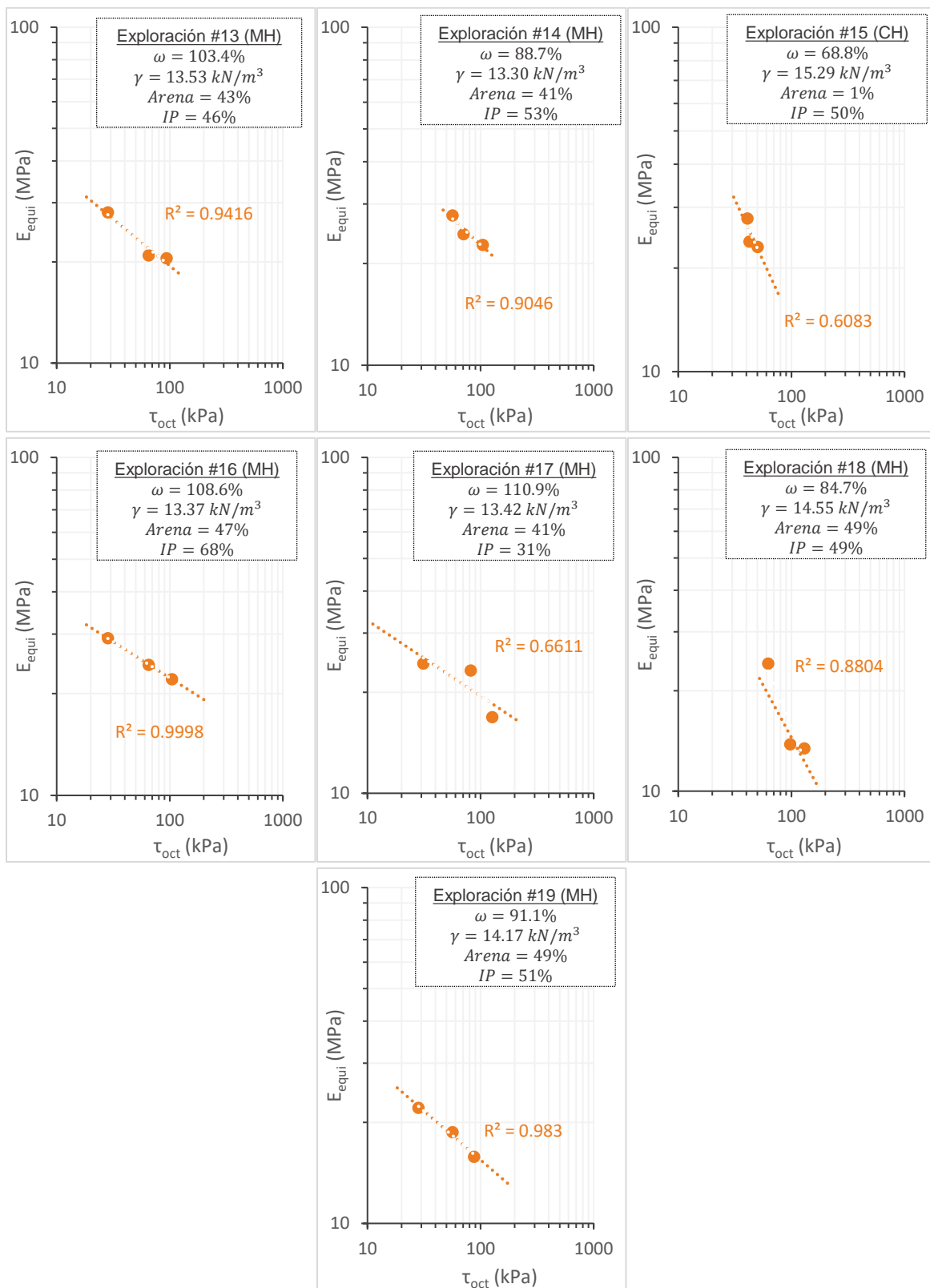


Figura 5.25 Resultados individuales de E_{equi} Vs τ_{oct} para todas las 19 muestras de estudio

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma que sucedió con los resultados de M_r , se observa que el E_{equi} está influenciado por el τ_{oct} y, por ende, se demuestra que el *modelo universal* (Ecuación 5-7) puede ser una opción adecuada para analizar el E_{equi} . En la Tabla 5.10 se presentan los valores de las constantes experimentales k_1 , k_2 y k_3 del modelo, así como los valores R^2 , al comprar los valores de E_{equi} obtenidos en el laboratorio respecto a los calculados con el modelo (Gráficas en la Figura 5.26).

Tabla 5.10 Valor constantes experimentales modelo universal ensayo cCBR

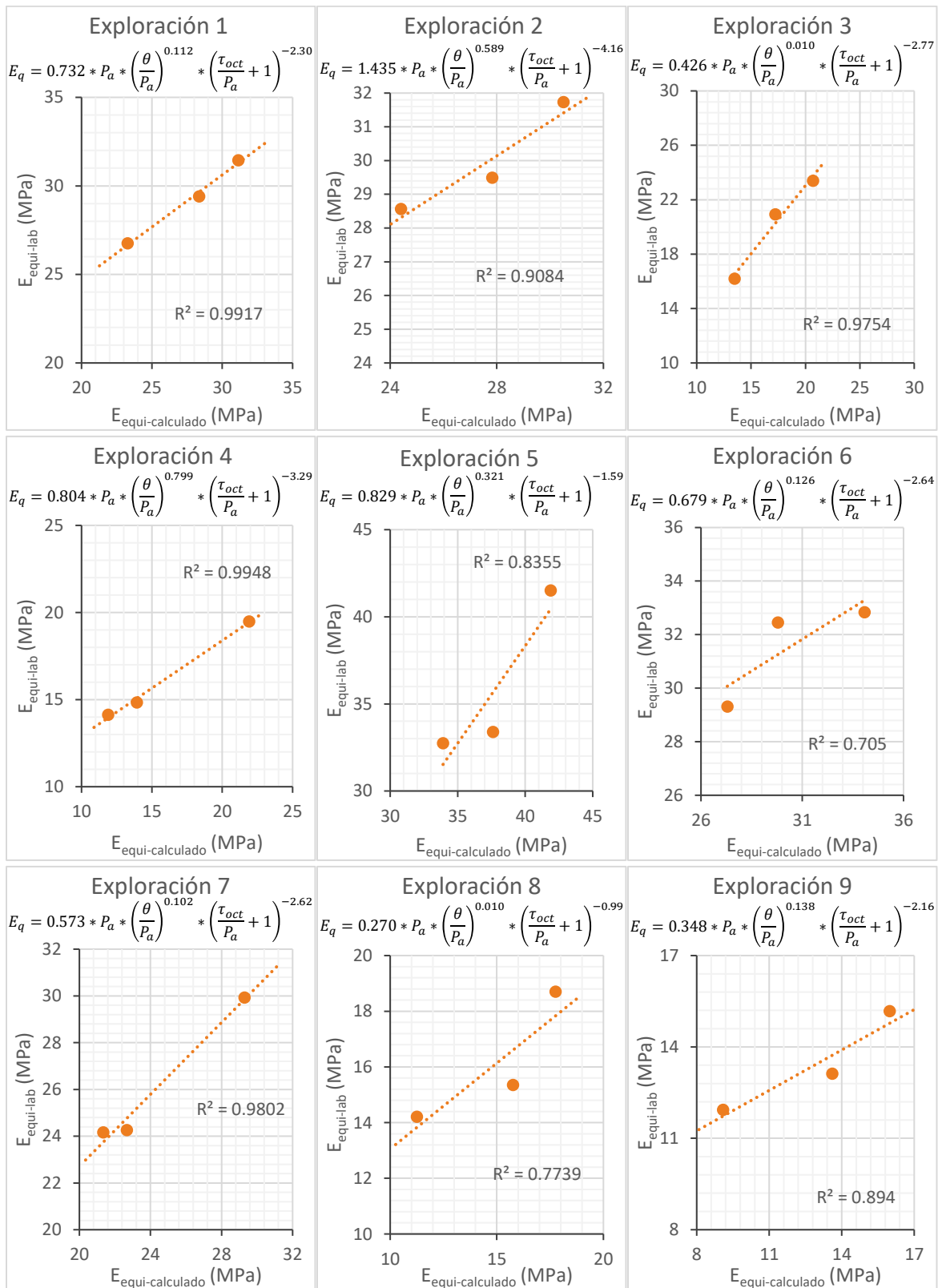
Exploración	SUCS	k_1	k_2	k_3	R^2
1	CH	0.732	0.112	-2.30	0.992
2	CH	1.435	0.589	-4.16	0.908
3	CH	0.426	0.010	-2.77	0.975
4	ML	0.804	0.799	-3.29	0.995
5	CH	0.829	0.321	-1.59	0.836
6	CH	0.679	0.126	-2.64	0.705
7	CH	0.573	0.102	-2.62	0.980
8	MH	0.270	-0.010	-0.99	0.774
9	MH	0.348	0.138	-2.16	0.894
10	MH	0.412	0.154	-1.25	0.879
11	MH	0.536	0.220	-2.03	0.905
12	MH	0.475	0.190	-2.51	0.840
13	MH	0.340	0.096	-0.99	0.887
14	MH	0.601	0.587	-2.11	0.817
15	CH	0.420	-0.171	-1.73	0.601
16	MH	0.498	0.201	-1.58	0.975
17	MH	0.449	0.453	-1.91	0.871
18	MH	0.395	0.125	-1.61	0.874
19	MH	0.306	-0.015	-1.16	0.997

Fuente: Elaboración propia

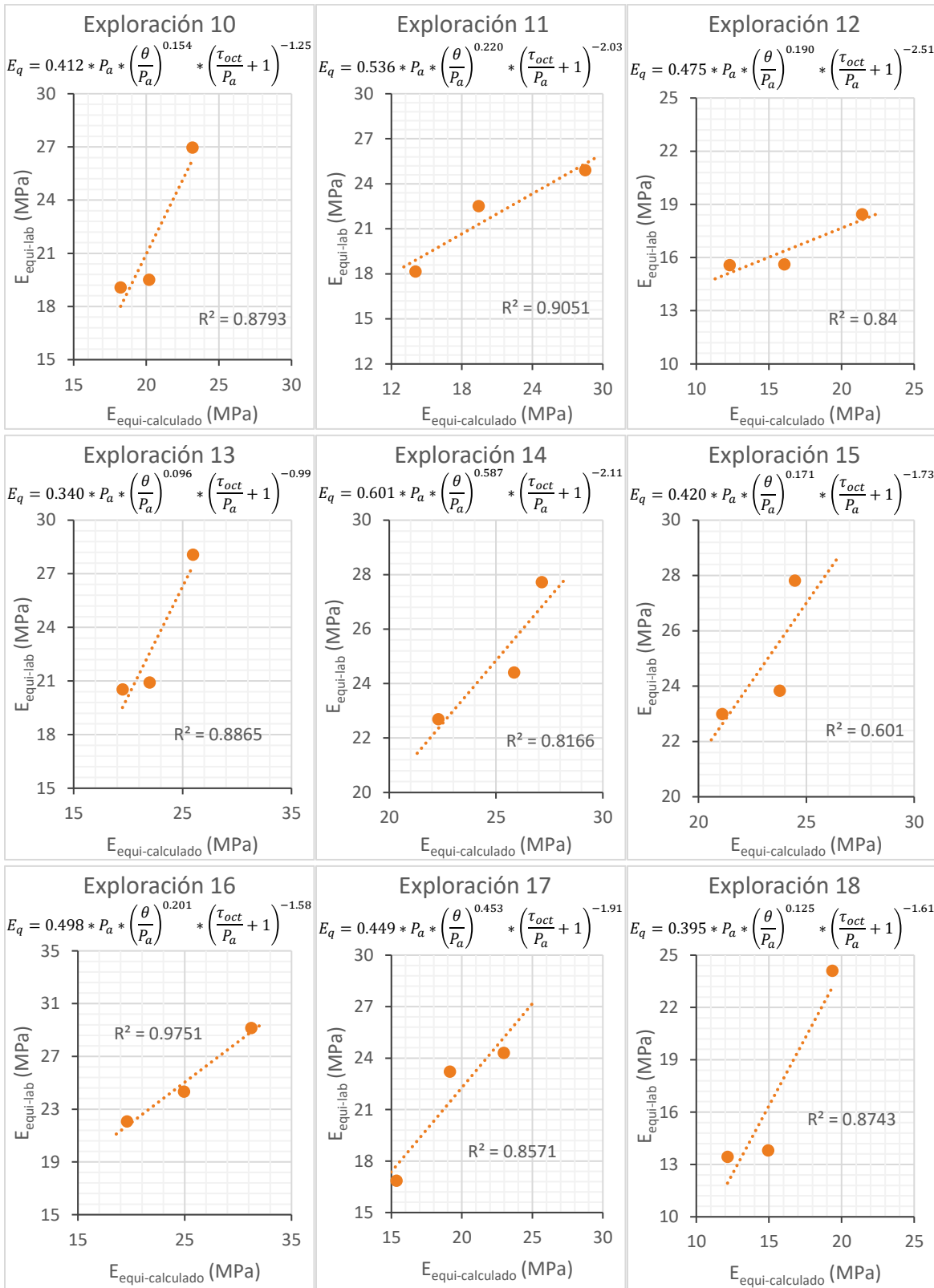
A partir de la Tabla 5.10 se puede establecer que los valores de las constantes experimentales presentan un comportamiento similar al obtenido mediante el ensayo M_r , en otras palabras, los valores de k_1 y k_2 en su mayoría son positivos y los de k_3 son negativos.

Nuevamente se presenta en algunas exploraciones valores de k_2 negativos, los cuales presentan una correlación no esperada entre el módulo y el esfuerzo "Bulk", sin embargo, son valores cercanos a cero. Cabe resaltar que este comportamiento se presentó en las exploraciones 15 y 19 al igual que sucedió en el ensayo de M_r .

Por otra parte, se puede observar que los valores de k_1 varían entre 0.270 y 1.435; la constante k_2 entre -0.171 y 0.799, y k_3 entre -4.16 y -0.99. Respecto a k_1 y k_3 , los rangos son similares a los obtenidos en los modelos establecidos a partir del ensayo de M_r . No obstante, en contraste, el E_{equi} parece estar más influenciado por el esfuerzo "Bluk", ya que en promedio el valor de k_2 fue 0.212 en los ensayos de cCBR y de 0.092 en los ensayos de M_r . Este comportamiento posiblemente se atribuye al hecho de que se asumió un valor de presión de cámara dependiente del esfuerzo desviador (Capítulo 3).



Continúa la figura



Continúa la figura

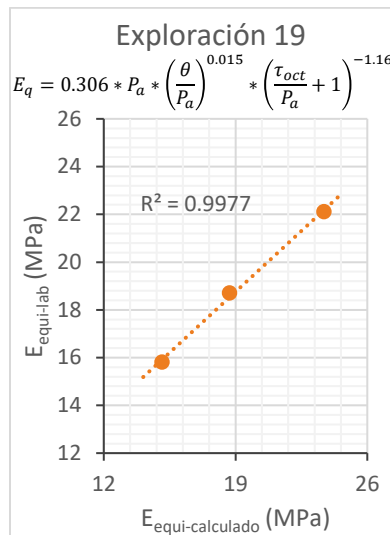


Figura 5.26 Comparación E_{equi} obtenido en el laboratorio Vs E_{equi} calculado mediante el modelo universal para todas las 19 muestras de estudio

Fuente: Elaboración propia

Nuevamente se buscó establecer un modelo único para los suelos de subrasante de la ciudad, un modelo para las arcillas y uno para los limos, sin embargo, dada la ya conocida heterogeneidad de las muestras, no fue posible establecer una buena correlación (Figura 5.27).

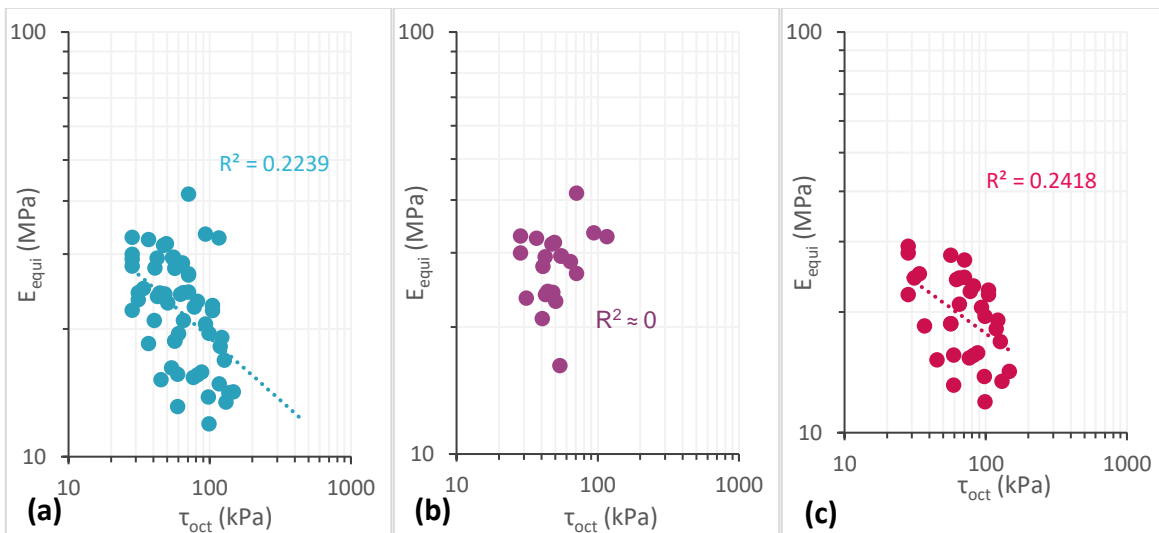


Figura 5.27 Resultados en conjunto de E_{equi} Vs τ_{oct} para todas las 19 muestras de estudio: (a) Todas las muestras, (b) Muestras arcilla y (c) Muestras limo

Fuente: Elaboración propia

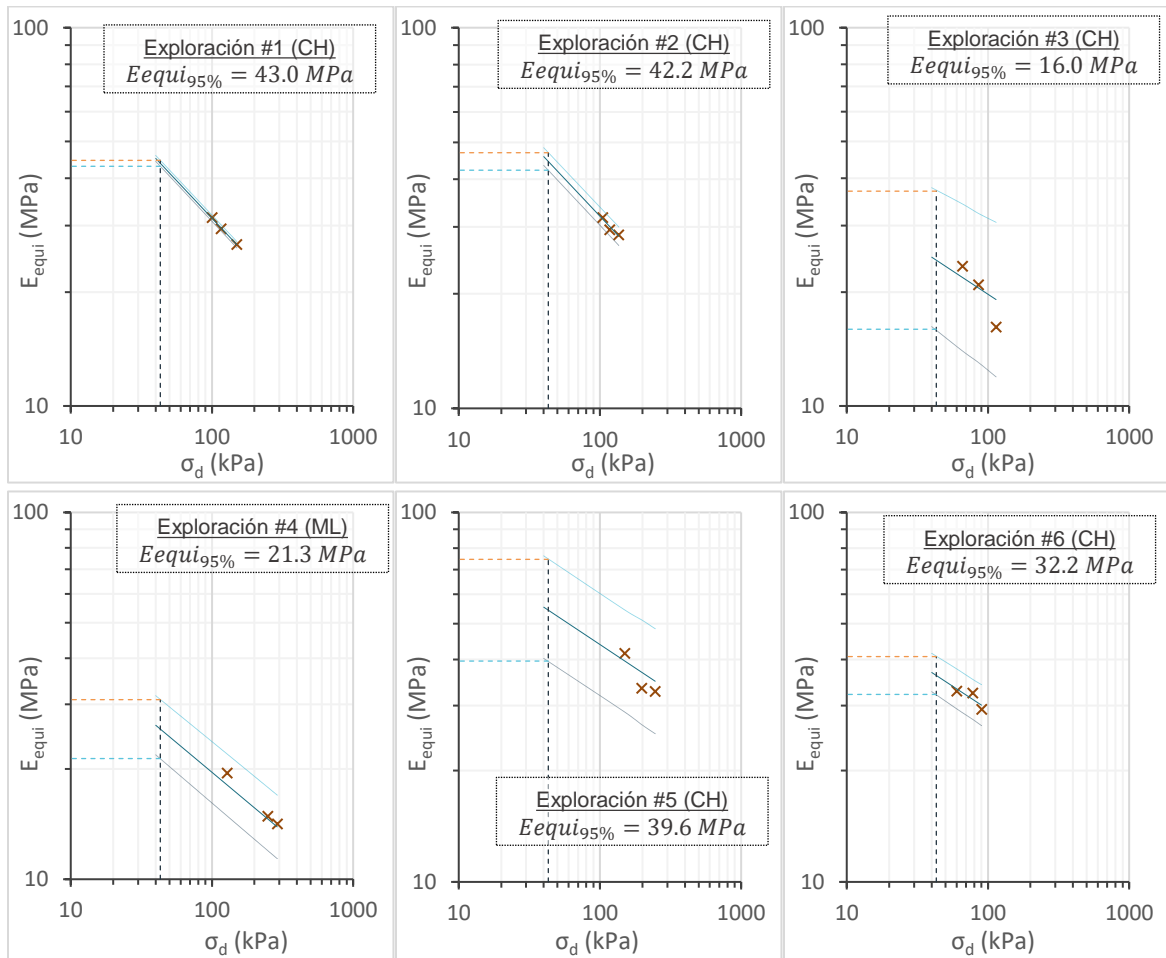
Finalmente, para el caso del ensayo cCBR tanto el *modelo Universal* como el *modelo $k - \sigma_d$* presentan un valor promedio de R^2 0.879, con lo cual se puede decir que ambos modelos tienen un buen ajuste y no hay uno mejor que el otro.

5.3.2. Cálculo E_{equi} a un nivel de esfuerzos

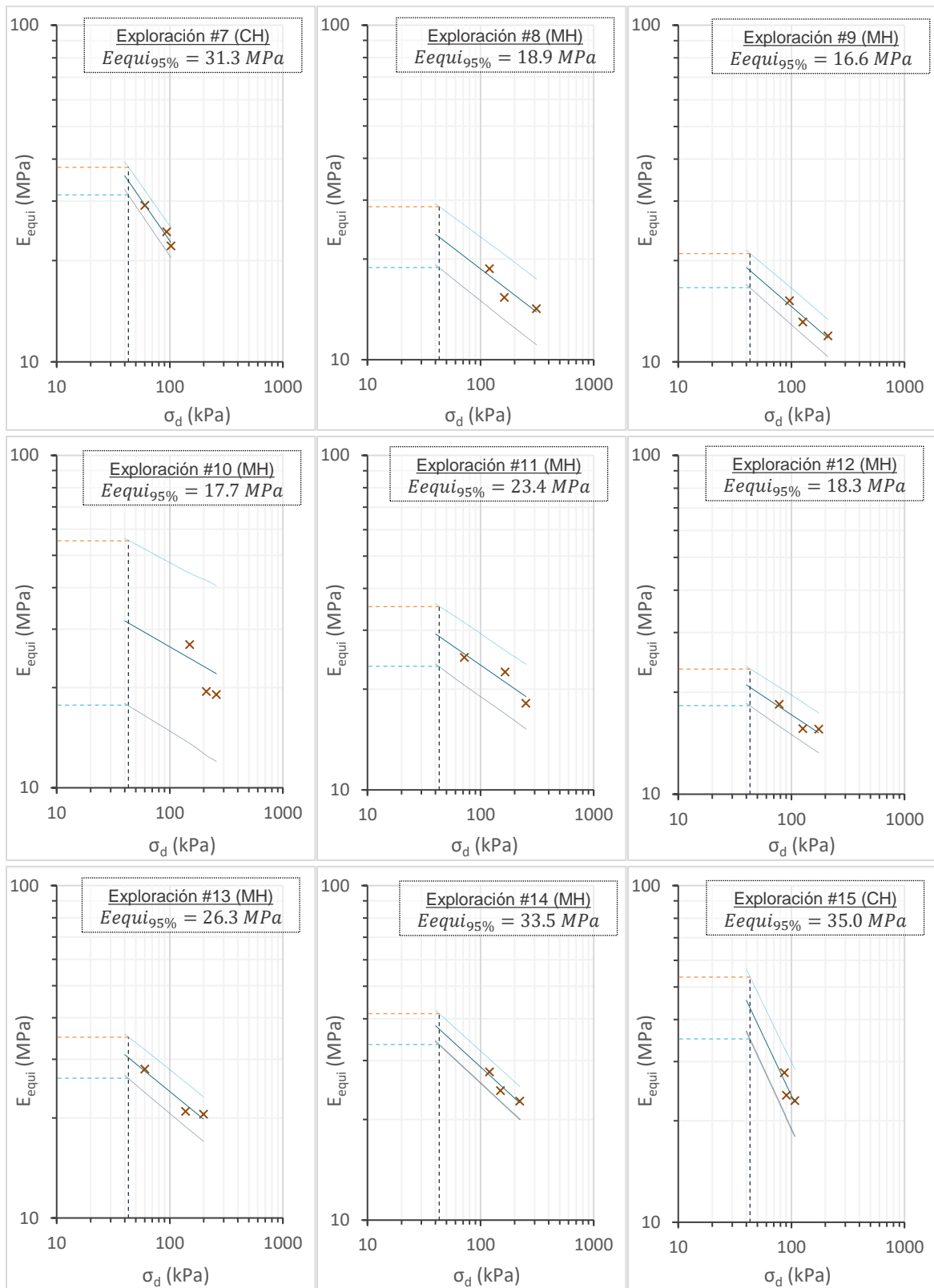
De igual manera que se realizó mediante los resultados de los ensayo de M_r , se procedió a determinar el valor de E_{equi} al nivel de esfuerzos representativo mencionado en el numeral 5.2.2, bajo el mismo principio de *intervalo de predicción* (Figura 5.12), y al mismo nivel de confiabilidad (95%).

5.3.2.1. Modelo $k - \sigma_d$

En la Figura 5.28 se presentan las gráficas correspondientes a los resultados de E_{equi} e intervalos de predicción, con un 95% de confiabilidad, de las 19 muestras usando el *modelo $k - \sigma_d$* .



Continúa la figura



Continúa la figura

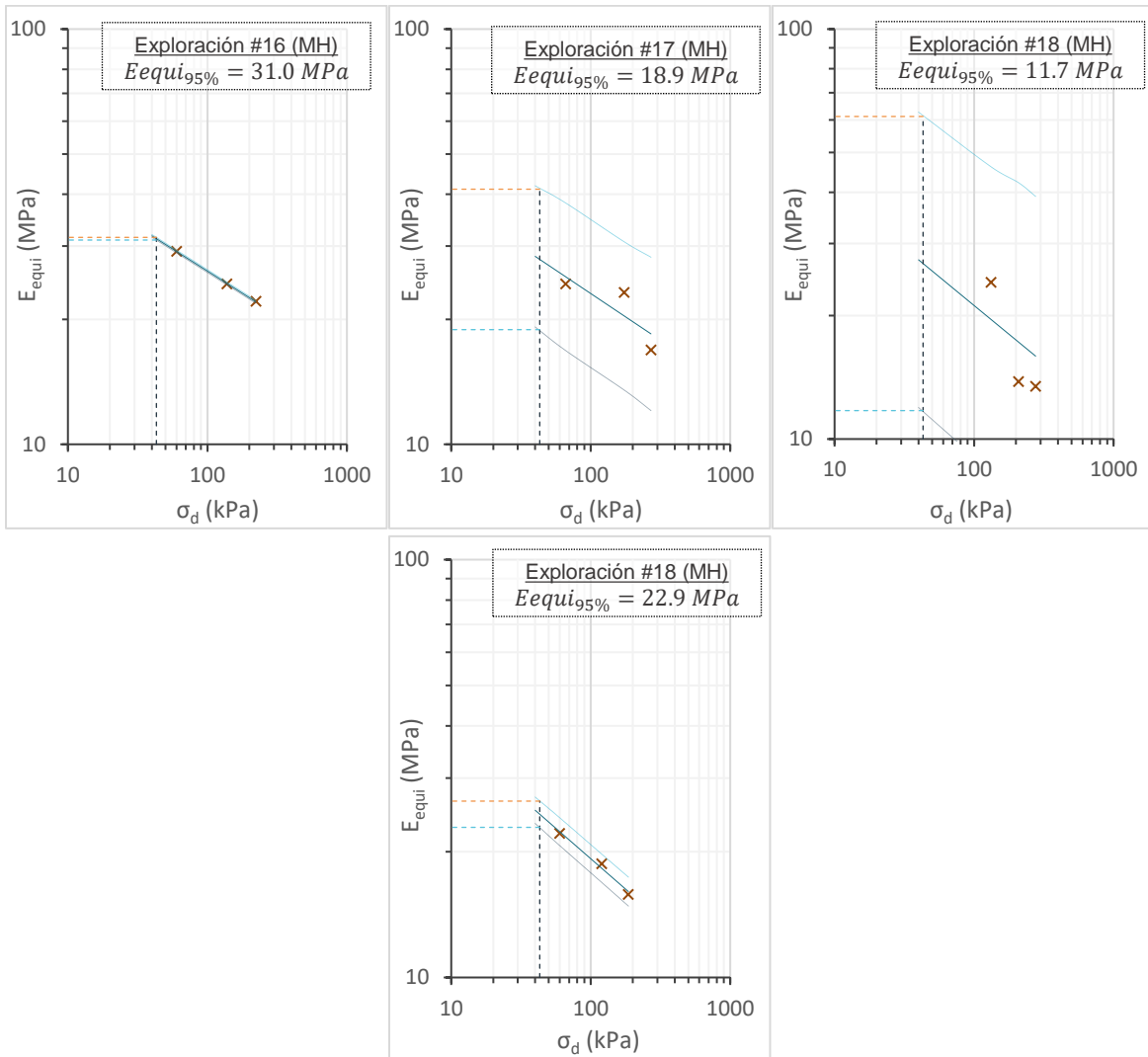
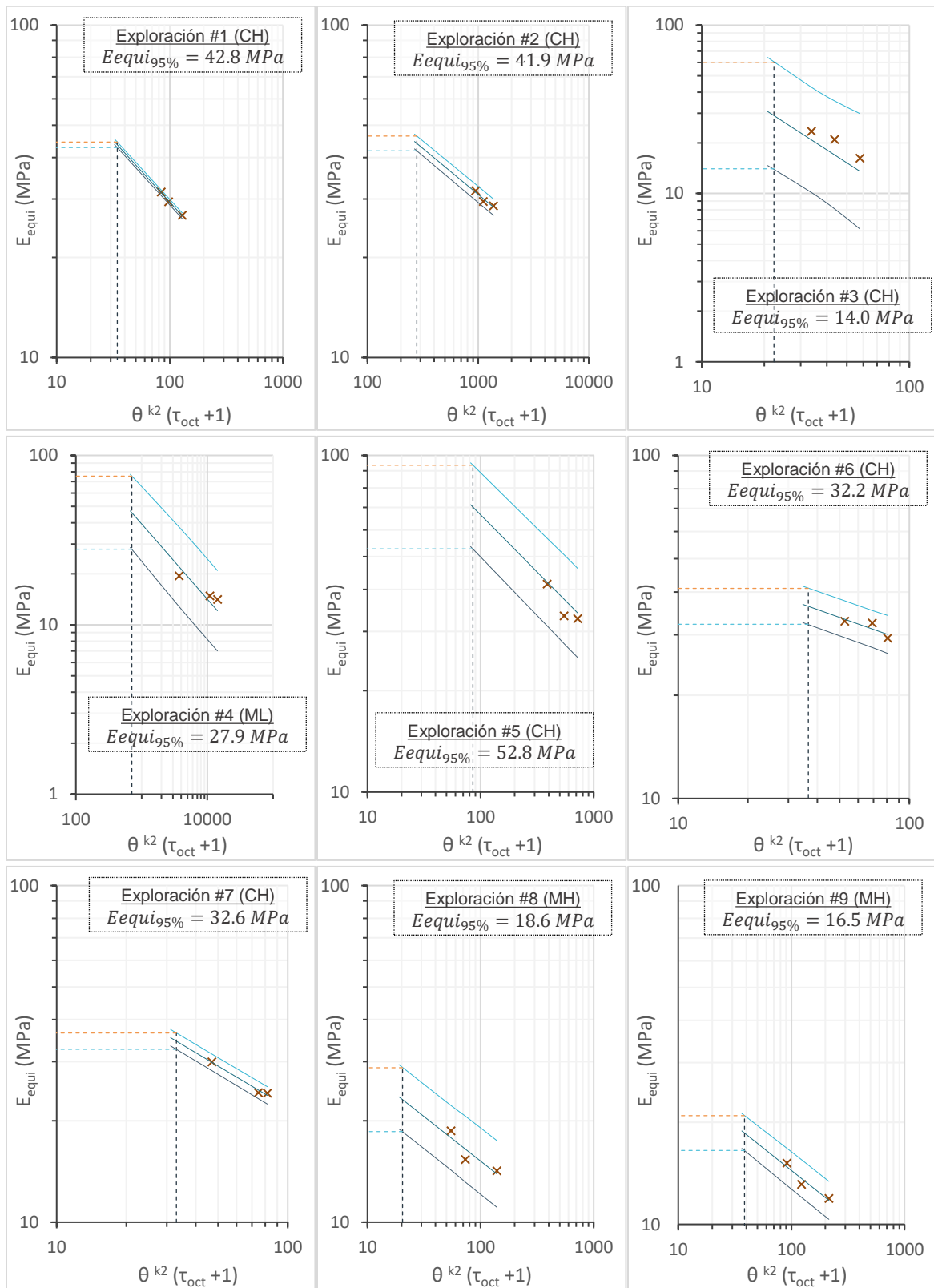


Figura 5.28 Resultados individuales de intervalos de predicción y E_{equi} con 95% de confiabilidad para todas las 19 muestras de estudio mediante el *modelo $k-\sigma_d$*

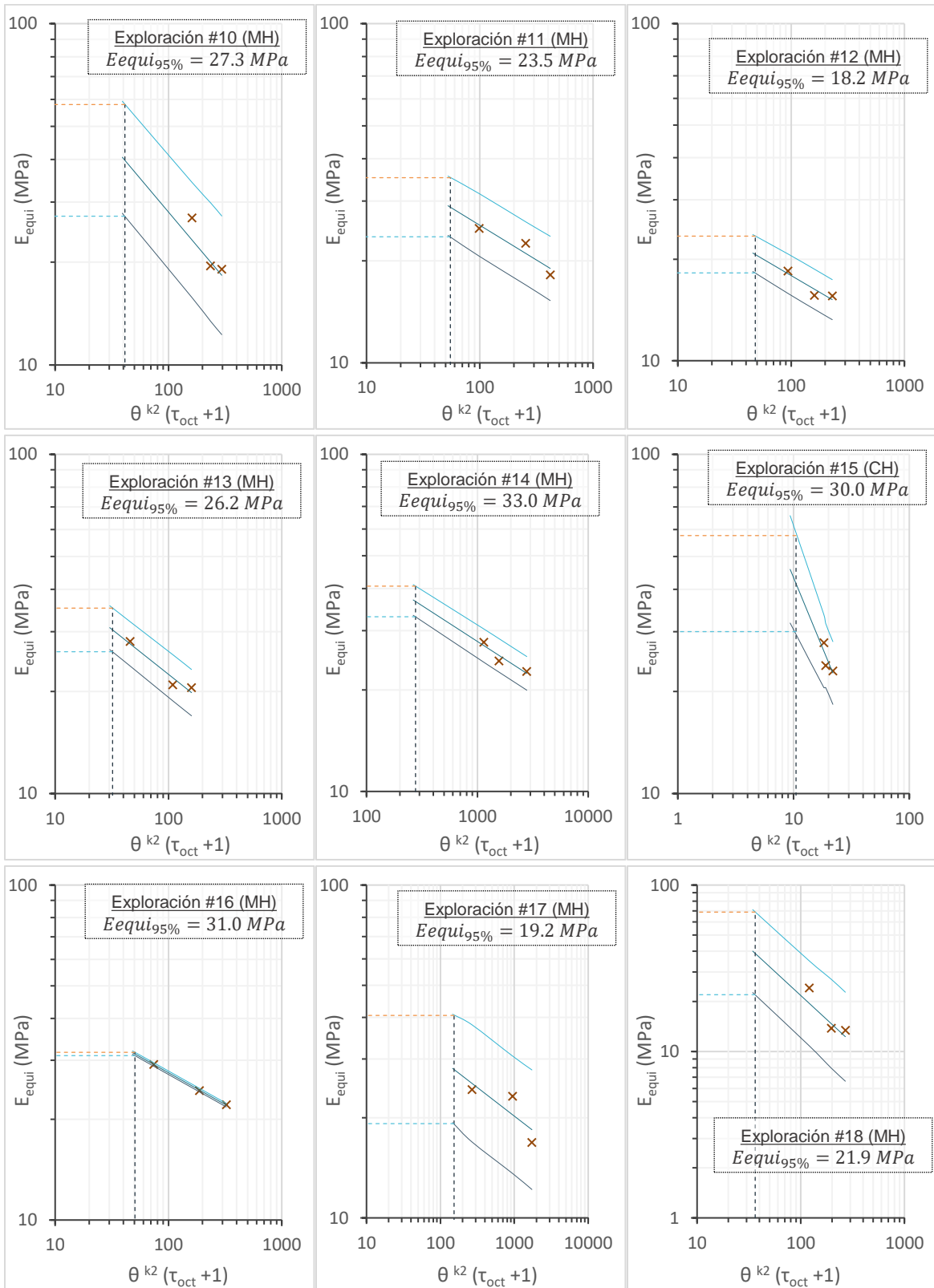
Fuente: Elaboración propia

5.3.2.2. Modelo Universal

Por su parte, en la Figura 5.29 se presentan las gráficas correspondientes a los resultados de E_{equi} e intervalos de predicción, con un 95% de confiabilidad, de las 19 muestras trabajadas, usando el *modelo universal* presentado en la Ecuación 5-10.



Continúa la figura



Continúa la figura

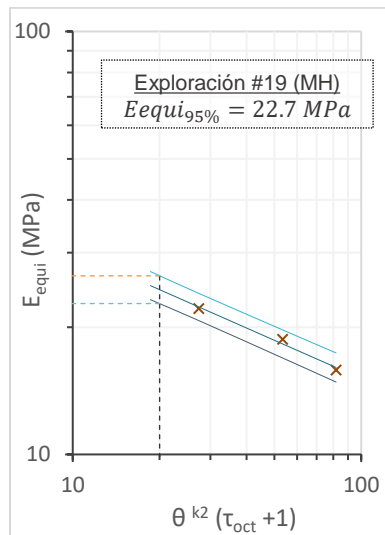


Figura 5.29 Resultados individuales de intervalos de predicción y E_{equi} con 95% de confiabilidad para todas las 19 muestras de estudio mediante el *modelo universal*

Fuente: Elaboración propia

5.3.2.3. Comparación entre modelos constitutivos

En la Figura 5.30 y en la Tabla 5.11 se presentan los resultados de E_{equi} obtenidos mediante los dos modelos constitutivos seleccionados; tal como se observa, los resultados son similares en la mayoría de las exploraciones. Se puede establecer que en el caso de las exploraciones 5, 10 y 18 existe una diferencia marcada, sin embargo, no es posible atribuirle dicho comportamiento a alguna característica del suelo en particular, ya que las tres muestras son diferentes entre ellas.

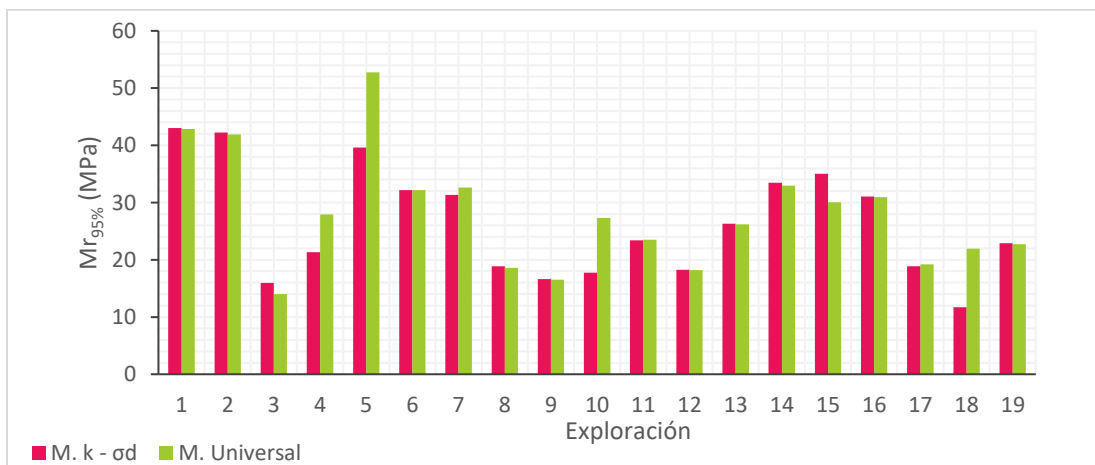


Figura 5.30 Comparación de los valores de E_{equi} mediante el modelo k- σ_d y el modelo universal

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.11 Resultados de E_{equi} con 95% de confiabilidad mediante modelo $k - \sigma_d$ y modelo universal

Exploración	SUCS	M. $k - \sigma_d$ $Mr_{95\%}$ (MPa)	M. Universal $Mr_{95\%}$ (MPa)
1	CH	43.0	42.8
2	CH	42.2	41.9
3	CH	16.0	14.0
4	ML	21.3	27.9
5	CH	39.6	52.8
6	CH	32.2	32.2
7	CH	31.3	32.6
8	MH	18.9	18.6
9	MH	16.6	16.5
10	MH	17.7	27.3
11	MH	23.4	23.5
12	MH	18.3	18.2
13	MH	26.3	26.2
14	MH	33.5	33.0
15	CH	35.0	30.0
16	MH	31.0	31.0
17	MH	18.9	19.2
18	MH	11.7	21.9
19	MH	22.9	22.7

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, estos resultados también demuestran la baja resistencia de los suelos de subrasante estudiados y su gran heterogeneidad, conclusiones similares a las obtenidas mediante el análisis de los resultados de los ensayos de Mr .

5.3.2.4. Comparación con los resultados del ensayo Mr

Dado que tanto para el ensayo de Mr como de cCBR se halló un valor de módulo para un mismo nivel de esfuerzos (Con 95% de confiabilidad), y que fue posible para cada material ejecutar ambos ensayos, se pueden comparar los resultados de estos análisis.

Tal como se observa en la Figura 5.31 y en la Figura 5.32, se obtuvieron valores de módulo similares mediante ambas ensayos, en ambos modelos constitutivos, para casi todas las exploraciones. Se puede resaltar que la diferencia más drástica se presenta en el modelo $k - \sigma_d$ para la exploración 18, no obstante, en el resto los valores son similares.

A partir de lo anterior y teniendo en cuenta que los módulos fueron calculados a un nivel de esfuerzos característico, el cual da como resultado un valor de *módulo de diseño*, es posible observar que mediante el ensayo de cCBR es posible obtener una estimación del módulo resiliente para el diseño de pavimentos, con una confiabilidad del 95%.

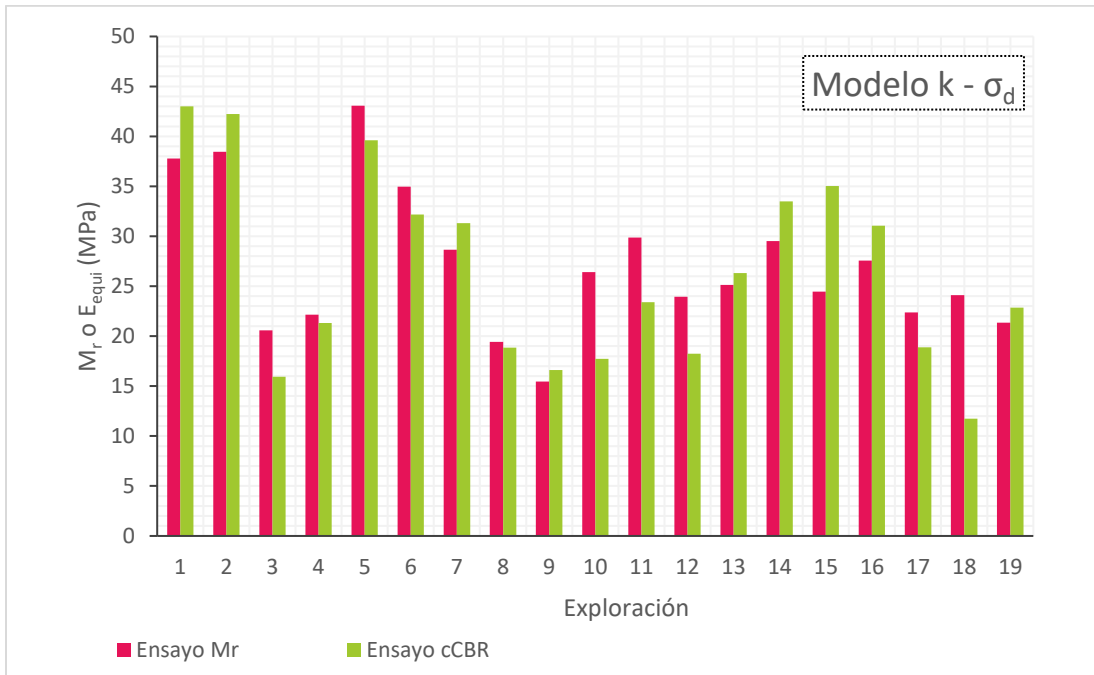


Figura 5.31 Comparación valor de Mr y E_{equi} con 95% de confiabilidad mediante modelo k- σ_d

Fuente: Elaboración propia

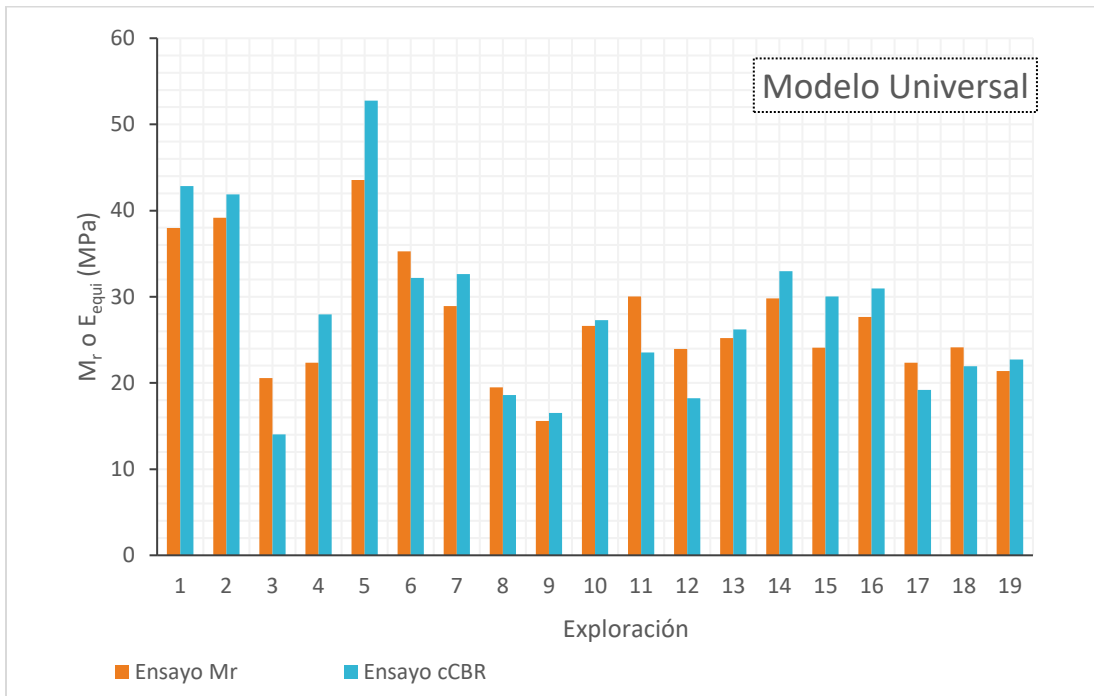


Figura 5.32 Comparación valor de Mr y E_{equi} con 95% de confiabilidad mediante modelo universal

Fuente: Elaboración propia

5.3.3. Influencia de las características físicas del suelo en el valor de E_{equi}

Dadas las similitudes entre los resultados entre el M_r y el E_{equi} , se esperaría que los comportamientos reportados en la teoría para el módulo resiliente respecto a las diferentes propiedades de los suelos sean iguales para el E_{equi} .

Respecto a la densidad, se sabe que a medida que esta aumenta la rigidez del suelo también lo hace, dicho de otro modo, a medida que la relación de vacíos disminuye el módulo aumenta. Esta tendencia fue posible observarla analizando el módulo equivalente, tal como se muestra en la Figura 5.33.

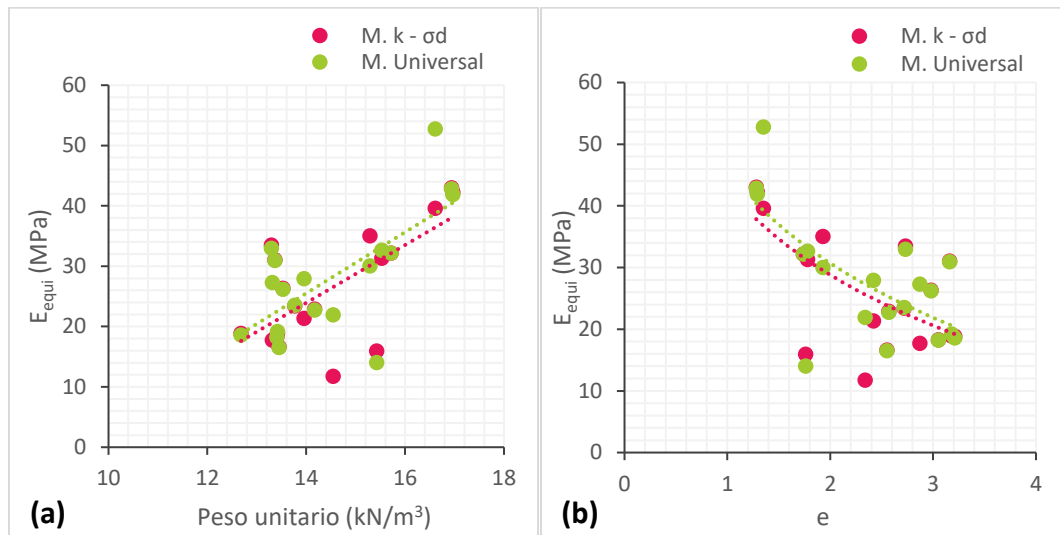


Figura 5.33 Valores de E_{equi} (mediante ambos modelos) Vs (a) peso unitario y (b) relación de vacíos de las muestras

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, tal como se observa en la Figura 5.34, la humedad afecta negativamente el módulo equivalente, lo cual corrobora un comportamiento igual al presentado por el M_r . Por el contrario, cuando se analiza el efecto del contenido de arena en el E_{equi} , se puede observar que su influencia no es tan fuerte como sí sucedía en el módulo resiliente (Figura 5.35).

Adicionalmente, tal como se presenta en las gráficas de la Figura 5.36, el módulo equivalente tampoco se ve influenciado notoriamente por el límite líquido o el índice de plasticidad.

Finalmente, tal como sucedió en el análisis del ensayo de M_r , es posible observar tendencias entre el E_{equi} y algunas propiedades del suelo, pero en ninguna ocasión existe una buena correlación entre ellos. Esto quiere decir que, como es de esperarse, el módulo

equivalente de un suelo tampoco es función de una sola característica, sino que se ve influenciado por varias propiedades en simultáneo.

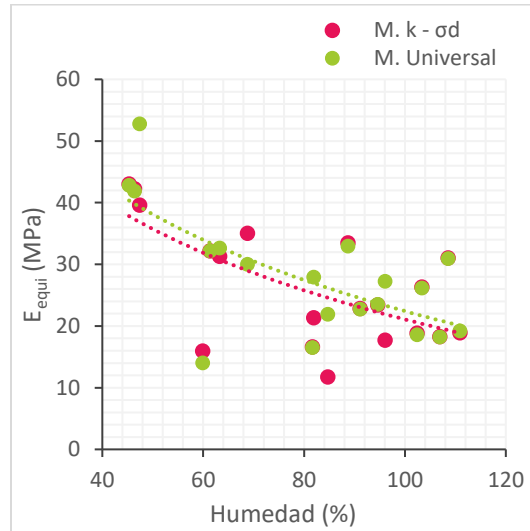


Figura 5.34 Valores de E_{equi} (mediante ambos modelos) Vs Humedad

Fuente: Elaboración propia

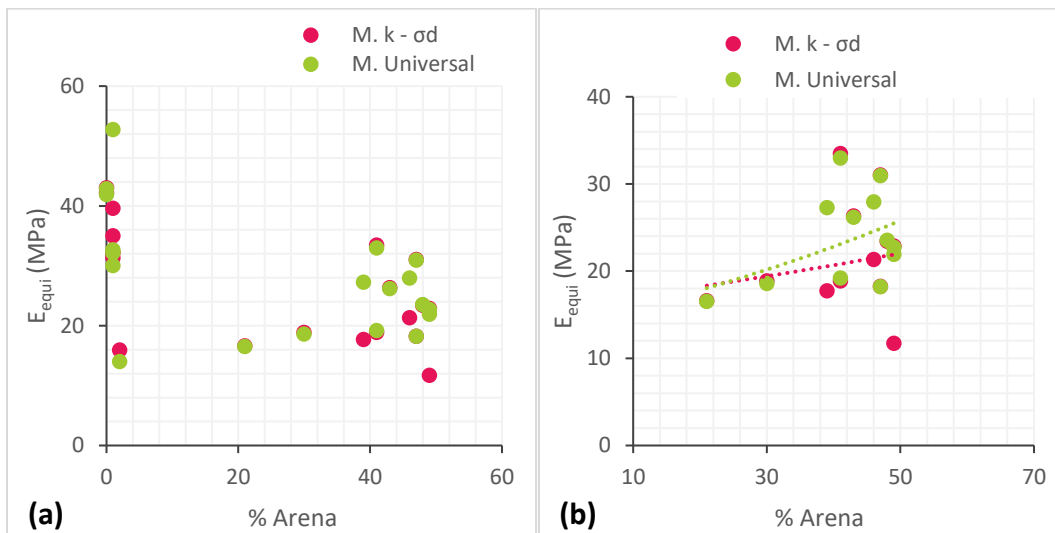


Figura 5.35 Valores de E_{equi} (mediante ambos modelos) Vs % arena de (a) todas las muestras y (b) muestras como elevados contenidos de arena

Fuente: Elaboración propia

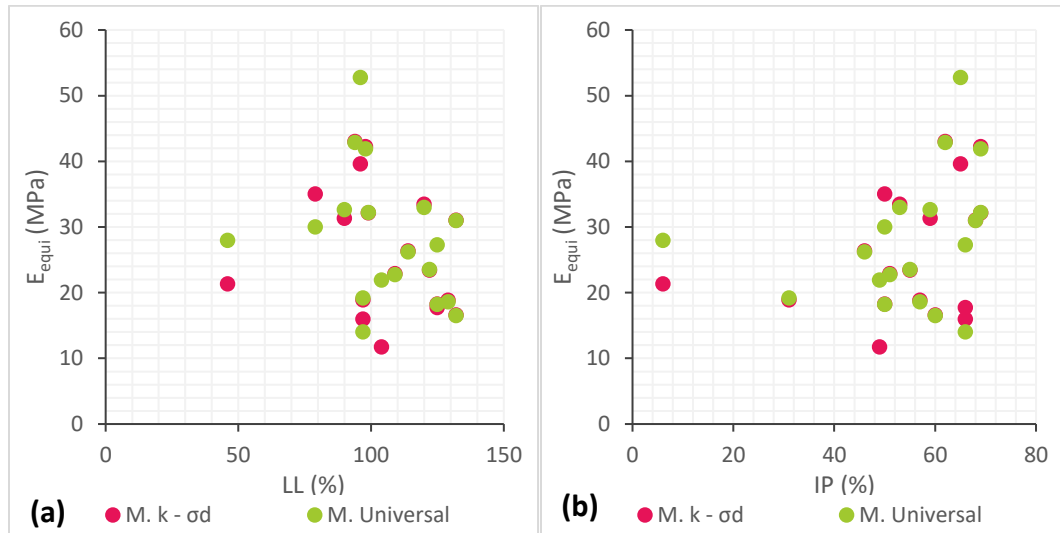


Figura 5.36 Valores de E_{equi} (mediante ambos modelos) Vs (a) Límite líquido (LL) e (b) Índice de plasticidad (IP) de las muestras

Fuente: Elaboración propia

5.4. Verificación y validación del módulo equivalente (E_{equi})

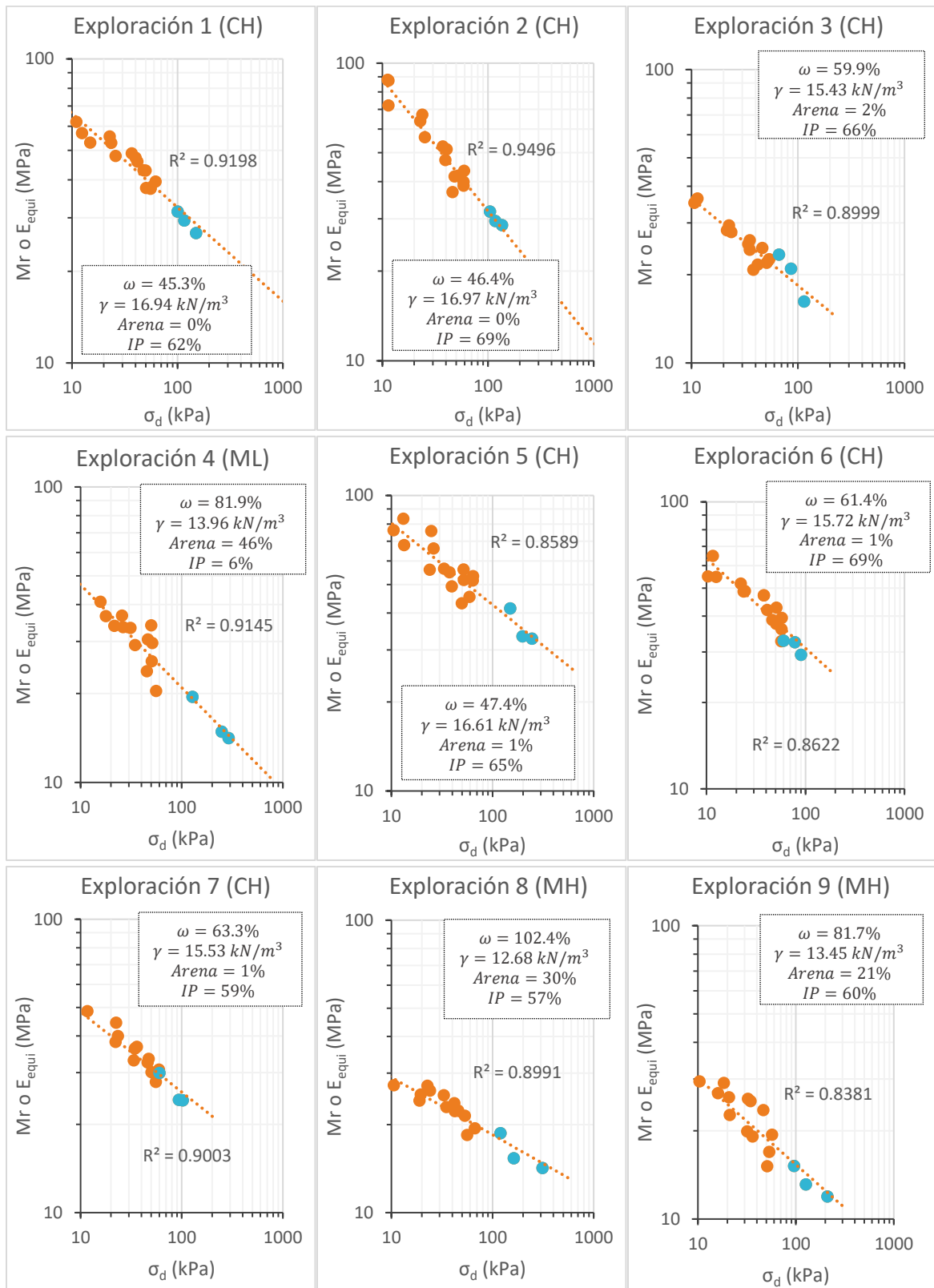
En esta investigación, tal como se ha evidenciado, se realizó una caracterización mecánica de algunos suelos de subrasante de la ciudad de Bogotá haciendo uso de ensayos triaxiales cíclicos y ensayos CBR cíclicos, todo con el fin de desarrollar una técnica de caracterización simple de dicho comportamiento mecánico. Está claro que para validar las teorías que se desarrollaron y la determinación del E_{equi} a partir de los ensayos cCBR, las predicciones hechas por estas teorías deben verificarse sobre la base del M_r de la prueba triaxial cíclica.

Dado que las condiciones de esfuerzo son diferentes en las dos configuraciones de ensayo, la verificación es relativa y compara únicamente las tendencias, puesto que, tal como lo establece Araya (2011), no es posible una verificación pura “*uno a uno*” entre los valores absolutos del E_{equi} y las mediciones del M_r .

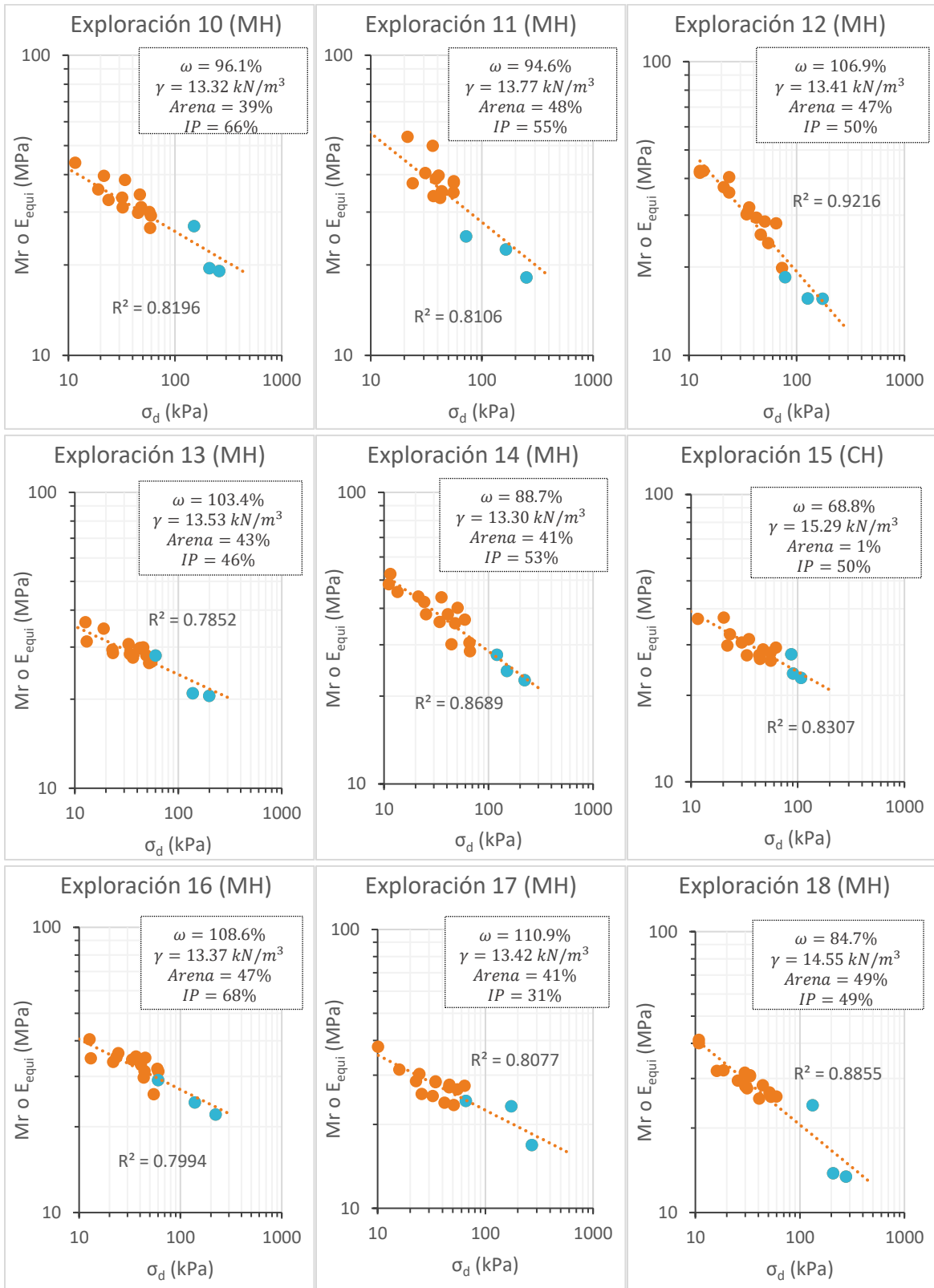
A partir de lo anterior, la verificación y validación del ensayo cCBR se realizó en dos etapas: en la primera se determinó la calidad del ajuste estadístico al evaluar el comportamiento del módulo resiliente y del módulo equivalente en conjunto respecto a σ_d y a τ_{oct} ; y en la segunda se utilizaron los *intervalos de predicción* con el fin de evaluar los modelos constitutivos obtenidos mediante el cCBR con los obtenidos en los ensayos de M_r .

5.4.1. Determinación del ajuste estadístico

En la Figura 5.37 se presentan los ajustes correspondientes al M_r y E_{equi} respecto al σ_d .



Continúa la figura



Continúa la figura

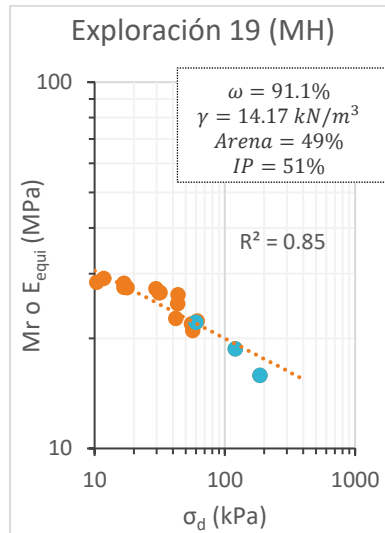
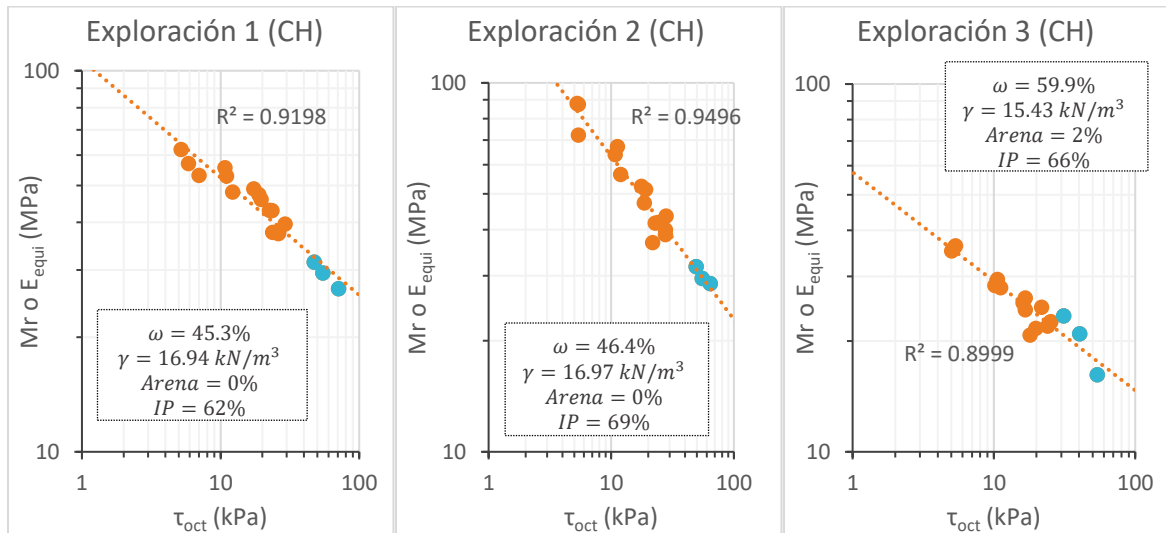


Figura 5.37 Mr (●) y E_{equi} (●) Vs esfuerzo desviador para las 19 muestras de estudio

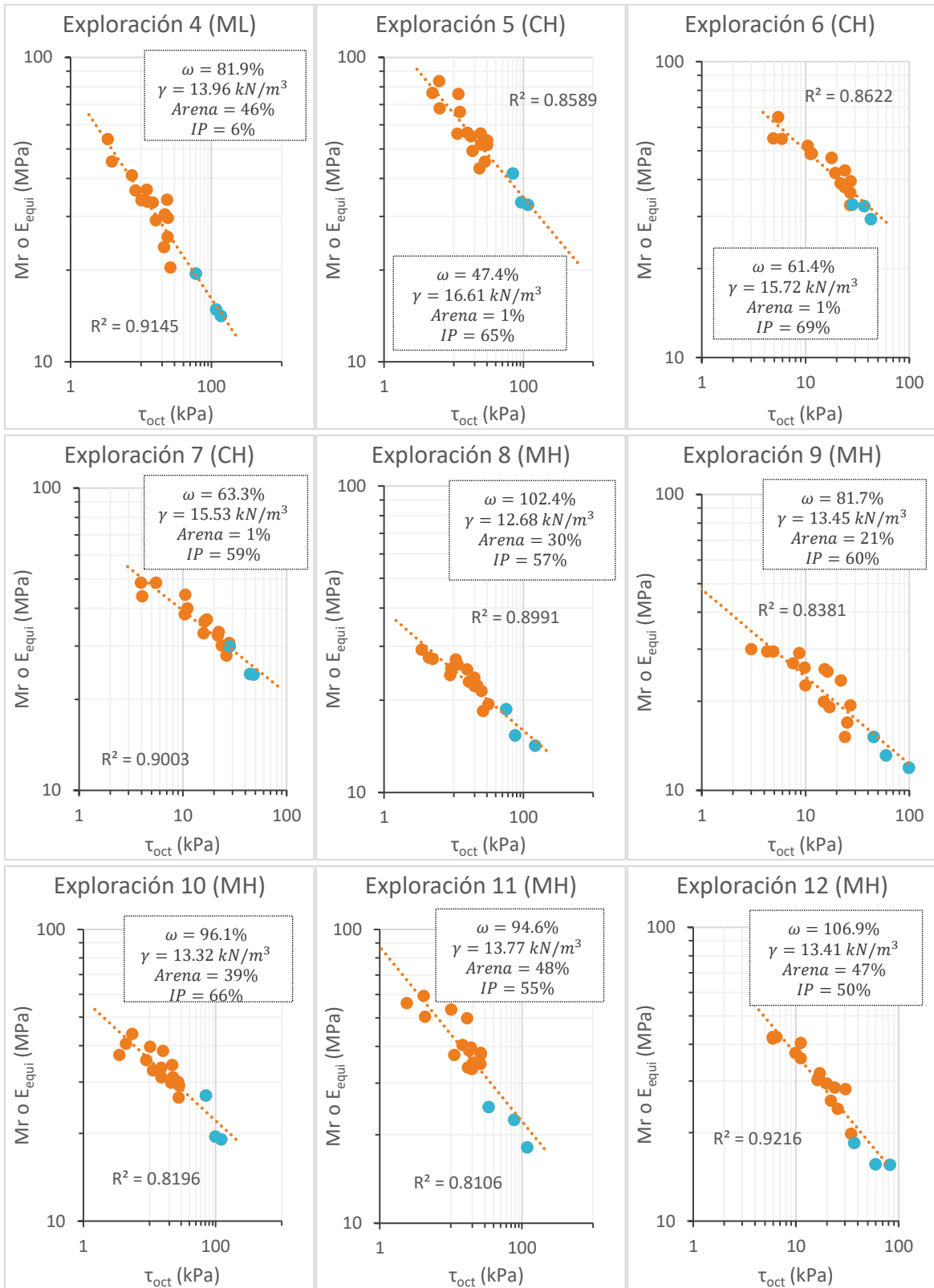
Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en la Figura 5.38 se presentan los respectivos ajustes respecto a τ_{oct} . Es posible observar en ambos escenarios, que el módulo equivalente es un valor de rigidez a niveles de esfuerzo mayores, particularmente de esfuerzo desviador, a los contemplados en el ensayo de Mr y, en general, presentan un buen ajuste al trabajarlos en conjunto. Dicho de otro modo, de ser posible la ejecución de ambos ensayos en una muestra de suelo se puede conocer el comportamiento de módulo resiliente en un rango de esfuerzos más amplio.

Las anteriores observaciones indican que, al menos de forma preliminar, el ensayo cCBR es capaz de proveer una buena estimación del módulo de rigidez de los suelos de subsrasante aquí estudiados.



Continúa la figura



Continúa la figura

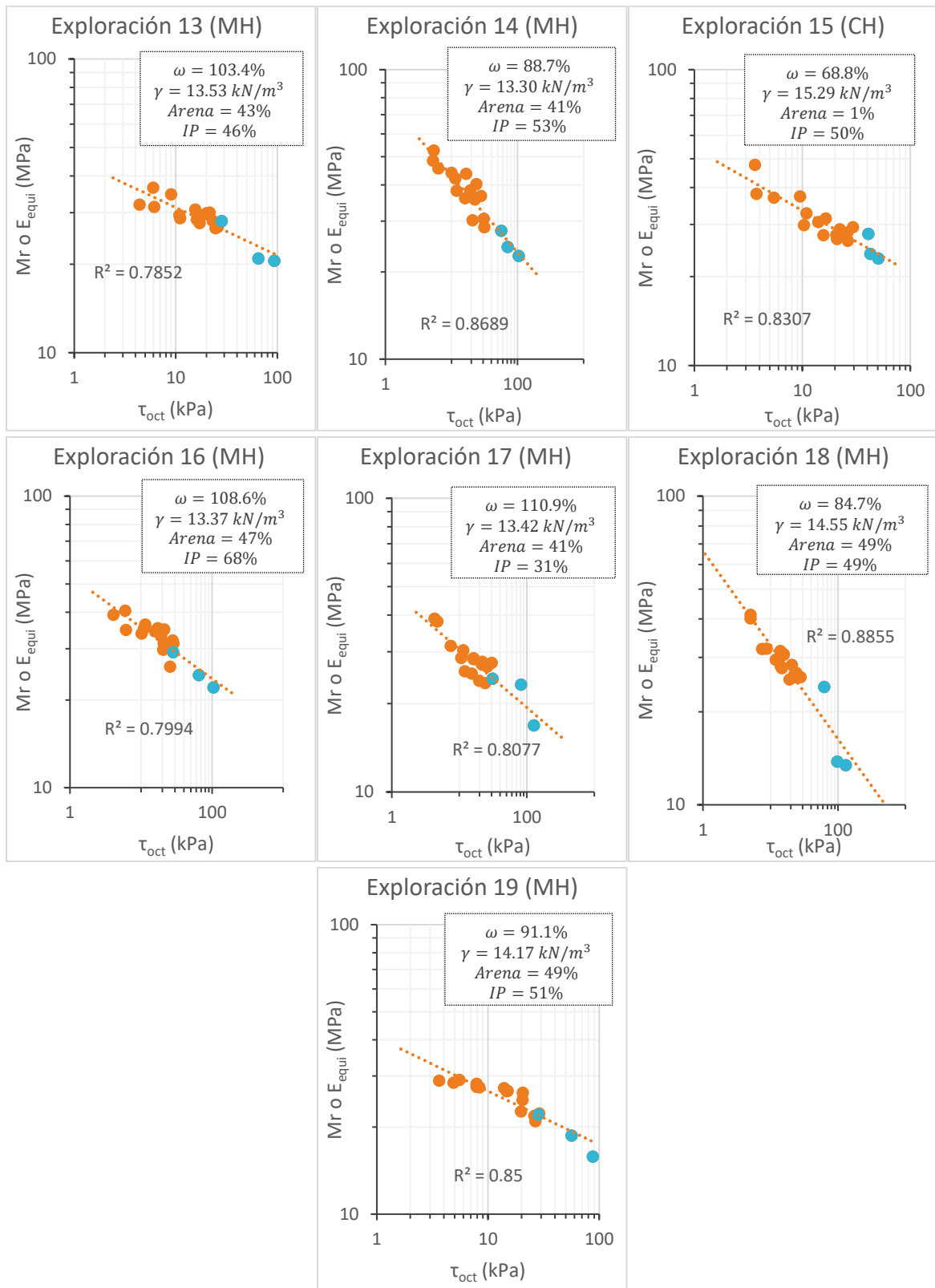


Figura 5.38 Mr (●) y E_{equi} (●) Vs cortante octaédrico para las 19 muestras de estudio

Fuente: Elaboración propia

5.4.2. Evaluación mediante intervalos de predicción

Una vez establecida la buena correlación entre el módulo (Resiliente o equivalente), σ_d y τ_{oct} , se sabe que es viable el siguiente paso del análisis, el cual es utilizar los intervalos de predicción obtenidos mediante el ensayo Mr (Sección 5.3.2.1) y los modelos constitutivos de los ensayos cCBR (Sección 5.3.1).

Este paso de verificación y validación consiste en graficar los intervalos de predicción a partir de los resultados del ensayo de Mr (Figura 5.39a); posteriormente, utilizando el modelo constitutivo ($k - \sigma_d$ o universal) obtenido del ensayo de cCBR, se calculan los módulos resilientes a los mismos niveles de esfuerzo del ensayo Mr. Se considera que el modelo constitutivo presentado en el cCBR es adecuado para determinar el Mr a bajos niveles de esfuerzo, si dichos valores calculados caen dentro de los intervalos de predicción (Figura 5.39b).

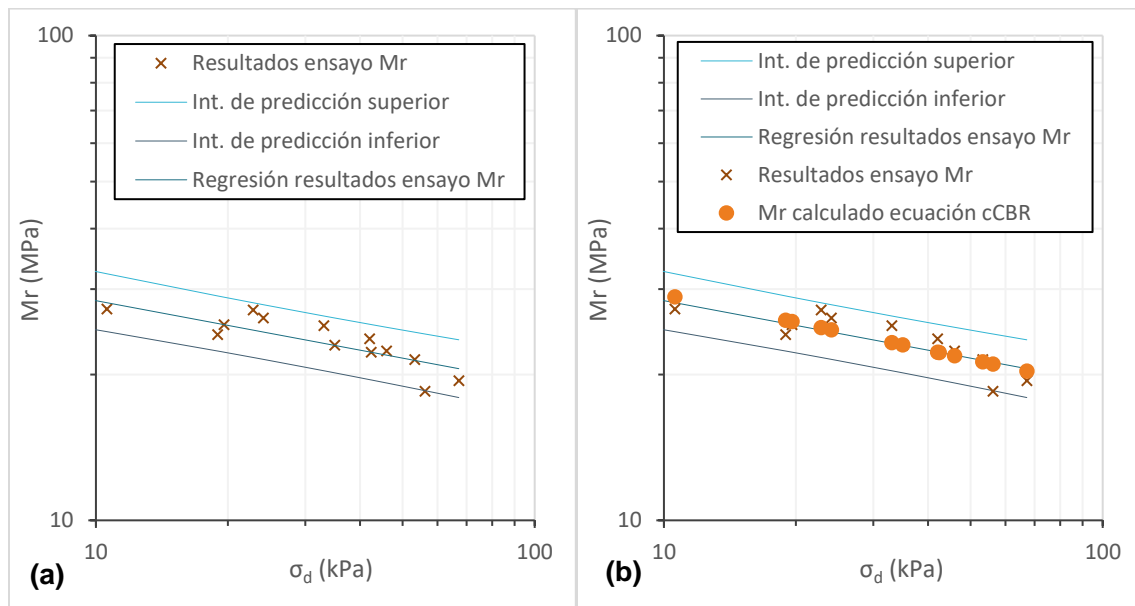
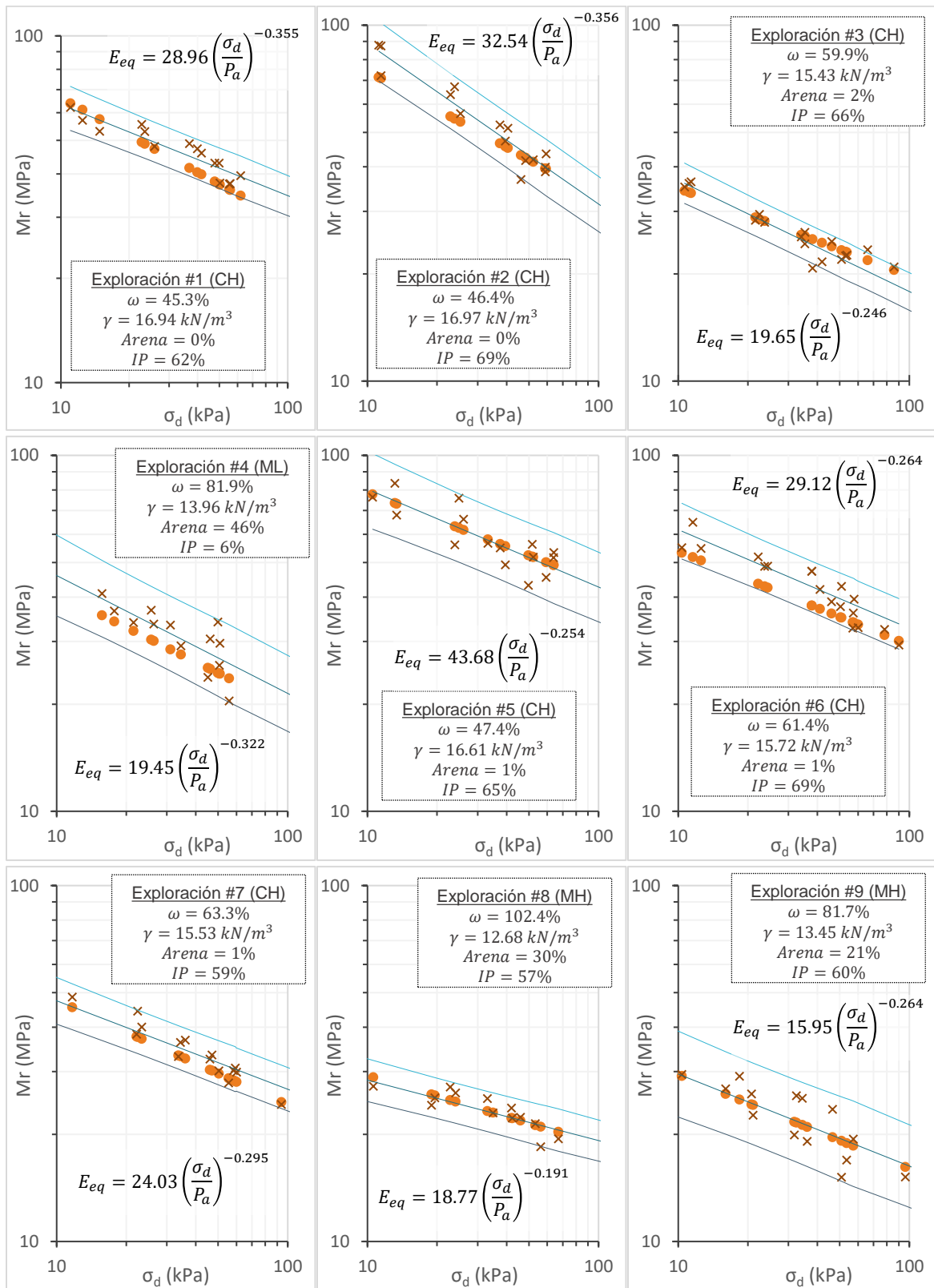


Figura 5.39 Ejemplo gráfico de (a) Intervalos de predicción y regresión, (b) Ajuste de predicción de la ecuación constitutiva de cCBR

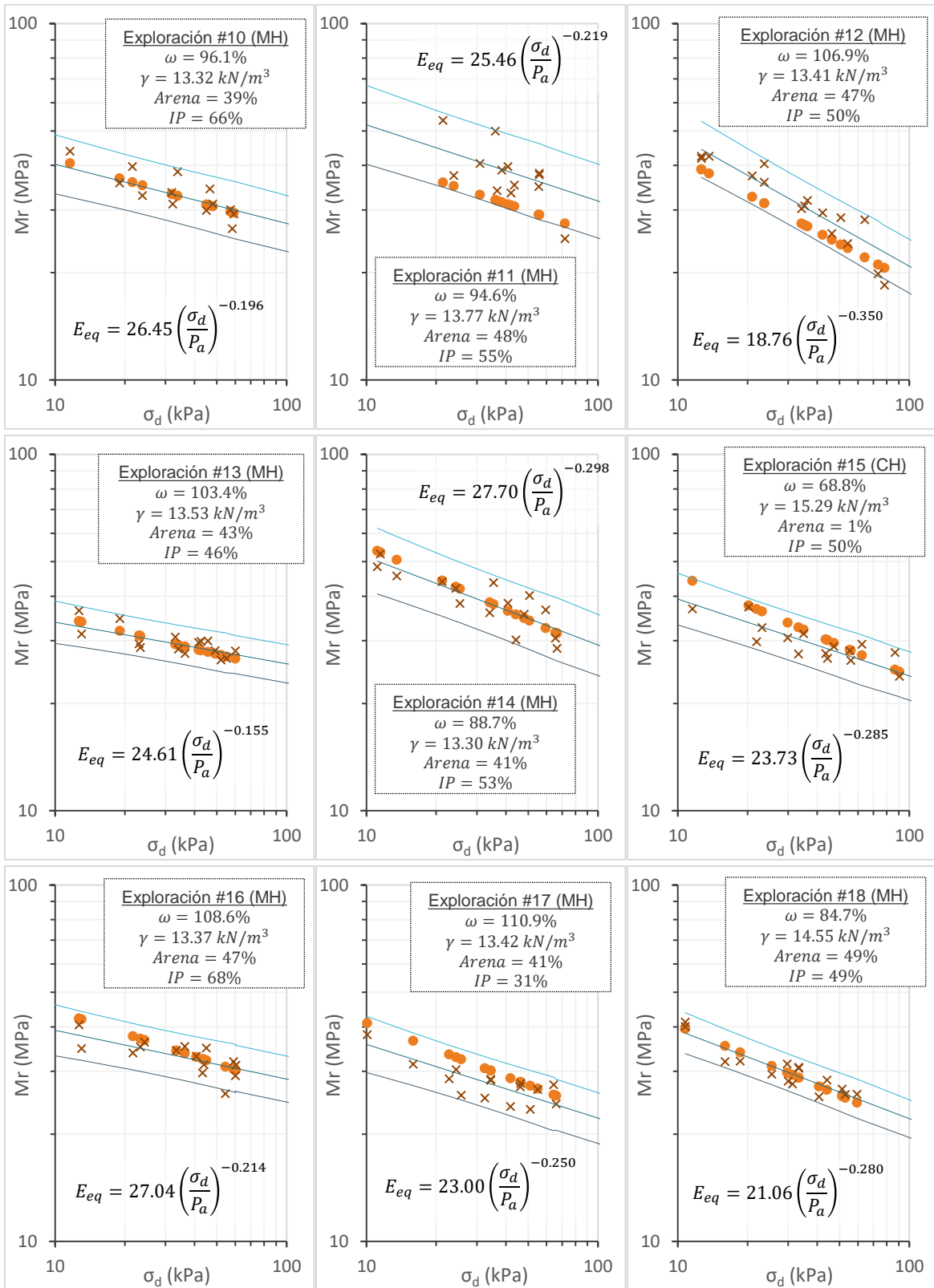
Fuente: Elaboración propia

5.4.2.1. Modelo $k - \sigma_d$

En las gráficas de la Figura 5.40 se presentan los resultados del análisis de validación por medio de intervalos de predicción para todas las muestras de estudio mediante el modelo $k - \sigma_d$. A partir de los resultados, es posible observar el ensayo cCBR permite llegar a buenas estimaciones de los valores de módulo a niveles de esfuerzo menores, como los trabajados en el ensayo de Mr.



Continúa la figura



Continúa la figura

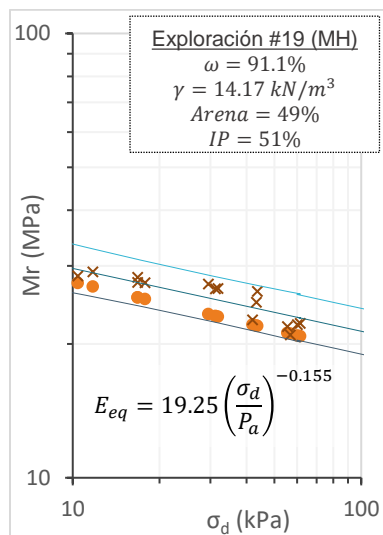


Figura 5.40 Intervalos de predicción y validación del modelo $k-\sigma_d$ del ensayo cCBR de las muestras

Fuente: Elaboración propia

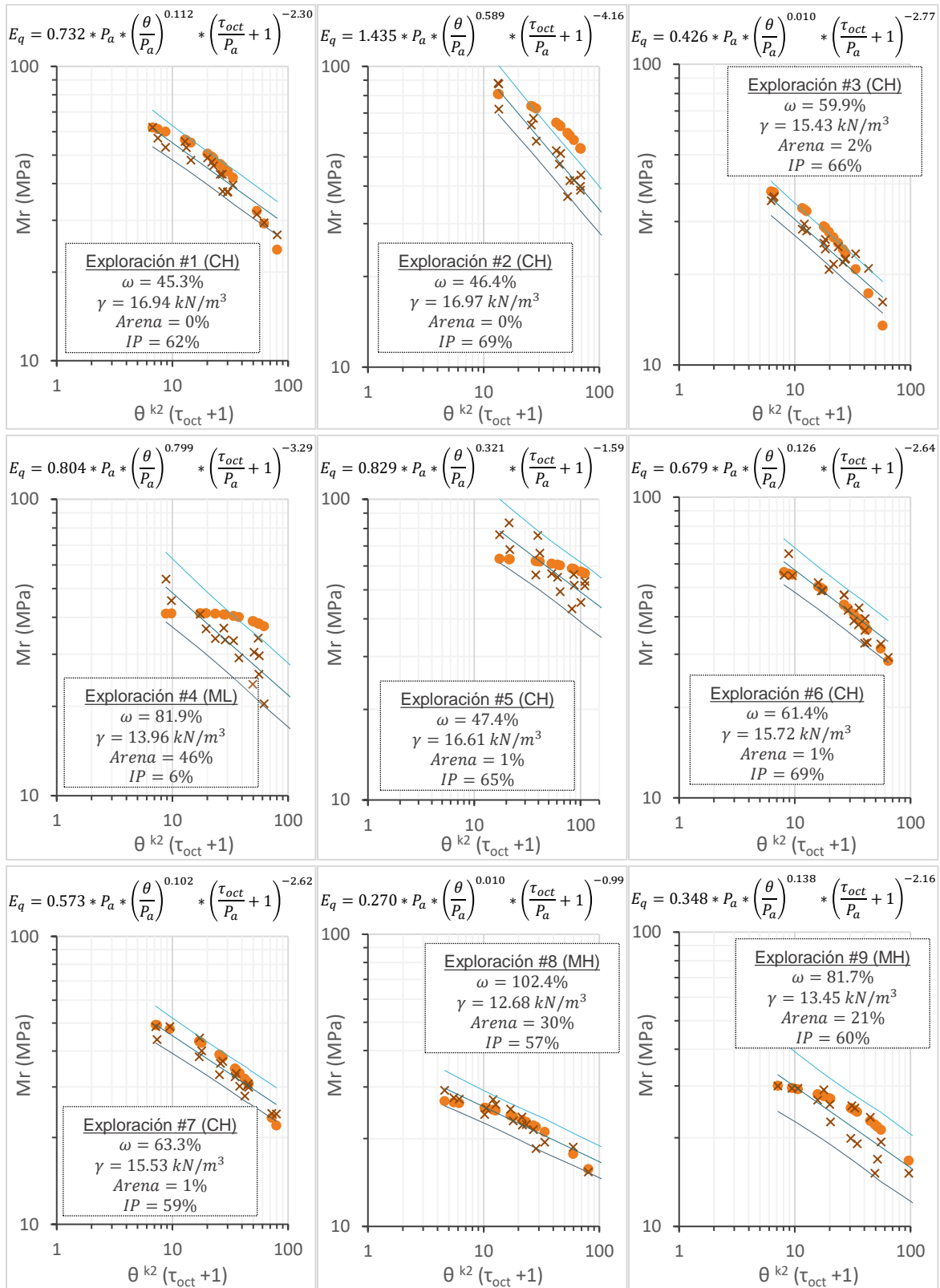
5.4.2.2. Modelo Universal

Tal como se mencionó en el numeral 5.2.2.2, dado que el *modelo universal* presenta una ecuación que depende de dos variables (τ_{oct} y θ), es necesario fijar una de las dos, y así volver el modelo únicamente dependiente de un esfuerzo, ya que así lo requiere la metodología de intervalos de predicción. Nuevamente, se hará uso de la Ecuación 5-10, la cual fue el resultado de fijar el valor del esfuerzo de confinamiento (σ_3) al valor representativo (14kPa).

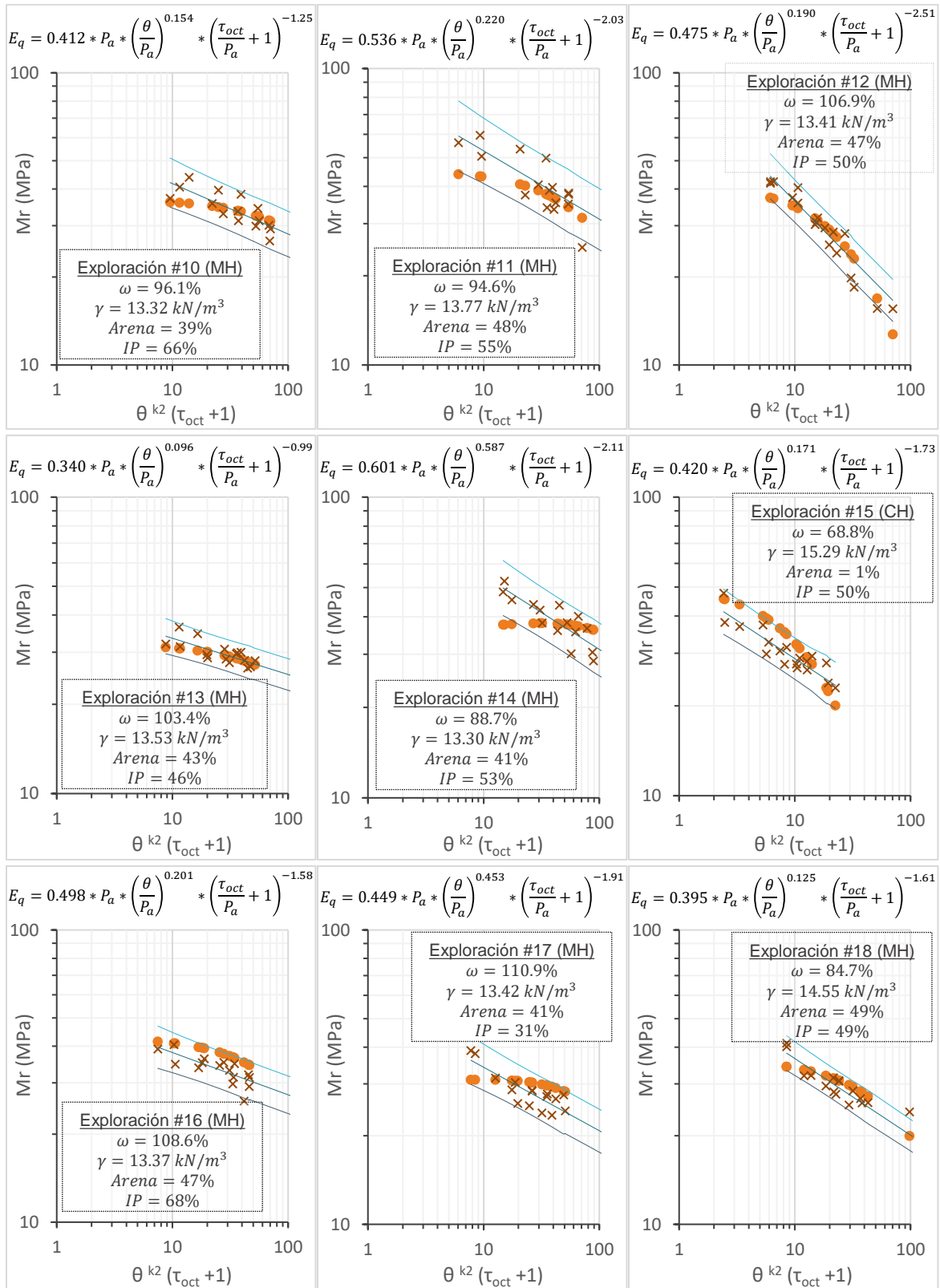
Una vez establecido el modelo en función de una variable, la explicación e interpretación de los resultados presentados en la Figura 5.39 tienen validez en el análisis aquí presentado. En la Figura 5.41 se presentan los resultados del análisis de validación por medio de intervalos de predicción para todas las muestras de estudio mediante el *modelo universal*.

Tal como se presenta en las gráficas, existen en general buenas estimaciones del M_r a partir de las ecuaciones constitutivas del ensayo de cCBR, no obstante, también es posible observar que se presenta un mejor ajuste a partir de *modelo $k-\sigma_d$* , puesto que todos estos modelos están dentro de los intervalos de predicción, en contraste con algunos del modelo universal (Exploraciones 2, 3, 4, 14).

La observación anterior puede dar indicios de que el asumir que el esfuerzo σ_3 es $0.01\sigma_1$ (Capítulo 3) para la obtención de las constantes experimentales del *modelo universal*, no necesariamente es cierto, y valdría la pena tener un mecanismo con el cual medir dicho esfuerzo durante el ensayo en lugar de asumirlo.



Continúa la figura



Continúa la figura

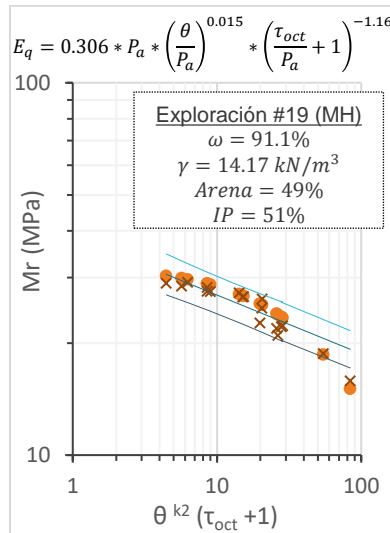


Figura 5.41 Intervalos de predicción y validación del modelo universal del ensayo cCBR de las muestras

Fuente: Elaboración propia

A partir de lo presentado anteriormente, se puede establecer que las ecuaciones constitutivas obtenidas a partir del ensayo de cCBR permiten obtener un estimado del M_r , con un 95% de confiabilidad, en diferentes condiciones de humedad, peso unitario, plasticidad y granulometría de los suelos blandos de subrasante. Lo anterior demuestra que la prueba de cCBR se puede presentar como una opción viable para estimar M_r , ante la carencia de una infraestructura adecuada para ejecutar este ensayo.

5.5. Relaciones entre el M_r y E_{equi} con parámetros de resistencia

Dado que la naturaleza de los ensayos de PDC, CBR y $\Delta\sigma_f$ no permiten conocer valores de resistencia a diferentes niveles de esfuerzo como sucede en el M_r y en el cCBR, los valores aquí comparados son los obtenidos, con un 95% de confiabilidad, en el estado de esfuerzos representativo (Secciones 5.2.2 y 5.3.2).

En las gráficas de la Figura 5.42 y de la Figura 5.43 se presentan las relaciones entre el M_r y el E_{equi} respecto al DN, CBR y $\Delta\sigma_f$. A partir de ellas, es posible determinar que no existe una correlación o tendencias entre los valores. Lo anterior se puede atribuir a que los valores de DN, CBR y $\Delta\sigma_f$ son medidas de resistencia y no de rigidez, como si los con el M_r y el E_{equi} .

La anterior observación, concuerda con lo establecido por autores como Hight & Stevens (1982), Drumm et al. (1990), Sukumaran et al. (2002) y Leung et al. (2013), los cuales aseguran que el valor de módulo depende de muchas más variables adicionales al CBR,

DN o $\Delta\sigma_f$, las cuales se ignoran por completo en las correlaciones existentes en la literatura (Witczak et al., 1995; George & Uddin, 2000; Dione et al., 2015).

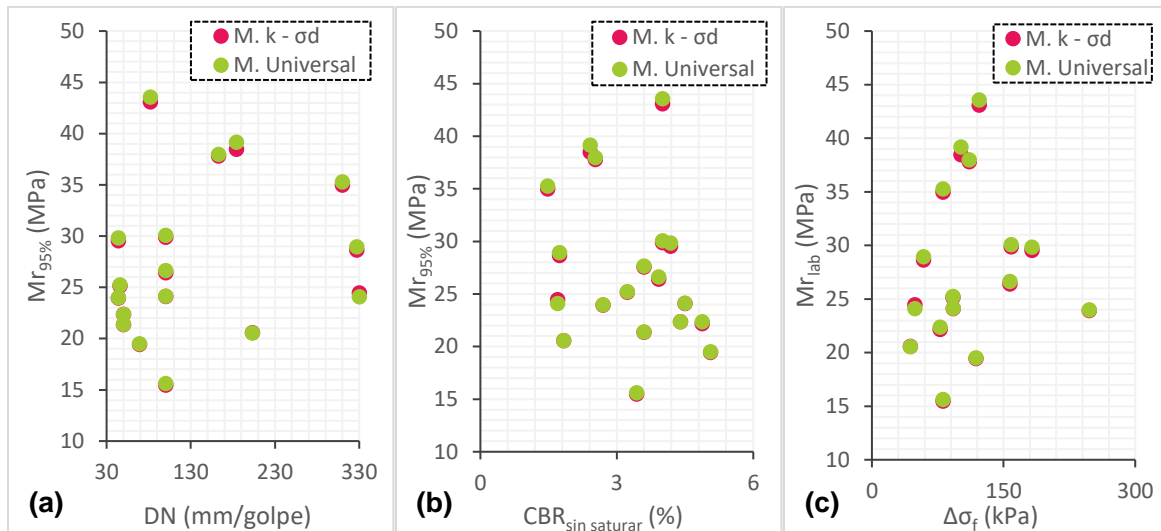


Figura 5.42 Relación entre el Mr (al 95%) respecto a (a) DN, (b) CBR sin saturar y (c) Resistencia al corte no drenada mediante ambos modelos constitutivos

Fuente: Elaboración propia

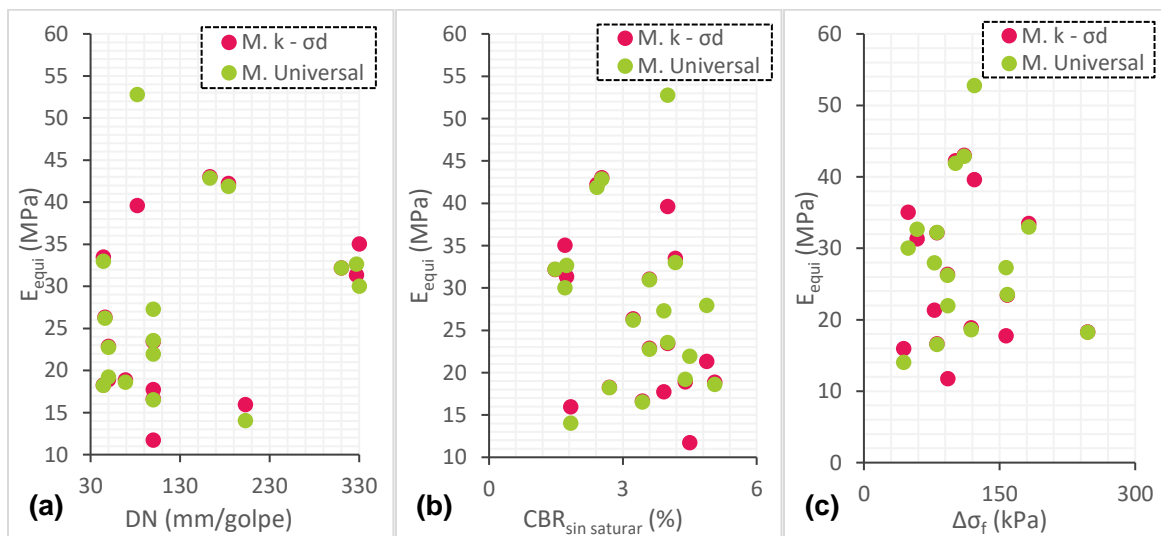


Figura 5.43 Relación entre el E_{equi} (al 95%) respecto a (a) DN, (b) CBR sin saturar y (c) Resistencia al corte no drenada mediante ambos modelos constitutivos

Fuente: Elaboración propia

5.6. Estudio de costos de la prueba cCBR

Dado que el ensayo de CBR cíclico (cCBR) no es un ensayo estandarizado ni comercial, su precio no puede ser encontrado en listas de los diferentes laboratorios. Es por lo anterior, que se requiere determinar dicho valor de la manera más apropiada, a partir de las consideraciones y procedimiento del ensayo mencionados anteriormente en el documento.

5.6.1. Rendimiento y precios del mercado

Para poder determinar el costo del ensayo, como primera medida es necesario establecer el rendimiento horas-hombre de éste. Este rendimiento hace referencia a cuantas horas requiere un operario en ejecutar el ensayo, este tiempo se fijó como el promedio de los tiempos requeridos en los 19 ensayos (3 muestras por ensayo) realizados en la presente investigación, los cuales se presentan en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12 Tiempo requerido, en minutos, en la ejecución de los ensayos de cCBR realizados

Sondeo	Duración del ensayo cCBR (min)		
	Penetración objetivo		
	0.625mm	1.27mm	2.54mm
1	29.3	30.6	38.8
2	21.0	26.2	35.8
3	18.7	27.5	50.3
4	27.9	104.8	131.5
5	15.6	27.6	33.9
6	14.8	19.9	25.2
7	15.5	24.5	33.7
8	53.5	68.7	122.5
9	41.8	62.2	112.7
10	33.7	73.2	92.1
11	19.5	47.0	88.5
12	26.7	51.5	73.7
13	14.5	50.5	66.8
14	26.5	43.4	66.7
15	18.2	23.8	38.3
16	12.2	33.6	65.5
17	17.0	51.0	109.8
18	34.1	92.2	125.0
19	18.1	41.6	78.7
\bar{x} (min)	25.0	48.0	74.0
$\Sigma \bar{x}$ (min)	147		
$\Sigma \bar{x}$ (h)	2.5		

Fuente: Elaboración propia

A partir de la información anterior es posible establecer que el rendimiento es de **2.5 hora-hombre**.

Adicionalmente, también se requiere identificar los equipos y herramientas utilizados en el ensayo, así como sus respectivos precios comerciales. Dicha información se presenta en

la Tabla 5.13, en los anexos se encuentran las respectivas cotizaciones realizadas (Anexo B).

Tabla 5.13 Costos equipo/herramienta para ejecución del ensayo cCBR

Equipo/ Herramienta	Precio
Máquina multiensayos	\$ 34,921,315
Transductor de desplazamiento (25mm)	\$ 3,775,122
Soporte para transductor	\$ 284,427
Celda de carga tipo S de 10kN	\$ 1,960,823
Computador	\$ 1,200,000
Tablero control de información	\$ 3,000,000
Molde + collar muestra CBR inalterado	\$ 140,000
Pistón de penetración	\$ 341,887
Sobrecargas	\$ 145,000
Horno eléctrico	\$ 8,254,467
Balanza de precisión	\$ 9,134,369

Fuente: Elaboración propia

5.6.2. Tarifa horaria

La tarifa horaria se define como el costo que genera la maquinaria o equipo por unidad de tiempo (Hora), y se determina en función de los gastos fijos y gastos de operación. Dentro de los primeros se considera la amortización de la maquinaria, la tasa de interés por inversión, valor de recuperación, vida útil, seguros, reparaciones, almacenaje y gastos anuales; mientras que en el segundo grupo se contemplan todos los gastos generados por la operación del equipo.

La Cámara Colombiana de la Infraestructura (CCI) contempla dentro de los costos de tarifa horaria el costo inicial, el grado de rudeza del trabajo que se va a realizar, el número de horas trabajadas por año, el número de años trabajados, el cuidado que se presta al mantenimiento y a las reparaciones, entre otros. Un esquema de los costos a tener en cuenta en este caso particular se presentan en la Figura 5.44 (Rincón & Sierra, 2015).

5.6.2.1. Costos de propiedad o posesión

Tal como se presenta en la Figura 5.44, dentro de estos costos se contempla la depreciación, los intereses, los impuestos y los seguros. En cuanto a la depreciación, tal como lo recomienda la CCI (Cámara Colombiana de Infraestructura, 2009), se supone que es constante para cada año o para cada hora, y se calcula dividiendo el valor neto a depreciar entre la vida útil (Ecuación 5-11).

$$\text{Depreciación} = \frac{\text{Valor neto a depreciar}}{\text{Vida útil en horas}}$$

Ecuación 5-11

En cuanto a la vida útil, se debe tener presente que las horas al año trabajadas son igual al producto de las semanas trabajadas y la horas trabajadas semanalmente:

$$\text{Horas anuales} = 50 \text{ semanas} * 40 \frac{\text{horas}}{\text{trabajo}} = 2000 \text{ horas} - \text{año}$$

Ecuación 5-12

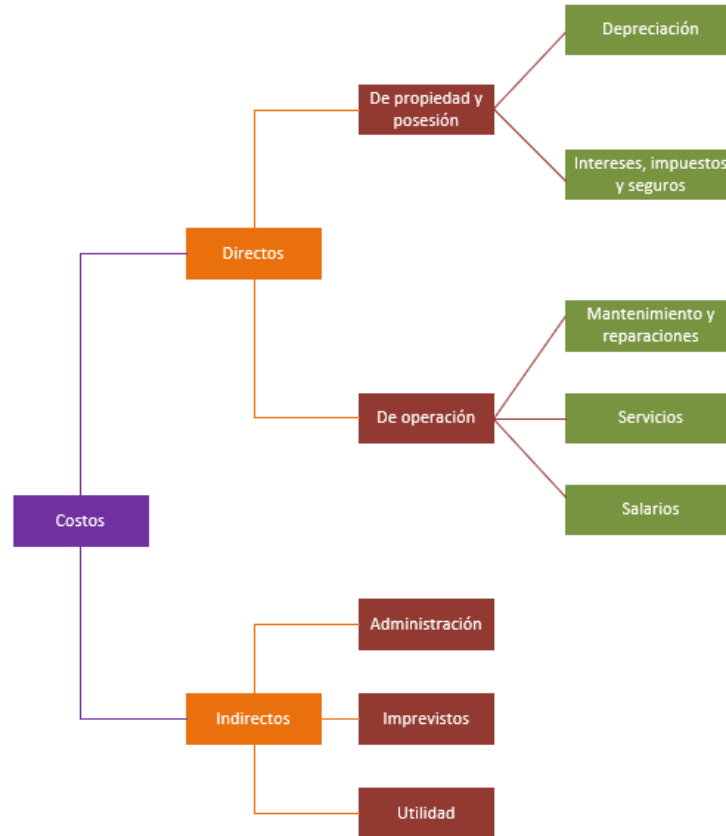


Figura 5.44 Cuadro general de costos en administración de maquinaria

Fuente: Adaptado de Rincón & Sierra (2015)

Con lo cual se tiene que las horas que puede trabajar la máquina es igual al producto del valor anterior por la vida útil del equipo (Ecuación 5-13). Dicha vida útil, de acuerdo con el Artículo 1.2.1.18.4 del Decreto 1625 de 2016, en términos generales para la maquinaria y equipo tiene un periodo de 10 años.

$$\text{Vida útil en horas} = \text{Horas anuales} * \text{Vida útil en años} = \text{Horas anuales} * 10$$

Ecuación 5-13

Por su parte, el valor neto a depreciar es igual al precio comercial restando el valor de salvamento, el cual generalmente en entidades privadas, como lo es la Escuela Colombiana de Ingeniería, equivale al 10% del valor de la compra de la máquina (Tabla 5.13), valor también recomendado por la CCI (Cámara Colombiana de Infraestructura, 2009).

$$\text{Valor neto a depreciar} = 0.9 * \text{Precio comercial}$$

Ecuación 5-14

En cuanto al costo de intereses, impuestos y seguros, de acuerdo con Puerto Cóbbita & Sierra Herrera (2018), es adecuado el uso de la Ecuación 5-15. El factor 0.2148 se toma asumiendo un interés comercial anual de 14.21% y una tarifa de seguros del 7.2% anual que cubre incendio, destrucción y responsabilidad civil; estos valores son los recomendados por la CCI.

$$Intereses, impuestos y seguros = \frac{0.2141 * Valor\ neto\ a\ depreciar}{Vida\ útil\ en\ horas} * \frac{Vida\ útil\ en\ años + 1}{2}$$

Ecuación 5-15

Con lo cual, se tiene que los costos de propiedad o posesión son:

$$Costos\ de\ propiedad = Depreciación + Intereses, impuestos y seguros$$

Ecuación 5-16

5.6.2.2. Costos de operación

Para determinar los costos de operación, es necesario sumar el valor por hora de mano de obra, de consumo de energía, de mantenimiento y de reparaciones. En cuanto a la mano de obra, de acuerdo con lo establecido por la CCI, es necesario afectar el valor por hora nominal de un empleado por un recargo por prestaciones sociales, el cual se establece como 2.106, tal como se presenta en la Figura 5.45.

En el caso particular de la Escuela Colombiana de Ingeniería, un laboratorista devenga un salario mensual de \$1'350,000 COP, lo cual equivale a un valor por hora de \$5,625 COP (Asumiendo 30 días al mes y 8 horas diarias de trabajo), afectado por el recargo de prestaciones sociales da un costo por hora de \$11,847 COP.

COSTO DE PRESTACIONES SOCIALES			
A. DIAS PAGADOS POR AÑO			
Jornales al año			365
Cesantías			30
Prima de servicio			30
Seguridad social			
	Salud	8.50%	31.0
	Riesgos Profesionales	8.70%	31.8
	Pensiones	12.00%	43.8
Aportes Parafiscales	SENA	2.00%	7.3
	ICBF	3.00%	11.0
	Caja de compensación familiar	4.00%	14.6
Intereses de Cesantía	12% ANUAL	1.00%	3.7
Otras prestaciones (dotaciones)		4.20%	15.3
TOTAL			583.4
B. DIAS TRABAJADOS POR AÑO			
Calendario			365
Vacaciones			15
Domingos			52
Feriados			18
Ausencias remuneradas			3
TOTAL			277
C. RECARGOS DE PRESTACIONES	Días pagados/Días trabajados		2.106

Figura 5.45 Ítems para tener en cuenta para la determinación del recargo por prestaciones sociales

Fuente: Tomado de Cámara Colombiana de Infraestructura (2009)

En cuanto al costo por mantenimiento y reparaciones, éste incluye el valor de la mano de obra de los mecánicos y el valor de los repuestos necesarios para mantener el equipo en operación. De acuerdo con las recomendaciones de la CCI, se tomó un factor equivalente 1.2375 del costo de la depreciación del equipo (0.225 por mano de obra y 1.0125 por repuestos):

$$\text{Costo reparaciones y mantenimiento} = 1.2375 * \text{Depreciación}$$

Ecuación 5-17

Finalmente, respecto a los servicios, se tuvieron en cuenta los niveles de consumo de energía del computador, del tablero de adquisición de datos, del horno, de la balanza y de la máquina multiensayos utilizada, ya que estas se conectan directamente a las tomas de corriente. En cuanto a las tres primeras, de acuerdo con RedUSERS (2013), se puede establecer que el consumo promedio es de 0.27kW-h; en cuanto al consumo del horno, de acuerdo con las especificaciones dadas por los vendedores en sus respectivas cotizaciones, se sabe que el consumo es de 1.92kW-h.

Adicionalmente, para determinar dicho valor en la máquina multiensayos (Prensa) se utilizó un medidor de corriente o vatímetro (Figura 5.46), a partir del cual se estableció que el consumo del motor de la máquina es de 1kW-h.

Determinando estos consumos y conociendo que la Escuela Colombiana de Ingeniería paga por kW-h \$458.23 COP debido a su ubicación y naturaleza de negocio (Grupo Enel-Codensa, 2019), es posible calcular el costo por la energía consumida durante la ejecución del ensayo.

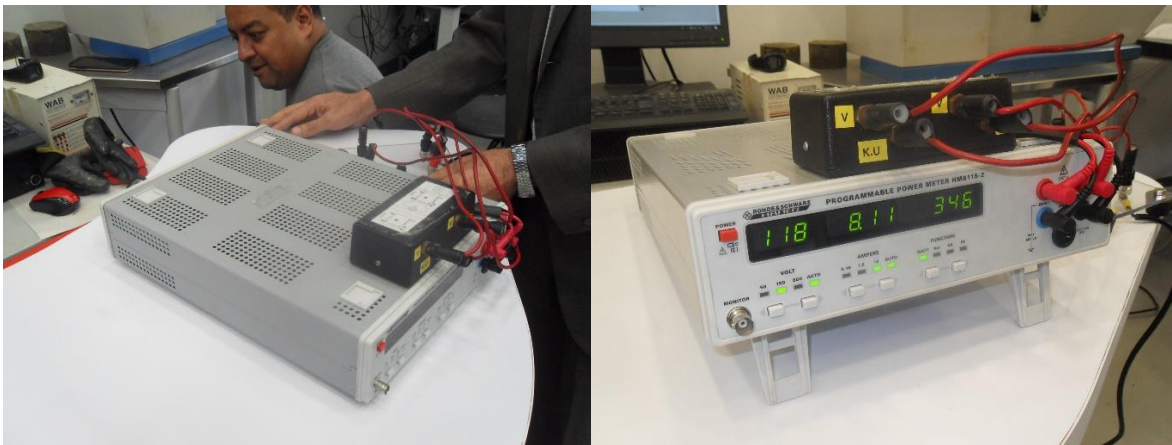


Figura 5.46 Vatímetro utilizado en la máquina multiensayos (Prensa)

Fuente: Tomada por el autor

La suma de los costos de propiedad y los costos de operación darán como resultado los costos directos. En cuanto a los costos indirectos, se recomienda estimarlos como el 25% de los directos, lo cual corresponde a una magnitud para atender los gastos de

administración e imprevistos (Cámara Colombiana de Infraestructura, 2009; Puerto Cóbbita & Sierra Herrera, 2018).

A partir de lo anterior, se presentan las tarifas horarias de los equipos y/o herramientas requeridas para el ensayo:

Tabla 5.14 Costos de propiedad equipos/herramientas ensayo cCBR

Equipo/ Herramienta	Valor a depreciar	Depreciación	Intereses, impuestos y seguros	Costos de propiedad
Máquina multiensayos	\$ 31,429,184	\$ 15,715	\$ 3,364	\$ 19,079
Transductor de desplazamiento	\$ 3,397,610	\$ 1,699	\$ 364	\$ 2,063
Soporte para transductor	\$ 255,984	\$ 128	\$ 27	\$ 155
Celda de carga tipo S de 10kN	\$ 1,764,741	\$ 882	\$ 189	\$ 1,071
Computador	\$ 1,080,000	\$ 540	\$ 116	\$ 656
Tablero control de información	\$ 2,700,000	\$ 1,350	\$ 289	\$ 1,639
Molde + collar muestra CBR	\$ 126,000	\$ 63	\$ 13	\$ 76
Pistón de penetración	\$ 307,698	\$ 154	\$ 33	\$ 187
Sobrecargas	\$ 130,500	\$ 65	\$ 14	\$ 79
Horno de laboratorio	\$ 7,429,020	\$ 3,715	\$ 795	\$ 4,510
Balanza de precisión	\$ 8,220,932	\$ 4,110	\$ 880	\$ 4,991

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.15 Costos de operación equipos/herramientas ensayo cCBR

Equipo/ Herramienta	Mano de obra	Mantenimiento y reparaciones	Servicios (Energía)	Costos de operación
Máquina multiensayos	\$ 11,847	\$ 19,447	\$ 458	\$ 19,905
Transductor de desplazamiento	-	\$ 2,102	-	\$ 2,102
Soporte para transductor	-	\$ 158	-	\$ 158
Celda de carga tipo S de 10kN	-	\$ 1,092	-	\$ 1,092
Computador	\$ 11,847	\$ 668	\$ 124	\$ 792
Tablero control de información	-	\$ 1,671	\$ 124	\$ 1,794
Molde + collar muestra CBR	-	\$ 78	-	\$ 78
Pistón de penetración	-	\$ 190	-	\$ 190
Sobrecargas	-	\$ 81	-	\$ 81
Horno de laboratorio	\$ 11,847	\$ 4,597	\$ 880	\$ 4,597
Balanza de precisión	\$ 11,847	\$ 5,087	\$ 124	\$ 5,087

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.16 Valor tarifa horaria equipos/herramientas ensayo cCBR

Equipo/ Herramienta	Costos directos	Costos indirectos	Valor tarifa horaria
Máquina multiensayos	\$ 38,984	\$ 9,746	\$ 48,730
Transductor de desplazamiento	\$ 4,165	\$ 1,041	\$ 5,206
Soporte para transductor	\$ 314	\$ 78	\$ 392
Celda de carga tipo S de 10kN	\$ 2,163	\$ 541	\$ 2,704

Continúa la tabla

Computador	\$ 1,448	\$ 362	\$ 1,809
Tablero control de información	\$ 3,433	\$ 858	\$ 4,292
Molde + collar muestra CBR	\$ 154	\$ 39	\$ 193
Pistón de penetración	\$ 377	\$ 94	\$ 471
Sobrecargas	\$ 160	\$ 40	\$ 200
Horno de laboratorio	\$ 9,106	\$ 2,277	\$ 11,383
Balanza de precisión	\$ 10.077	\$ 2.519	\$ 12.597

Fuente: Elaboración propia

5.6.2.3. Costo de producción del ensayo

Para determinar el costo de producción, se utilizó la teoría de análisis de precios unitarios, donde la unidad es horas-hombre, teniendo en cuenta las tarifas horarias de los equipos y herramienta utilizada (Asumiendo un desperdicio del 5% de la mano de obra):

Tabla 5.17 Costo de producción del ensayo

Equipo/ Herramienta	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Total
Máquina multiensayos	2.5	hora	\$ 48,730	\$ 119,389
Transductor de desplazamiento	2.5	hora	\$ 5,206	\$ 12,755
Soporte para transductor	2.5	hora	\$ 392	\$ 961
Celda de carga tipo S de 10kN	2.5	hora	\$ 2,704	\$ 6,625
Computador	2.5	hora	\$ 1,809	\$ 4,433
Tablero control de información	2.5	hora	\$ 4,292	\$ 10,515
Molde + collar muestra CBR	2.5	hora	\$ 193	\$ 473
Pistón de penetración	2.5	hora	\$ 471	\$ 1,155
Sobrecargas	2.5	hora	\$ 200	\$ 490
Horno de laboratorio	24	hora	\$ 11,383	\$ 273,195
Balanza de precisión	0.25	hora	\$ 12,597	\$ 3,149
Desperdicio	5	%	\$ 11,847	\$ 592
Costo total unitario del ensayo cCBR				\$ 433,732

Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar, tal como se observa en la Tabla 5.17, que el tiempo utilizado para determinar el costo del ensayo en el caso del horno son 24 horas, puesto que este es el tiempo requerido para determinar el contenido de humedad; mientras que en el caso de la balanza se estableció que todas las masas requeridas se pueden tomar en 15 minutos; el resto de las herramientas y equipo se ven afectadas por el tiempo que demora el ensayo de penetración de las tres muestras.

Finalmente, asumiendo una ganancia del 10% respecto al costo unitario del ensayo, lo cual se considera una utilidad razonable, se establece que el precio comercial del ensayo es de **\$477,105 COP**. Es importante resaltar que este precio no incluye los costos relacionados con las actividades de exploración para la obtención de las muestras.

5.7. Referencias

- Andrei, D., Witczak, M. W., & Houston, W. N. (2009). Resilient Modulus Predictive Model for Unbound Pavement Materials. In *Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support* (pp. 401–408). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41023\(337\)51](https://doi.org/10.1061/41023(337)51)
- Araujo, W., & Ruiz, G. (2016). Correlation Equations of CBR with Index Properties of Soil in the City of Piura. In *Proceedings of the 14th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Engineering Innovations for Global Sustainability"* (pp. 1–7). Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.029>
- Araya, A. A. (2011). *Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements*. Delft University of Technology. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:1d964e6f-e7e5-4d2a-834b-db9b3504745f/datastream/OBJ/download>
- Cámara Colombiana de Infraestructura. (2009). *Tarifas de arrendamiento para equipos de construcción*. Retrieved from https://www.infraestructura.org.co/tarifas/Manual_Usuario.pdf
- Campagnoli, S. (2014). Notas de clase: Ensayo CBR y PDC. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Chukka, D., & Chakravarthi, V. K. (2012). Evaluation of Properties of Soil Subgrade Using Dynamic Cone Penetration Index – A Case Study. *International Journal of Engineering Research and Development*, 4(4), 07–15. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/108a/b10fb51e2441910130a9ecd05bfefe0f9974.pdf>
- Das, B. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (International Thomson Editores S.A., Ed.) (1st ed.). México D.F.
- Dione, A., Fall, M., Berthaud, Y., Benboudjema, F., & Michou, A. (2015). Implementation of resilient modulus -CBR relationship in mechanistic-empirical (M-E) pavement design. *Revue Du CAMES – Sciences Appliquées et de l'Ingénieur*, 1(12), 65–71.
- Drumm, E. C., Boateng-Poku, Y., & Johnson Pierce, T. (1990). Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Standard Tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(5), 774–789. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:5\(774\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:5(774))
- Elias, M. B., Titi, H. H., & Helwany, S. (2004). Evaluation of Resilient Modulus of Typical Wisconsin Soils. In *Geo Jordan 2004* (pp. 335–346). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40735\(143\)28](https://doi.org/10.1061/40735(143)28)
- Florez, C. H., Torres, F. A., Torres, F. A., & Peña, C. A. (2016). Estimación del valor de CBR usando Penetrómetro Dinámico de Cono. *Geotechnics Arauca*, 1–18. Retrieved from <https://www.geotechnicsarauca.com/wp-content/uploads/2017/07/ESTIMATION-OF-CBR-VALUE-USING-DYNAMIC-CONE-PENETROMETER.pdf>
- Garnica, P., Perez, N., & Gómez, J. (2001). *Módulos de resiliencia en suelos finos y*

- materiales granulares*. Querétaro. Retrieved from <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt142.pdf>
- George, K. P. (2004). *Prediction of resilient modulus from soil index properties*. Retrieved from https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/24156/dot_24156_DS1.pdf?
- George, K. P., & Uddin, W. (2000). *Subgrade Characterization for Highway Pavement Design*. Jackson, Mississippi. Retrieved from [http://mdot.ms.gov/documents/research/Reports/Interim and Final Reports/State Study 131 - Subgrade Characterization for Highway Pavement Design.pdf](http://mdot.ms.gov/documents/research/Reports/Interim%20and%20Final%20Reports/State%20Study%20131%20-%20Subgrade%20Characterization%20for%20Highway%20Pavement%20Design.pdf)
- Grupo Enel-Codensa. (2019). Tarifas de energía eléctrica (\$/kWh) Enero 2019. Retrieved July 18, 2019, from <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/español/personas/1-17-1/2019/Tarifario-enero-2019.pdf>
- Herath, A., Mohammad, L. N., Gaspard, K., Gudishala, R., & Abu-Farsakh, M. Y. (2005). The Use of Dynamic Cone Penetrometer to Predict Resilient Modulus of Subgrade Soils. In *Advances in Pavement Engineering* (pp. 1–16). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40776\(155\)2](https://doi.org/10.1061/40776(155)2)
- Hight, D. W., & Stevens, M. G. H. (1982). An analysis of the California bearing ratio test in saturated clays. *Géotechnique*, 32(4), 315–322. <https://doi.org/10.1680/geot.1982.32.4.315>
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- INVIAS. (2013). *Normas de Ensayo de materiales para carreteras*.
- Ji, R., Siddiki, N., Nantung, T., & Kim, D. (2014). Evaluation of Resilient Modulus of Subgrade and Base Materials in Indiana and Its Implementation in MEPDG. *The Scientific World Journal*, 2014, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2014/372838>
- Jones, M. P., & Witczak, M. W. (1977). Subgrade Modulus on the San Diego Test Road. *Transportation Research Record*, (641), 1–6.
- Katte, V. Y., Mfoyet, S. M., Manefouet, B., Wouatong, A. S. L., & Bezeng, L. A. (2019). Correlation of California Bearing Ratio (CBR) Value with Soil Properties of Road Subgrade Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(1), 217–234. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0604-x>
- Kim, D., & Siddiki, N. Z. (2006). *Simplification of Resilient Modulus Testing for Subgrades*. West Lafayette. Retrieved from <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1736&context=jtrp>
- Leung, G. L. M., Wong, A. W. G., & Wang, Y. H. (2013). Prediction of resilient modulus of compacted saprolitic soils by CBR approach for road pavement subgrade: a re-examination. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(4), 403–417. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.727993>
- Li, D., & Selig, E. T. (1994). Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils. *Journal of*

- Geotechnical Engineering*, 120(6), 939–957. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:6\(939\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:6(939))
- Montaña, D. (2013). *Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Retrieved from <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/108>
- Moossazadeh, J., & Witczak, M. (1981). *Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior*. *Transportation Research Record 810*. Washington, D.C. Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1981/810/810-002.pdf>
- Nieto Leal, A., & Kaliakin, V. N. (2016). General response observed in cyclically loaded cohesive soils. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 21. <https://doi.org/10.18359/rcin.1673>
- Patel, R. S., & Desai, M. D. (2010). CBR Predicted by Index Properties for Alluvial Soils of South Gujarat. In *Indian Geotechnical Conference – 2010, GEOTrendz* (pp. 79–82). Bombay, India. Retrieved from http://www.mddesai.com/Paper_2000_2010/20_020.pdf
- Perez, G., Álvarez, D., & Fuertes, G. (2013). Modelos de correlación entre el PDC y el CBR inalterado para suelos cohesivos. *Escuela de Ingeniería de Transporte y Vías - UPTC*. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/130934559/MODELOS-DE-CORRELACION-ENTRE-EL-PDC-Y-EL-CBR-INALTERADO-PA>
- Ping, W. V., Yang, Z., Liu, C., & Dietrich, B. (2001). Measuring resilient modulus of granular materials in flexible pavements. *Transportation Research Record*, (1778), 81–90. <https://doi.org/10.3141/1778-10>
- Puerto Cóbbita, C. A., & Sierra Herrera, L. F. (2018). *Determinación de los costos de producción de los ensayos realizables en los laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia*. Universidad Católica de Colombia. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10983/16394>
- Rahim, A. M. (2005). Subgrade soil index properties to estimate resilient modulus for pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(3), 163–169. <https://doi.org/10.1080/10298430500140891>
- RedUSERS. (2013). ¿Cuál es el consumo eléctrico de nuestros equipos electrónicos? Retrieved July 17, 2019, from <http://www.redusers.com/noticias/cual-es-el-consumo-electrico-de-nuestros-equipo-electronicos/>
- Rehman, Z. U., Khalid, U., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2017). Prediction of CBR Value from Index Properties of Cohesive Soils. *Technical Journal, University of Engineering and Technology (UET) Taxila, Pakistan*, 22(11), 17–26.
- Rincón, J. F., & Sierra, Y. A. (2015). *Determinación de los costos de propiedad de la maquinaria de construcción para la realización de obras viales por parte del Eejercicio Nacional de Colombia*. Universidad Santo Tomás. Retrieved from [https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/685/Determinacion de los costos de propiedad de la maquinaria de construccion para la realizacion de obras](https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/685/Determinacion%20de%20los%20costos%20de%20propiedad%20de%20la%20maquinaria%20de%20construccion%20para%20la%20realizacion%20de%20obras)

- viales por parte del ejercito nacional de Colombia.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rondón, H. A., Reyes, F. A., & Sánchez Cotte, E. (2012). Deformación permanente de materiales finogranulares en subrasantes. *Revista Tecnura*, 16, 140–151.
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. (Ecoe Ediciones, Ed.) (1ra ed.). Bogotá D.C.
- Ruiz, S. (2019). Protocolo de tesis: Mini CBR-CBR. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sukumaran, B., Kyatham, V., Shah, A., & Sheth, D. (2002). Suitability of using California Bearing Ratio to predict resilient modulus. In *Presented on federal aviation administration airport technology transfer conference* (pp. 1–10). Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.515.9182&rep=rep1&type=pdf>
- Talukdar, D. K. (2014). A Study of Correlation Between California Bearing Ratio (CBR) Value With Other Properties of Soil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(1), 559–562. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/854d/b18ceee21a3402c5e2998b36276c0a4f0d16.pdf>
- The Asphalt Institute. (1989). *The Asphalt Handbook Manual Series No. 4 (MS-4)*.
- Titi, H. H., & English, R. (2011). *Determination of resilient modulus values for typical plastic soils in Wisconsin*. Milwaukee. Retrieved from <https://minds.wisconsin.edu/bitstream/handle/1793/55376/08-12resilientmodulus-f1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Witczak, M. (2003). *Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. NCHRP Project 1-28A (Volume 1)*. Maryland. Retrieved from <http://apps.trb.org/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=203>
- Witczak, M. W., Qi, X., & Mirza, M. W. (1995). Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure. In *Journal of Transportation Engineering* (Vol. 121, pp. 273–282).
- Wonnacott, T., & Wonnacott, R. (1993). *Fundamentos de estadística para administración y economía*. (Limusa Noriega Editores, Ed.) (4ta ed.). México D.F.: Editorial Limusa S.A.
- Yang, S., Huang, W., & Tai, Y. (2005). Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board No 1913*, 99–106. <https://doi.org/10.3141/1913-10>

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones más relevantes que se derivan de la investigación. Se realizan consideraciones respecto a las características físicas y mecánicas de los suelos analizados, la influencia del esfuerzo desviador y cortante octaédrico en los valores de módulo (resiliente y equivalente), la relación existente entre el módulo y valores de resistencia empíricos, y la viabilidad del uso del ensayo cCBR para la estimación del módulo resiliente.

Finalmente, se presentan las recomendaciones que pueden tenerse en cuenta en futuras investigaciones sobre el ensayo cCBR, que permitan extender este estudio a otro tipo de materiales también utilizados en la construcción de pavimentos, así como para mejorar aún más el protocolo de ensayo propuesto para suelos de subrasante con el fin de obtener resultados aún más confiables.

6.1. Conclusiones

6.1.1. Características físicas y mecánicas de los suelos estudiados

- A nivel general, se puede observar que los suelos de todas las exploraciones presentan números dinámicos (DN) elevados, lo cual va en concordancia con los bajos valores de CBR y de módulo obtenidos. Así mismo, cabe resaltar que las muestras de limo presentan DN menores que las arcillas y, por ende, mayores valores de CBR; esto se le puede atribuir a la presencia importante de raíces y al gran porcentaje de arenas que contienen.
- La resistencia al corte no drenada de las muestras es en general baja. Las muestras en las cuales se presentaron los menores valores fueron aquellas con una presencia importante de raíces, esto se puede deber a que estas funcionan como superficies potenciales de falla de estos suelos. Adicionalmente, respecto a la forma de falla, aquellas con poca presencia de raíces fallaron generalmente por deformación

(Deformación permanente del 5%), mientras que aquellas con raíces lo hicieron antes de dicha deformación, en el sentido de las raíces que contenían.

- Las muestras de suelo estudiadas permitieron observar que características como el contenido de humedad pueden llegar a fluctuar considerablemente con el transcurso del año, debido a los cambios en el régimen de lluvias, lo cual es un fenómeno a tener en cuenta, ya que también fue posible evidenciar que el incremento en la humedad de estos suelos da como resultado una reducción, en ocasiones importante, de la resistencia al corte.
- Aunque son muchas las variables que influyen en el valor de M_r en los suelos, una de las razones por las cuales las muestras limosas presentaron en general un rango menor de módulo, es debido a que la presencia de raíces fue mucho mayor que en las muestras tipo arcilla. No obstante, estas muestras limosas son más uniformes en su valor de módulo, puesto que su desviación estándar es menor.
- Al momento de buscar correlaciones entre los valores de DN y CBR, fue posible establecer una excelente correlación para los puntos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, caso contrario a lo presentado con las muestras del lote de San José de Bavaria. Esto no necesariamente implica la inexistencia de dicha correlación para estos suelos limosos, la gran diferencia de resultados puede atribuirse al hecho de que se utilizaron dos equipos PDC diferentes en ambos lugares, estando en mejores condiciones el utilizado en la ECI.

6.1.2. Influencia del esfuerzo desviador y cortante octaédrico en los valores de módulo

- En general, es posible observar la dependencia de los módulos (resiliente y equivalente) frente a los esfuerzos desviador y cortante octaédrico (En la mayoría de los casos $R^2 > 0.7$), independientemente de cambios en las diferentes características del suelo, como lo son la humedad, el peso unitario, la granulometría y la plasticidad.
- Los resultados de módulo obtenidos demuestran la gran heterogeneidad presentada por los suelos. En particular, para propósitos de diseño se considera que el suelo de subrasante de Bogotá es homogéneo, no obstante, la imposibilidad de establecer un único modelo constitutivo demuestra que dicha suposición no es cierta y que se

requiere de un buen criterio ingenieril al momento de escoger ese único valor de diseño.

- Los ensayos de módulo permitieron comprobar que, a pesar de la gran influencia del esfuerzo desviador en el valor de módulo de los suelos blandos de subrasante, siempre existirá una pequeña influencia de la presión de confinamiento, esto se observó al obtener unos valores ligeramente más altos de R^2 en el *modelo universal* comparado con el *modelo $k - \sigma_d$* .

6.1.3. Relación entre el módulo resiliente y equivalente con demás valores de resistencia

- El uso de herramientas estadísticas para la estimación de un único valor de módulo se considera pertinente, puesto que permite establecer valores de diseño con cierto grado de confiabilidad, lo cual les da más credibilidad a los diseños elaborados. Es importante resaltar que establecer el nivel de esfuerzos representativo es vital para la obtención de un valor de módulo coherente.
- Establecer correlaciones entre valores de resistencia de origen empírico con otros valores de carácter más analítico no es tarea fácil y en ocasiones es imposible, esto posiblemente se debe a todas las simplificaciones que se realizan al obtener valores empíricos de resistencia.
- Fue posible ver que el módulo elástico de las muestras de arcilla y limo, si se analizan de manera independiente, son similares, esto debido a que casi todas las curvas de las gráficas esfuerzo-deformación en la zona elástica tienden a ser paralelas entre ellas, especialmente en los limos.

6.1.4. Uso del ensayo cCBR para estimar el módulo resiliente

- Los resultados muestran, en general, que es posible obtener los valores del M_r determinados a niveles de esfuerzo más bajos a partir de modelos constitutivos del E_{equi} , con un buen nivel de predicción. Es decir, con el ensayo cCBR se puede tener una buena estimación del módulo resiliente de suelos blandos de subrasante, independientemente del tipo de suelo (Arcilla o limo) y de su humedad, densidad, plasticidad e incluso de su granulometría; por lo cual esta prueba demuestra ser una

opción viable, económica y sencilla, en ausencia de los equipos necesarios para la ejecución del ensayo triaxial cíclico definido por los estándares.

- En general se cuenta con buenas estimaciones del M_r a partir de las ecuaciones constitutivas del ensayo de cCBR, no obstante, también es posible observar que se presenta un mejor ajuste a partir de *modelo* $k - \sigma_d$ puesto que todos estos modelos están dentro de los intervalos de predicción, en contraste con algunos del modelo universal. La observación anterior puede dar indicios de que el asumir que el esfuerzo σ_3 es $0.01\sigma_1$ para obtener las constantes experimentales del *modelo universal*, no necesariamente es cierto.
- Adicionalmente, se puede observar que el E_{equi} tiene correspondencia con el módulo resiliente que se obtendría a niveles de esfuerzo mayores a los que es sometida la muestra en un ensayo triaxial estándar. En caso de poder trabajar con ambos ensayos en simultáneo, es posible establecer un modelo constitutivo que abarque un mayor rango de esfuerzos.
- Es importante resaltar que, a pesar de que el cCBR es una opción adecuada para estimar valores de rigidez, la ejecución de un ensayo de este tipo requiere más trabajo de campo y laboratorio que la de un ensayo triaxial cíclico; esto debido a que en la exploración se requiere la extracción de 3 moldes inalterados de CBR por ensayo, en lugar de la obtenida con un tubo de pared delgada, y se necesita ejecutar 3 veces el mismo procedimiento, algo que no ocurre en el ensayo de M_r . Sin embargo, su gran ventaja es que el equipo requerido es una prensa fácil de operar, la cual es posible encontrar en cualquier laboratorio donde se realicen ensayos de rutina, algo que no sucede con la máquina triaxial usada en la determinación del módulo resiliente.
- Otro punto fundamental de cuidado en el ensayo cCBR es que el proceso de extracción de muestras debe ser ejecutado con cuidado y teniendo la mayor proximidad posible entre las tres muestras, con el fin de que estas sean lo más similares posibles en sus propiedades, y así tenga validez el análisis de los resultados obtenidos.
- Finalmente, fue posible establecer un protocolo del ensayo cCBR y el costo de este, el cual comparativamente con el ensayo de M_r cuesta cerca de una tercera parte, postulándose como una opción viable cuando se tienen presupuestos limitados o

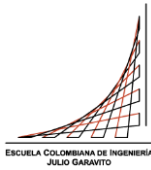
ante el interés de obtener mayor información o datos (Ejecutar más ensayos) con un mismo presupuesto para un proyecto.

6.2. Recomendaciones

- Los resultados obtenidos demuestran que la fórmula utilizada en este estudio para el cálculo del E_{equi} es adecuada, aun cuando se realizaron suposiciones respecto a la relación de Poisson, se recomendaría en futuras investigaciones incluir ensayos que permitan determinar dicho parámetro, y de esta manera refinar aún más los valores de módulo equivalente calculados.
- A pesar de contar con resultados satisfactorios para estimar el M_r a partir del ensayo cCBR para suelos de subrasante, valdría la pena evaluar su aplicabilidad para otro tipo de suelos, usados en la construcción de pavimentos. En caso de utilizar materiales granulares o que requieran compactación en laboratorio será importante establecer un adecuado proceso de compactación que permita su fácil repetitividad para la elaboración de las muestras.
- La observación respecto al cálculo del esfuerzo σ_3 como $0.01\sigma_1$ para obtener las constantes experimentales del *modelo universal*, da la posibilidad de contemplar contar con un mecanismo con el cual medir dicho esfuerzo durante el ensayo en lugar de asumirlo, puede ser mediante la ubicación de sensores laterales en el molde de CBR, especialmente si se plantea establecer la aplicabilidad de este ensayo en materiales cuyo módulo depende de manera importante de dicha presión de confinamiento (Materiales granulares).
- Con este estudio se determinó la viabilidad de ejecutar el ensayo cCBR para obtener el Módulo resiliente de suelos finos de subrasante de consistencia blanda, por lo que se recomienda su empleo cuando no se disponga de los equipos, ni de los recursos para llevar a cabo pruebas triaxiales, como sucede en muchas regiones en desarrollo.

Anexos

**Anexo A. Propuesta protocolo ensayo CBR cíclico para muestras
inalteradas A – 01**



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Laboratorio de Suelos y Pavimentos
Ensayo CBR cíclico (cCBR) sobre muestra inalterada

1. OBJETO

- 1.1. Este método describe el procedimiento para la determinación del módulo equivalente (E_{equi}) de los suelos de subrasante en muestra inalterada.
- 1.2. En este método, los niveles de esfuerzo empleados para determinar el módulo equivalente dependen de la penetración objetivo, la cual se estableció a partir de recomendaciones de la literatura.
- 1.3. El valor de módulo equivalente determinado por este método es un valor promedio del módulo elástico de los materiales ensayados, reconociendo ciertas características de no linealidad.
- 1.4. Los valores de módulo equivalente se pueden emplear en conjunto con modelos constitutivos, con el fin de valorar la respuesta de los suelos de subrasante ante la acción de las cargas y, por ende, para el diseño de estructuras de pavimento.

2. DEFINICIONES

- 2.1. *Muestras de ensayo* – Muestras de suelo no tratado tomadas mediante moldes de CBR inalterado.
- 2.2. *Carga axial máxima aplicada* (P_{max}) – Carga total aplicada a la muestra, incluye la carga de contacto y la carga cíclica (Resiliente).

$$P_{max} = P_{contacto} + P_{cíclica}$$

- 2.3. *Carga de contacto* ($P_{contacto}$) – Carga total aplicada a la muestra para mantener un contacto positivo entre ella y el pistón, se recomienda que sea cercana al 10% de la carga máxima aplicada.

$$P_{contacto} \approx 0.1 * P_{max}$$

- 2.4. *Esfuerzo axial máximo aplicado* (S_{max}) – Esfuerzo total aplicado a la muestra, incluyendo el esfuerzo de contacto y el esfuerzo cíclico.

$$S_{max} = P_{max}/A_{pistón}$$

- 2.5. *Esfuerzo axial cíclico* ($S_{cíclico}$) – Esfuerzo vertical cíclico (resiliente) aplicada en cada serie contemplada en la prueba.

$$S_{cíclico} = P_{cíclico}/A_{pistón}$$

- 2.6. *Esfuerzo de contacto* ($S_{contacto}$) – Esfuerzo axial aplicado a la muestra, que se mantiene durante la prueba para asegurar el contacto del pistón y el espécimen.

$$S_{contacto} = P_{contacto}/A_{pistón}$$

También,

$$S_{contacto} \approx 0.1 * S_{max}$$

- 2.7. *Presión de cámara* (S_3) – Presión de confinamiento que se produce al penetrar la muestra de suelo, se considera razonable un valor del 1% con respecto al esfuerzo máximo.

$$S_3 = 0.01 * S_{max}$$

- 2.8. *Deformación axial resiliente* (w) – Deformación axial resiliente (recuperada) debida a $S_{cíclico}$.

- 2.9. *Deformación unitaria resiliente* (ε_r) – Deformación unitaria axial resiliente (recuperada) debida a $S_{cíclico}$.

$$\varepsilon_r = w/L$$

Donde: L : Longitud del molde

- 2.10. *Relación de Poisson* (ν) – Constante elástica que es la relación entre la deformación lateral y la deformación axial.

- 2.11. *Módulo equivalente* (E_{equi}) – Promedio de la variación a escala “global” del módulo de rigidez del material en el molde.

$$E_{equi} = \frac{1.513 * (1 - \nu^{1.104}) * S_{cíclico} * A_{pistón}}{w^{1.012}}$$

3. RESUMEN DEL MÉTODO

Se aplica un esfuerzo axial cíclico repetido, de magnitud conocida a una velocidad estándar, a un espécimen de ensayo que se encuentra dentro de un molde de medidas preestablecidas. Durante las aplicaciones del esfuerzo dinámico, dado que

el material se encuentra dentro de un molde rígido y está sometido a unas sobrecargas en su parte superior, se presenta un esfuerzo estático en su contorno. Se mide la deformación axial total resiliente (recuperable) de respuesta del espécimen y se calcula el módulo equivalente a partir de dicha deformación, el esfuerzo aplicado y la relación de Poisson del material.

4. IMPORTANCIA Y USO

- 4.1. El ensayo proporciona una relación básica entre el esfuerzo y la deformación de los materiales bajo cargas repetidas, aplicable a modelos constitutivos.
- 4.2. Proporciona un medio de evaluación de los materiales de subrasante bajo una gran variedad de situaciones (humedad, densidad, entre otros) y de estado de esfuerzos, que simulan las condiciones de trabajo de un pavimento cuando recibe cargas móviles.

5. EQUIPO¹

- 5.1. *Prensa* – Utilizada para generar la penetración de un pistón dentro del espécimen de ensayo. Debe estar equipada con una cabeza o base móvil que se mueva a una velocidad uniforme de 1.27mm/min (0.05"/min), con una tolerancia de $\pm 20\%$. La capacidad de la prensa dependerá del valor del valor de CBR reportado por el material:

Tabla A-01- 1 Capacidad mínima de carga de la prensa

Valor de CBR	Capacidad mínima	
	kN	lbf
20	11.2	2500
50	22.3	5000
> 50	44.5	10000

¹ Esta sección corresponde a los equipos descritos en la norma INV – E – 148 – 13 “*CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada*”, no obstante, queda a criterio del cliente si desea adicionar o modificar lo aquí presentado con el fin de obtener resultados adicionales o más refinados.

- 5.1.1.** La máquina debe estar equipada con un dispositivo indicador de carga que tenga una aproximación de lectura adecuada para la máxima carga prevista durante la penetración. La aproximación de la lectura deberá ser de 44N (10lbf) o menos si la prensa tiene una capacidad de carga de 44.5kN (10kip) o más; deberá ser de 22N (5lbf) si la capacidad de carga es 22.3kN (5kip); y deberá ser de 8.9N (2lbf) para una capacidad mínima de 11.2kN (2.5kip).
- 5.1.2.** El dispositivo medidor de la penetración (dial mecánico o transductor de desplazamiento electrónico) debe dar lecturas con una aproximación a los 0.025mm (0.001") más cercanos y estar asociado a un accesorio de montaje, el cual debe establecer una conexión entre el medidor de penetración, el pistón de penetración y el borde del molde, para brindar medidas de penetración correctas.
- 5.2.** *Moldes* – Cada molde deberá ser un cilindro de metal rígido de 152.40 ± 0.66 mm de diámetro y de 177.80 ± 0.46 mm, provisto con un collar inferior de al menos 50.80mm de alto y uno superior cortante de 38mm, cuyo calibre permita la obtención de muestras inalteradas al hincarlo, tal como se muestra en la Figura A-01- 1.
- 5.3.** *Sobrecargas metálicas* – Tipo herradura con una masa de 2.27 ± 0.02 kg cada una y 149.23 ± 1.6 mm de diámetro exterior.
- 5.4.** *Pistón de penetración* – Cilíndrico, metálico, de 49.63 ± 0.13 mm de diámetro, área de 1935mm^2 y con una longitud necesaria para realizar el ensayo de penetración con el número requerido de sobrecargas. Se debe tener en cuenta que el mínimo de sobrecargas a utilizar es 2.
- 5.5.** *Horno* – Termostáticamente controlado, preferiblemente de tiro forzado, regulable a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- 5.6.** *Balanza* – Una de 20kg de capacidad, con posibilidades de lectura de 1g.

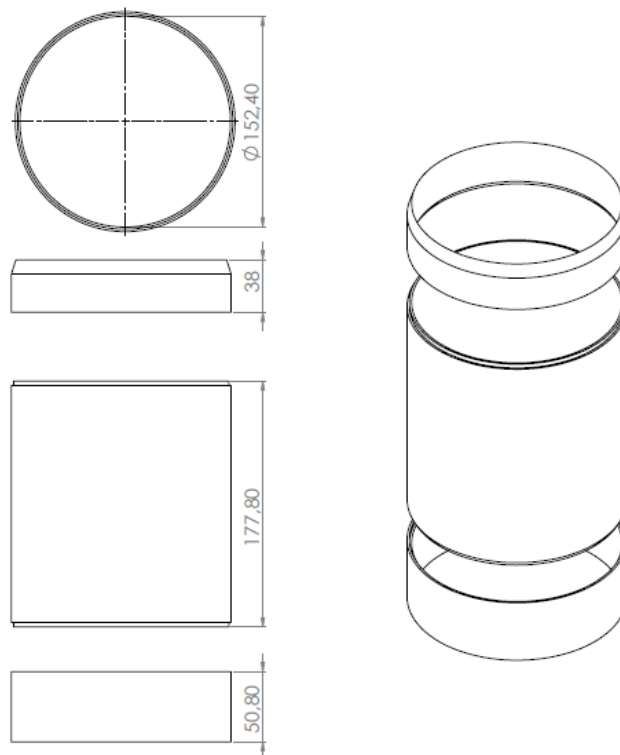


Figura A-01- 1 Dimensiones del molde de cCBR (en mm)

6. PROCESO DE TOMA DE MUESTRAS

Para la obtención de las muestras inalteradas se sigue el procedimiento presentado en la norma INV – E – 104 – 13 “*Toma de muestras inalteradas de suelo en superficie*”, específicamente la sección 3.3 “*Toma de muestra con un cilindro de filo cortante*”.

7. PENETRACIÓN DE LAS MUESTRAS

El procedimiento consiste en la ubicación de la muestra en la prensa con las respectivas sobrecargas y en utilizar el modo de desplazamiento controlado. Un esquema general de instalación de la muestra para el ensayo se presenta en la Figura A-01- 2.

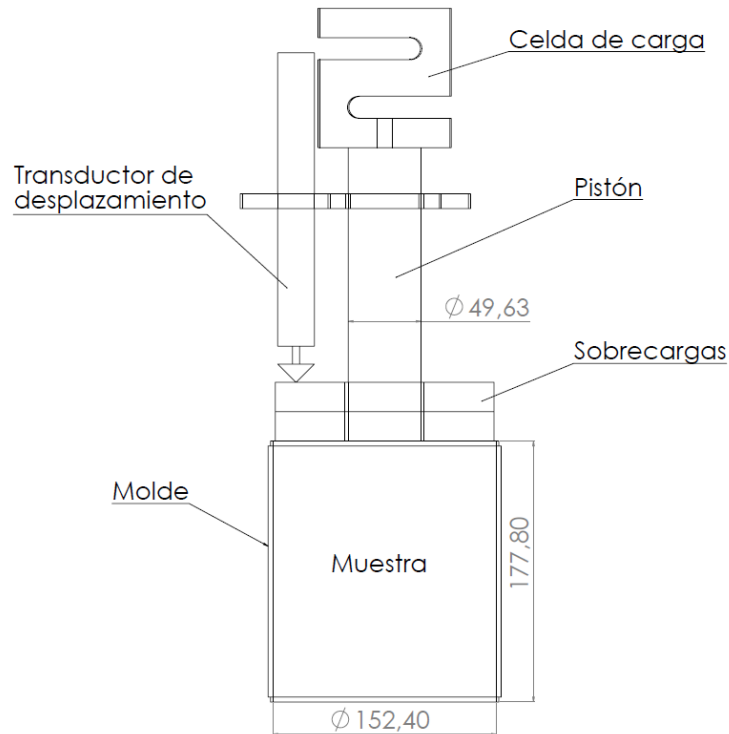


Figura A-01- 2 Esquema del montaje del ensayo de cCBR (Medidas en mm)

Para simular la aplicación de la carga repetida, el procedimiento recomendado es el siguiente:

- 7.1. Puesto que se requiere determinar el comportamiento del material ante diferentes estados de esfuerzos, la ejecución del ensayo se debe hacer a diferentes niveles de penetración. Se deben ejecutar ensayos de cCBR a una penetración establecida de 0.635mm, 1.27mm y 2.54mm aproximadamente – un ensayo por penetración para un total de 3 pruebas. Es importante aclarar que para cada uno de estos ensayos se recomienda un material no afectado previamente por ensayos, ni estáticos ni dinámicos, razón por la cual se utiliza un molde para la ejecución de las penetraciones más bajas (0.635mm y 1.27mm) en cada cara de la muestra, y otro molde con una muestra idéntica para la penetración de 2.54mm.
- 7.2. La muestra es cargada a 1.27mm/min hasta la deformación objetivo (0.635, 1.27 o 2.54mm, aproximadamente). La carga que se requirió para dicha penetración es anotada e inmediatamente se comienza la descarga hasta aproximadamente el 10% de dicha carga, a la misma velocidad.
- 7.3. La muestra es cargada nuevamente hasta la misma carga anotada en el paso anterior para la penetración objetivo, y descargada hasta aproximadamente el

10%, dicho de otro modo, la carga máxima y mínima en cada ciclo se mantienen constantes durante el ensayo.

- 7.4. Estos ciclos carga-descarga son repetidos entre 100 y 150 veces, punto en el que la deformación permanente debida a los últimos 5 ciclos de carga sera inferior al 3% de la deformación total.
- 7.5. Finalmente se toma una muestra representativa con el fin de determinar el contenido de humedad del material. Su densidad aproximada se establece conociendo la masa y volumen del molde y determinando la masa del molde con la muestra.

8. CÁLCULOS

- 8.1. Los cálculos se efectúan empleando la Tabla A-01- 2. Se debe calcular el valor del módulo equivalente para cada uno de los tres ensayos de carga, utilizando el promedio de los últimos cinco ciclos de cada ensayo.

Tabla A-01- 2 Formato de datos de laboratorio

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	
Peso unitario de la muestra (kN/m ³)	
Masa sobrecargas (kg)	
Relación de Poisson del suelo	B
Diámetro del pistón penetrado (mm)	C
Área del pistón penetrado (mm ²) – { $\pi(C/2)^2$ }	D

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)			
Carga máxima pistón (kg) E			
Carga cíclica pistón (kg) – { $E-G$ } F			
Carga de contacto pistón (kg) G			
Esfuerzo máximo pistón (MPa) – { $(9.81 * E) / D$ } H			
Esfuerzo desviador pistón (MPa) – { $(9.81 * F) / D$ } I			
Esfuerzo confinamiento (MPa) – { $0.01 * H$ } J			
Cortante octaédrico (MPa) – { $(\sqrt{2/3}) * I$ } K			
Invariante de esfuerzos (MPa) – { $I + 3 * J$ } L			
Deformación elástica promedio de los últimos 5 ciclos (mm) M			
Módulo equivalente (MPa) – { $(1.513 * (1 - (B^{1.104})) * I * (C/2)) / (M^{1.012})$ } N			

9. INFORME

Deberá incluir, como mínimo, lo siguiente:

- 9.1. Identificación completa de la muestra de ensayo (Proyecto, número y localización, profundidad de muestreo, etc.)
- 9.2. Descripción de las pruebas realizadas para la identificación de la muestra: Descripción visual (norma INV E-102); granulometría (norma INV E-123); límites de Atterberg (normas INV E-125 e INV E-126); clasificación formal (normas INV E-180 e INV E-181).
- 9.3. Humedad natural y peso unitario de las muestras en el terreno.
- 9.4. Pesas de sobrecargas utilizadas.
- 9.5. Formato diligenciado presentado en la sección 8.

10. NORMAS DE REFERENCIA

Araya, A. A. (2011). Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements. Delft University of Technology.

INV – E – 148 – 13

ASTM D 1883 – 07

INV – E – 156 – 13

AASHTO T 307 – 99 (2007)

Anexo B. Cotizaciones maquinaria y herramienta B – 01



Transversal 34 Sur # 32 D 55
La Magnolia (Envigado) - Colombia
Codigo Postal: 055422

www.anchicos.com
ventas@anchicos.com
Tel. +57(4) 596 40 30 / +57 300 718 51 37

Anchico's Tecnología e Ingeniería SAS

NIT : 901.065.141.8

Cotizacion # : **ANC-191629**

Fecha: 17-jul-19

Moneda: Pesos COL

Codigo ID:		Atencion:	0
Cliente:	Carolina Bojaca	Telefono:	0
Direccion:	0	e-mail:	
Ciudad:	0	Referencia:	Solicitud via Mail. Oficina
Cod. Postal:	0	Enviar via:	Entrega en su laboratorio
NIT:	0	Proveedor:	Humboldt USA / Varios

Tiempo de entrega estimado:	Terminos de pago	Oferta tipo:	Oferta valida por:	IVA(%)
4 a 6 Semanas	50% con la orden + 50% con la entrega.	1	15 dias	19

Item	Código	Descripción del equipo	Cantidad	Precio Unitario Exc IVA	TOTAL Exc IVA
Maquina multiensayos:					
1	HM-5030.3F	Máquina automática, con pantalla táctil de 178 mm, permite el control en tiempo real y visualización de los valores tanto gráfica como numérica, permite visualizar por medio de tablas gráficas los ensayos Marshall, Hveem, TSR y SCB, CBR y LBR, compresión Inconfinada y Triaxial UU, CU, CD, UC, capacidad 50 kN, debe almacenar 1000 ensayos con hasta 3.000 puntos por ensayo. Cuatro canales (dos para carga y dos para deformación), velocidad regulable de 0 a 76,200 mm/min, comunicación vía LAN-Ethernet y dos puertos USB, un puerto delante para transferencia de datos y otro atrás para ser utilizado para alimentar un punto de acceso inalámbrico. Dimensiones del marco de carga: Espacio horizontal de 380 mm, luz vertical de 1.000 mm y carrera del plato de 100 mm. Conexión eléctrica a 110V/60Hz.	1	34,921,315.00	34,921,315.00
Accesorios Obligatorios a Elegir según Ensayos a Realizar:					
2	HM-2300.100	Celda de carga Tipo-S, capacidad: 10,000lbs (50Kn)	1	1,960,823.00	1,960,823.00
3	HM-2300.005	Celda de carga Tipo-S, capacidad: 500 lbs (2.5KN), con adaptador de 3/4"	1	1,851,361.00	1,851,361.00
4	HM-2310.10	Transductor de desplazamiento, rango: 1" (25mm)	1	3,775,122.00	3,775,122.00
5	HM-2310.20	Transductor de desplazamiento, rango: 2.0" (50mm)	1	4,188,834.00	4,188,834.00
6	H-4178	Piston de Penetración para ensayo CBR.	1	341,887.00	341,887.00
7	HM-4178BRT	Sujetador para Transductor de desplazamiento.	1	284,427.00	284,427.00
8	HM-5001SW	Modulo de software NEXT para ensayos CBR/LBR.	1	2,327,130.00	2,327,130.00
9	HM-5005SW	Modulo de software NEXT para ensayos Marshall	1	4,395,690.00	4,395,690.00
10	HM-5004SW	Modulo de software NEXT para ensayos "Unconfined Compression (UC) Triaxial"	1	2,327,130.00	2,327,130.00
11	HM-2002	Plato Superior para ensayos de Compresión Inconfinada	1	285,749.00	285,749.00
Nota: Flete a Destino, la mercancia viaja por Cuenta y Riesgo del Cliente					



Anchico's Tecnología e Ingeniería SAS

NIT : 901.065.141.8

Transversal 34 Sur # 32 D 55 www.anchicos.com
 La Magnolia (Envigado) - Colombia ventas@anchicos.com
 Codigo Postal: 055422 Tel. +57(4) 596 40 30 / +57 300 718 51 37

Cotizacion # : ANC-191629

Fecha: 17-jul-19

Moneda: Pesos COL

Codigo ID:		Atencion:	0
Cliente:	Carolina Bojaca	Telefono:	0
Direccion:	0	e-mail:	
Ciudad:	0	Referencia:	Solicitud via Mail. Oficina
Cod. Postal:	0	Enviar via:	Entrega en su laboratorio
NIT:	0	Proveedor:	Humboldt USA / Varios

Tiempo de entrega estimado:	Terminos de pago	Oferta tipo:	Oferta valida por:	IVA(%)
4 a 6 Semanas	50% con la orden + 50% con la entrega.	1	15 dias	19

Item	Código	Descripción del equipo	Cantidad	Precio Unitario Exc IVA	TOTAL Exc IVA
Enviar a:	Carolina Bojaca			SUBTOTAL	56,659,468.00
Atencion:	0			Embalaje y manejo	0.00
Direccion:	0			Gastos de traslado y seguro	0.00
Suburb:	0			TOTAL sin IVA	56,659,468.00
Postcode:	0			IVA (19%).	10,765,298.92
Phone:	0			TOTAL con IVA	67,424,766.92

CONDICIONES DE LA OFERTA:		Datos Bancarios
Validez:	Quince (15) dias calendario, a partir de la fecha	Favor realizar su deposito en la siguiente cuenta corriente:
Impuesto:	Esta oferta se ha calculado con un IVA=19%.	Anchicos Tecnologia e Ingeniería SAS
Instalacion:	Incluida - Ejecutada por Personal Tecnico de ANCHICOS TECNOLOGIA E INGENIERIA S.A.S.	Banco: Bancolombia
Garantia:	Equipos Un año en productos Humboldt, Un año en productos Nacionales. - contra defectos de fabricacion en equipos electricos y electrónicos, salvo uso inadecuado o fallas eléctricas. Materiales consumibles y vidrieria no tienen garantía.	Cuenta No.: 617-745176-74
Precios:	Calculados a la tasa de cambio actual y podrian ser recalculados. Precios serán mantenidos al recibir orden de compra.	
Compras:	Se requiere una Orden de Compra formal para la ejecucion de nuestro servicio.	

Agradeciendo su preferencia y esperando cumplir sus necesidades y expectativas, Cordialmente,

RODRIGO ANCHICO I.
 Gerente
 gerencia@anchicos.com
 Tel. 018000413646 / 300-7185137

Notas Generales:

Favor referirse al catalogo Humboldt para mayor informacion de los productos listados en esta cotizacion.



GEOTECHNICAL
ELITE SERIES



ANCHICO'S
TECNOLOGÍA E INGENIERÍA



ASTM HUMBOLDT
GUIDE

PROMOCION DE FIN DE AÑO

EQUIPOS MARCA HUMBOLDT (USA) y MATEST (ITALIA)

OFERTA VALIDA HASTA 28/02/18 o AGOTAR EXISTENCIA









Anchicos Tecnología e Ingeniería se complace en ofrecer nuestra línea de equipos Marca Humboldt (USA) y MATEST (Italia) con descuentos de hasta el 10% sobre lista de precios.

Las cantidades en stock son limitadas, favor contacte nuestro departamento de ventas para expresar su interés, reservar los items requeridos o proceder con la compra de los mismos. Correos: ventas@anchicos.com y comercial@anchicos.com

Una vez agotada la existencia, el precio y tiempo de entrega podría variar. Esto sera confirmado por medio de una cotizacion.

Los items listados a continuacion se encuentran disponibles para entrega inmediata.

Item	Código / Modelo	Marca	Descripción del Equipo	Cant.	Precio Uni.
EQUIPOS HUMBOLDT (USA)					
1	H-4245	HUMBOLDT	APARATO PARA ENSAYO DE CONO Y ARENA Diam. 6,5" (165 mm) El aparato de cono de arena determina la densidad in situ de suelos que tienen un tamaño máximo de partícula de hasta 2" (51 mm) utilizando volúmenes hoyo de prueba de aproximadamente 0.1ft ³ (2,8 L).	2	283,134
2	H-4246	HUMBOLDT	PLACA PARA APARATO DE CONO Y ARENA Diam. 6,5" (165 mm) Utilizadas con los aparatos de cono de arena para simplificar la eliminación de la suciedad de agujero de prueba y actuar como plantilla para controlar el diámetro de agujero. Reparto de aleación de aluminio. Plate tiene una dimensión global de 12 x 12" (305 x 305 mm).	2	139,628
3	H-4967	HUMBOLDT	MEDIDOR DE HUMEDAD SPEEDY 2000 El Speedy Series 2000 medidor de humedad es un sistema portátil para medir el contenido de humedad de una amplia gama de materiales, incluyendo suelos, áridos, polvo y polvos (y líquidos). El sistema consiste en un recipiente de baja presión equipado con un medidor de presión y una balanza electrónica y accesorios de prueba.	1	6,377,979
4	H-4368A	HUMBOLDT	DIAGRAMA COLORES DE SUELOS Munsell Soil Color Charts se desarrollaron con el servicio de conservación de suelos de Estados Unidos para clasificar el color del suelo, sino que también se pueden utilizar para las rocas, muestras arqueológicas y otros productos naturales. tablas Munsell son una herramienta estándar para los geólogos, ingenieros civiles, y científicos del suelo.	1	892,021
5	H-3945	HUMBOLDT	TAMICES EN ACERO INOXIDABLE DE LAVADO Norma ASTM E 11- AASHTO M92 TAMAÑO 8" Diámetro X 4" Alto Tamiz Malla No 200	4	552,944
6	H-3806	HUMBOLDT	ROCIADOR PARA LAVADO DE TAMICES Controla la pulverización y la presión del agua. Incluye válvula, manómetro, tubería y boquilla de pulverización H-3808.	1	468,164

Item	Código / Modelo	Marca	Descripción del Equipo	Cant.	Precio Uni.
42	H-1763A 	HUMBOLDT	BOMBA DE ALTO VACIO 115V 60HZ Esta Bomba de Alto Vacío con aspas deslizables de desplazamiento rotatorio de dos etapas de accionamiento directo tiene gas regulador y una trampa para reducir el riesgo de que el aceite sea succionado dentro del sistema.	1	3,192,047
43	H-1471 	HUMBOLDT	EXTRACTOR ANALOGO 3000G 115V 60HZ Este extractor es una versión de motor abierto de los modelos a prueba de explosiones descritos anteriormente. Si bien es seguro para operar, no proporciona la seguridad adicional del diseño a prueba de explosiones. Este extractor es una gran opción económica o para aquellos que necesitan un extractor, pero no puede usarlo extensivamente.	1	12,648,636
44	H-3538D 	HUMBOLDT	TERMOMETRO DIGITAL CALIBRABLE A PUEBA DE AGUA Doble escala, rango: -40° a 232°C ±1.0°C (-40° a 450°F ±2.0°F) Sensor 5"	4	155,142
45	H-2634D 	HUMBOLDT	TERMOMETRO TIPO DIAL Termómetros de lectura directa de metal para uso general, doble escala. Rango: 0 to 260°C (50 to 500°F) Divisiones 2°C y 5°F. Sensor de acero inoxidable de 8" de largo x 0.15" dia (203 x 4 mm). Dial 1-3/4" (45mm) dia. Un ajuste externo permite la recalibración	10	94,910
46	H-30200 	HUMBOLDT	HORNO DE MUFLA Capacidad 2,1 litros, 1500W, Benchtop, 1100 ° C Horno con aislamiento de fibra cerámica, que proporciona más rápido calentamiento y la reducción del consumo de energía. control digital de la temperatura a 1100 °C con una sola pantalla que muestra la temperatura real o punto de ajuste. Se entrega con el cable de alimentación.	1	6,870,509
47	H-30128 	HUMBOLDT	HORNO DE LABORATORIO CONVECCION DE GRAVEDAD 437°F / 225°C 115V 60HZ 1600 W Los hornos de convección por gravedad de calidad tienen una construcción de doble pared y un pesado exterior de acero soldado. El espacio de trabajo está aislado del gabinete exterior con una pulgada de lana mineral de alta densidad, y los interiores están hechos de acero aluminizado resistente a la corrosión. Se utilizan elementos de baja densidad de vatios incoloy-forrados. Incluye el control térmico automático, el indicador de calor de la luz piloto y un termómetro de mercurio montado en la parte superior (0 °-300 ° C). Todos los hornos vienen con dos estantes ajustables y un cable de alimentación de 6 pies y 3 hilos y un enchufe con conexión a tierra. Las unidades también tienen pies de goma a prueba de arañazos, una puerta de cuerpo entero con bisagras para piano y una manija de puerta termoplástica extruida.	1	3,490,695
48	H-30131 	HUMBOLDT	HORNO DE CONVENCCION FORZADA 230 VAC Capacidad 2.86 pié3 (81 L). Tiene controlador de temperatura hidráulico, sensibilidad ±1°, 115V, 60Hz, 1600 Watts mínimo. Interior: 18" x 19.6" x 14" (457 x 498 x 356mm) Total: 20" x 33.5" x 16" (508 x 851 x 406mm)	2	4,476,303
49	H-30145E 	HUMBOLDT	HORNO DE LABORATORIO (198 litros) Horno eléctrico para laboratorio , con ventilación forzada de aire , lo que permite temperatura uniforme en la cámara de calentamiento, control de temperatura digital regulable hasta 225°C. Dimensiones internas: 25,5" x 24" x 20" (648 x 610 x 508 mm). Incluye dos parrillas y soporte Requerimiento electrico 115V/60Hz, 1920 watts.	1	8,254,467



HORNOS DE SECADO | Hornos De Convección Natural

Capacidad de 36, 75, 110, 300, 400 Lts | Amb. +5°C a 220°C

Ideal para aplicaciones de secado, pre-calentamiento, curado y envejecimiento.



- Cámara interna en acero inoxidable 304.
- Circulación de aire optimizada gracias al potente motor centrifugo.
- Estructura externa en acero CR recubierta en pintura epoxica.
- Temporizador digital 99 hr 59 min.
- Limitador de temperatura excesiva ajustable por el usuario.
- Alarma audible por exceso de temperatura.
- Estantes cromados (2) con ajuste posiciones diferentes.
- También disponibles con ventana frontal.

Modelo	HRN-1001	HRN-1002	HRN-1003	HRN-1004	HRN-1005	
Capacidad	36 Lts	75 Lts	110 Lts	300 Lts	400 Lts	
Temperatura	Rango: Ambiente +5 °C ~ 220 °C					
	Precisión: ±0.5 °C a 120 °C					
	Uniformidad: ±3.0 °C a 120 °C					
	Tiempo a 120°C	25 minutos	30 minutos	35 minutos	40 minutos	45 minutos
Elementos calefactores	1100 W	1300 W	1500 W	2000 W	3400 W	
Temporizador	99 Hrs - 59 Min - 59 Seg.					
Control	Tipo: Digital PID					
	Sensor: Pt 100 Ω					
Dispositivo de Seguridad	Temperatura: Alarma audible por exceso de temperatura / Detección de error del sensor / Limitador de temperatura					
	Eléctrico: Protección contra sobrecarga o corto circuito					
Dimensiones a*f*h (cm)	Internas	36*28*38	40*40*47	45*45*55	65*58*80	55*55*134
	Externas	42*42*61,5	51*55*70	61*64*78	81*67*103	65*82*168
Soportes	Tipo	Parrilla en alambre (2 und)				
	Altura ajustable	50 mm mínimo entre bandejas				
	N° máximo de bandejas	7	8	9	11	11
Consumo de corriente	10 Amp.	12 Amp.	14 Amp.	18 Amp.	15 Amp.	
Alimentación	110 VAC 60Hz, 1 fase, conector con polo a tierra				220 VAC 50/60 Hz,	
Peso Neto Aprox.	42Kg	53Kg	62Kg	72 Kg	82 Kg	

Especificaciones técnicas sujetas a cambio sin previo aviso

Cada unidad incluye:

- Unidad de calentamiento horno (HRN-10XX)
- Cable de poder de alimentación
- Parrillas (2 und)
- Manual de operación



Información Y Ventas
311 542 0236

Los Accesorios disponibles no se incluyen con el equipo

ESTANTES | Accesorios

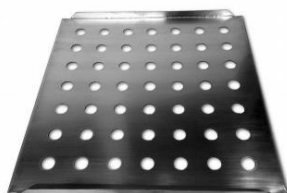
Para Hornos De Secado | Parrillas | Bandejas

Ideales para aprovechar la máxima capacidad de cada horno.



Parrillas cromadas

Modelo	HP-036	HP-075	HP-0110	HP-0300	HP-0400
Dimensiones	35.5*27.8	39.5*39.5	44.5*44.5	64.5*57.5	54.5*55.5
Material	Alambre cromado				
Compatible con horno	36 Lts	75 Lts	110 Lts	300 Lts	400 Lts



Bandeja en acero inox

Modelo	HB-036	HB-075	HB-0110	HB-0300	HB-0400
Dimensiones	35.5*27.8	39.5*39.5	44.5*44.5	64.5*57.5	54.5*55.5
Material	Acero Inoxidable				
Compatible con horno	36 Lts	75 Lts	110 Lts	300 Lts	400 Lts

¿No se ajustan a sus requerimientos?

Ofrecemos soluciones hechas a medida del cliente según sus necesidades y especificaciones.

Consúltenos y le asesoramos.





Cotización
No. C-1-338

Para	DIANA CAROLINA BOJACA TORRES
Nit	31.245.070
Fecha	2019-07-18

¡Estimado cliente! Dando atención a tu solicitud te enviamos la siguiente oferta:

Item	Código	Descripción	Cantidad	Unidad de medida	Vr. Unitario	Vr. Total	Fotos
1	HRN1003	Horno-Estufa de secado 110 Lts. Conexión Natural a 220°C. Control Digital tipo PID. Temporizador 99hr. 59W. 658Pa. Alimentación: Conexión USB para transmisión de datos. Dimen. Útiles (ø11h) - 45*45 - 56cm. Alimentación 110VAC. Marca: ELABORADA POR SIGO S.A. NIT 930 048 145-8	1,00	Und.	5.585.600,00	6.646.864,00	Ver
Total Bruto					5.585.600,00	6.646.864,00	
Subtotal					5.585.600,00	6.646.864,00	
IVA 19%					1.061.264,00	6.646.864,00	
Total a Pagar						6.646.864,00	

Validez de la oferta: Agosto 02 de 2019
Garantía: Un (1) año por defectos de fabricación
Observaciones: Incluye gasto de envío
Tiempo de entrega: 10 a 15 días hábiles
Forma de pago: Contado



Número de cotización 00008760
Fecha de elaboración 19/07/2019

NIT 1.073.164.830
Razón Social INDEPENDIENTE
Nombre completo Diana Carolina Bojacá Torres
Correo electrónico
Teléfono 1
Termino de negociación DDP
Dirección
Divisa de la oportunidad USD

Referencia	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Descuento	Precio total
11124701	<p>BALANZA DE PRECISIÓN MS-L Equipos resistentes diseñados para durar. Construcción robusta - La resistente carcasa metálica y la increíble protección contra sobrecargas de más de 100 kg protegen la balanza al trabajar con cargas pesadas. celda de carga de alto rendimiento - La celda de carga de alto rendimiento MonoBloc garantiza una prolongada vida útil. Su extrema resistencia resulta ideal para aplicaciones pesadas. MODELO: MS32001L Especificaciones Técnicas: Capacidad máxima: 32.200 g Legibilidad: 1 g Repetibilidad (típica): 0,4 g Peso mínimo (USP), típico: 1.500 g Interfaces: RS232 y USB Linealidad ±: 1 g Plataforma Grande www.mt.com/ms-precision</p>	1,00	USD 5.206,00	7,00%	USD 4.841,58
30243383	<p>BALANZA ME5002T Las balanzas ME-T son instrumentos fáciles de usar, incluyen las funciones de pesaje esenciales para proporcionar resultados precisos a diario, incluyen una pantalla táctil de 4,55 pulgadas y ocho aplicaciones integradas que incluyen el control de peso, la totalización y la formulación para que los operarios puedan empezar a trabajar inmediatamente, además de ID de muestra y protección mediante contraseña que garantizan que el personal sin autorización no pueda realizar cambios. Especificaciones Técnicas: Capacidad máxima: 5200 g Legibilidad: 0,01 g Interfaces: RS232, Dispositivo USB, Host USB Ajuste: Interno / FACT Tiempo de estabilización: 1,5 s Repetibilidad: 0,01 g (2.000 g) Dimensiones del plato de pesaje: 180 mm Pesada mínima de acuerdo a USP 0,1%: 14 g Linealidad: ± 0,02 g Dimensiones (AxA): 100 mm x 200 mm</p>	1,00	USD 3.094,00	7,00%	USD 2.877,42

Subtotal USD 8.300,00
Descuento 7,00%
Valor Neto USD 7.719,00

www.labzul.com

Carrera 48 # 91-80 Castellana - Tel.: 57 (1) 518 5031 - info@labzul.com - Bogotá - Colombia



Número de cotización 00008760

Fecha de elaboración 19/07/2019

IVA USD 1.466,61

Total USD 9.185,61

Condiciones

CONDICIONES GENERALES DE LA OFERTA:

1. Validez de la oferta: Treinta (30) días continuos a partir de su envío por correo electrónico.
2. Tiempo de entrega: De acuerdo a disponibilidad de inventario en caso de importación sesenta (60) días, después de recibir la orden de compra/o servicio, y/o de acuerdo a disponibilidad de prestación del servicio de parte del cliente
3. Garantía: Doce (12) meses a partir de la entrega y recepción formal de los equipos por defectos de fábrica, en condiciones normales de almacenaje y manipulación. Los Electrodo y accesorios no contemplan garantía por mala manipulación y/o instalación o cambio de parte en el equipo por personal no capacitado.
4. Especificaciones de componentes a entregar, pueden variar según disponibilidad, y sujeto a revisión técnica. Solo se cotizan los componentes descritos, sin equipos auxiliares, accesorios ni extras.
5. **LABZUL S.A.S. Se encuentra realizando la implementación de factura electrónica. Con el fin de poder enviar sus facturas en forma electrónica, al momento de generar una orden de compra por favor enviarnos su RUT actualizado y el nombre y correo de la persona de contacto en su empresa para recibir facturas electrónicas; información importante que debemos recibir antes del 15 de julio de 2019. Las facturas se realizarán de acuerdo a los ítems contemplados en la oferta.**

Firma

Cordialmente,

Preparado por William González
Cargo Asesor Comercial Telefónico
Teléfono 0315185031
Correo electrónico william.gonzalez@labzul.com

VT-P-01-F-07 Revisión 6 Válido desde 2019-07-11



PINZUAR S.A.S
 NIT 800.006.900-3
 Cra 108#18-31
 Tel: (1) 7454555 - 3165251236
 Bogotá - Colombia

Cotización
 No. C-1-321344

Para	EDICO INGENIEROS S A S
Nit	900.979.850-0
Contacto	ANGELICA RINCON (edicoingenieros.sas@gmail.com)
Ciudad/Tel.	Bogotá - 3006597878
Fecha	2019-07-22

Respetados Señores:

En atención a su solicitud, ponemos a su consideración propuesta de cotización correspondientes a los productos y servicios de su interés.

Ítem	Referencia	Descripción	Fotos	Cantidad	Vr. Unitario	Vr. Total	Valor desc.	Impto. Cargo
1	000PS23	MOLDE PARA COMPACTACIÓN CBR - Normas: NTC 2122, ASTM D 1883, INV E 148 Se utiliza en la determinación de la resistencia a la penetración de un suelo en condiciones de Humedad / Densidad. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS: - Cuerpo: Diámetro interior de 152,4 mm (6") Altura de 177,8 mm, - Collar: Altura de 50,8 mm, - Base perforada: 12,7 mm x 200 mm x 200 mm	Ver	2,00	190.000,00	452.200,00	0,00	19 %
2	000PS24	MOLDE CBR INALTERADO - Normas: NTC 2122, ASTM D 1883, INV E 148 Molde sin base y collarin. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS : - Diámetro 152,4 mm, - Altura 177,8 mm.	Ver	2,00	65.000,00	154.700,00	0,00	19 %
3	000PS36	ARO CORTANTE PARA CBR - Normas: NTC 2122, ASTM D 1883, INV E 148 Permite la extracción de muestras sin distorsiones en el campo. Tiene un rebaje en la sección superior que permite montar el aro cortante en cualquier lado del molde CBR. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS : - Diámetro interior 152,4 mm, - Altura 38 mm.	Ver	1,00	75.000,00	89.250,00	0,00	19 %
4	00PG161	PESAS ABIERTAS PARA CBR - Normas: NTC 2122, ASTM D 1883, INV E 148 - Tipo Abierta - Ref. PG 161, Peso: 2,27 kg. Ø Interno : 53,98 mm, Ø Externo: 149,23 mm a 150 mm.	Ver	4,00	80.000,00	380.800,00	0,00	19 %
5	00PG162	PESAS CERRADAS PARA CBR - Normas: NTC 2122, ASTM D 1883, INV E 148 Tipo: cerrada, Ref.: PG 162, Peso: 2,27 kg, Ø Interno: 53,98 mm, Ø Externo: 149,23 mm a 150 mm.	Ver	4,00	65.000,00	309.400,00	0,00	19 %

Total Bruto 1.165.000,00

Subtotal 1.165.000,00

IVA 19% 221.350,00

Total a Pagar 1.386.350,00

ELABORADA POR SIGO S.A. NIT 830.048.145-8

CONDICIONES COMERCIALES

TIEMPO DE ENTREGA: 1 a 2 días hábiles después de confirmada su orden de compra al correo electrónico ventas2@pinzuar.com.co

FORMA DE PAGO: CONTADO.

VALIDEZ DE LA OFERTA: 60 días a partir de la fecha

GARANTÍA: Para equipos, un año por defectos de fabricación

PAGOS NACIONALES: Recaudo a nombre de Pinzuar Nit: 800.006.900-3. Banco Bancolombia - Cuenta Corriente No. 2379-553525-3. Banco Av Villas - Cuenta Corriente No. 394000723 - Cuenta Ahorros 394003537.

PAGOS INTERNACIONALES: Beneficiario: PINZUAR Nit. 800.006.900 - 3. Carrera 108 No. 18 - 31 Bogotá Colombia Tel: (571) 7454555 Cel: 3165251236 - 3165385810 E-mail: comercio.exterior@pinzuar.com.co

Banco Intermediario: CITIBANK Nueva York ABA 021000089 Swift CITIUS 33

Banco Pagador: BANCOLOMBIA, COLOMBIA Swift COLOCOBM Chips Uid CH 005

Banco Beneficiario: BANCOLOMBIA BOGOTA-COLOMBIA, Sucursal Av. Dorado Cuenta Corriente 23795535253

Los fletes de la mercancía van por cuenta del cliente fuera de la ciudad. Para los equipos que requieran ser descargados con Montacargas es necesario que el cliente asuma el costo del mismo, después de transcurridos 8 días de la recepción de la mercancía Pinzuar no se hace responsable por faltantes o daños.

NOTA: A TODOS NUESTROS CLIENTES INFORMAMOS QUE NUESTRO LABORATORIO DE METROLOGIA SE ENCUENTRA ACREDITADO EN LA NORMA NTC ISO IEC

17025, BAJO EL PROGRAMA DE LABORATORIOS DE CALIBRACIÓN CON CÓDIGO DE ACREDITACIÓN ONAC 11-LAC-004, PARA LONGITUD, MASAS, BALANZAS, FUERZA, PAR TORSIONAL Y TEMPERATURA. PARA SOLICITAR LOS SERVICIOS DE CALIBRACIÓN POR FAVOR COMUNIQUESE AL 7454555 Ext. 1113-1114-1115
CORREO ELECTRÓNICO comercial.laboratorio@pinzuar.com.co

Agradeciendo su amable atención y en espera de poder servirles

Cordialmente,

ARACELY ARDILA
DIRECTORA COMERCIAL

Para la certificación de producto tamiz bajo la norma ASTM E11, el ente certificador es Bureau Veritas Certification acreditado por ONAC para esta actividad.

LINA MARIA PAEZ
ventas2@pinzuar.com.co

EQUIPO PARA LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTOS - LABORATORIO DE METROLOGÍA ACREDITADO

Bogotá D.C. Colombia - PBX 7454555

Sede Principal - Carrera 108 N° 18 -31 - ventas@pinzuar.com.co

Laboratorios - Calle 18 N° 103B-72 - labmetrologia@pinzuar.com.co

Lima - Perú - Teléfonos 51(1) 5621263 - 4641606.

Calle Ricardo Palma N°998 Urb. San Joaquín Bellavista - Callao.

peru.comercial@pinzuar.com.co

WWW.PINZUAR.COM.CO



Bureau Veritas Certification se encuentra acreditado por ONAC

**Anexo C. Descripción procedimientos de caracterización y
clasificación de las muestras (Etapa 3) C – 01**

A. Propiedades volumétricas y gravimétricas

En estado natural, los suelos son sistemas de tres fases: sólidos, agua y aire, aunque en la realidad estas tres fases no están claramente separadas (Figura C-01- 1a), para desarrollar las relaciones volumétricas y gravimétricas se separan las tres fases, tal como se muestra en la Figura C-01- 1b. Las relaciones entre estas tres fases permiten avanzar en el análisis de la distribución de las partículas por tamaños y sobre el grado de plasticidad del conjunto, y esto a su vez influencia el comportamiento mecánico de los suelos (Das, 2001; Araya, 2011; Duque Escobar & Escobar, 2016).

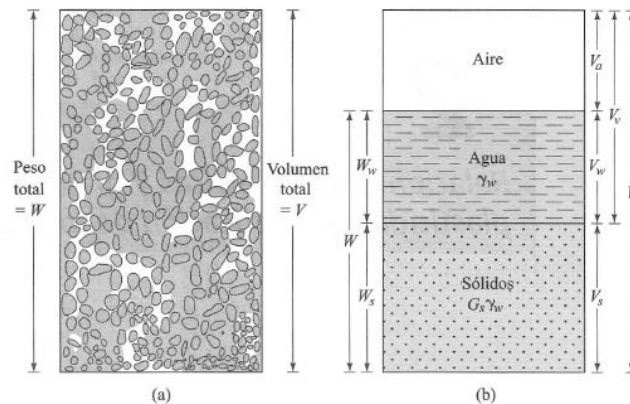


Figura C-01- 1 (a) Elemento de suelo en estado natural y (b) tres fases del elemento de suelo

Fuente: Tomado de Das (2001)

La obtención de dichas relaciones parte de la determinación en el laboratorio de algunas propiedades del suelo: humedad, peso unitario y gravedad específica. En cuanto a la humedad, la metodología está establecida en la norma INV-E-122 “Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado”, la cual consiste en tomar una muestra representativa de material y pesarla en un recipiente de masa conocida, luego secarla al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta obtener masa constante; la diferencia entre estas dos masas, respecto a la masa seca, es el contenido de agua (Ecuación C-01- 1).

$$\omega = \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_c} * 100 = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Ecuación C-01- 1

Donde:

ω : Contenido de agua (%)

w_1 : Masa recipiente y suelo húmedo, g

w_2 : Masa recipiente y suelo seco, g

w_c : Masa recipiente, g

w_w : Masa de agua, g

w_s : Masa de partículas sólidas, g

Por su parte, el peso unitario se obtiene mediante lo establecido en la norma ASTM D7263-09 "Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimen", la cual consiste en usar el principio de Arquímedes para obtener el volumen de una muestra de suelo cuya masa es conocida, ya que la densidad de cualquier material es la relación entre la masa y el volumen. Para evitar el cambio de humedad en la muestra cuando se sumerge en el agua, se hace uso de parafina de densidad conocida (En este caso 0.93 g/cm^3). Una secuencia del procedimiento se muestra en la Figura C-01- 2.



Figura C-01- 2 Procedimiento para la determinación del peso unitario de una muestra de suelo

Fuente: Tomada por el autor

Finalmente, la gravedad específica (G_s) se obtiene mediante la norma INV-E-128 "Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua". Este procedimiento consiste en utilizar un picnómetro, previamente calibrado, llenarlo con una cantidad específica de material seco y completar el volumen del picnómetro con agua destilada y desaireada; se registra la masa de este picnómetro con la lechada de suelo, al igual que la temperatura, con el objetivo de hallar el G_s a 20°C , tal como lo exige la norma, mediante la Ecuación C-01- 2 (Figura C-01- 3) (INVIAS, 2013).

$$G_s = k * \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = k * \left[\frac{M_s}{M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s)} \right]$$

Ecuación C-01- 2

Donde,

k : Coeficiente de corrección por temperatura

ρ_s : Densidad de las partículas sólidas, g/cm^3

$\rho_{w,t}$: Densidad del agua a la temperatura de ensayo, g/cm^3

M_s : Masa de sólidos del suelo secado al horno, g

$M_{pw,t}$: Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo, g

$M_{pws,t}$: Masa del picnómetro con agua y sólidos a la temperatura de ensayo, g



Figura C-01- 3 Procedimiento para determinación del Gs mediante un picnómetro

Fuente: Tomada por el autor

A partir de estas propiedades obtenidas en el laboratorio, también es posible determinar otras características claves que influyen en el comportamiento del suelo como lo son la relación de vacíos (e), el grado de saturación (S) y la porosidad (n):

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Ecuación C-01- 3

$$S = \frac{V_w}{V_v} * 100$$

Ecuación C-01- 4

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} * 100$$

Ecuación C-01- 5

Donde,

V_v : Volumen de vacíos, cm^3

V_s : Volumen de sólidos, cm^3

V_w : Volumen de agua, cm^3

V_t : Volumen total, cm^3

B. Límites de Atterberg

Cuando existen minerales de arcilla en los suelos de grano fino, éste puede ser remoldeado en presencia de cierta cantidad de agua sin desmoronarse. Esta naturaleza cohesiva se debe al agua absorbida que rodea las partículas de arcilla. A muy baja humedad, el suelo se comporta como un sólido frágil; por el contrario, cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo y el agua fluyen como un líquido. Es por lo anterior que, dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido, tal como se muestra en la Figura C-01- 4.

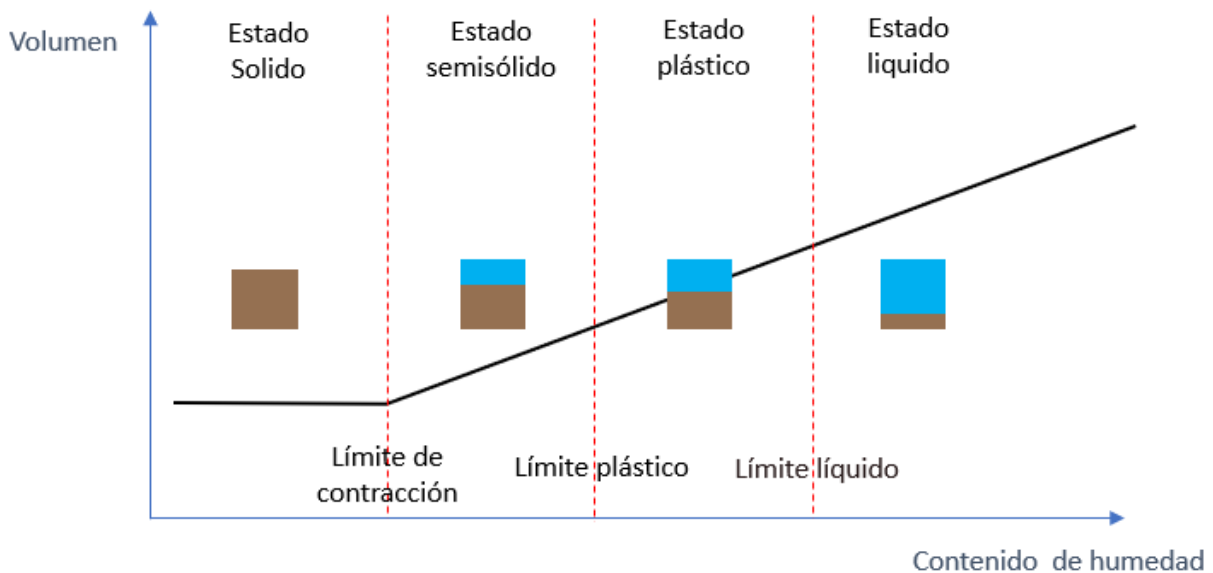


Figura C-01- 4 Límites de Atterberg

Fuente: Adaptado de Gutierrez (2018)

El contenido de agua, en porcentaje, en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, se define como *límite de contracción*; el contenido en el punto de transición de semisólido a plástico se denomina *límite plástico*; y la humedad en el que se pasa de estado plástico a líquido se llama *límite líquido*.

Los límites líquido y plástico proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos y su comportamiento ingenieril, dicho de otro modo, a partir de estos dos parámetros es posible clasificar o identificar los suelos. Para realizar dicha clasificación, es importante determinar el *índice de plasticidad (IP)*, el cual es la resta entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) (Ecuación C-01- 6).

$$IP = LL - LP$$

Ecuación C-01- 6

Casagrande estudió la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Con base en sus resultados, propuso la carta de plasticidad mostrada en la Figura C-01- 5, la cual permite la clasificación de los suelos finos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Das, 2001).

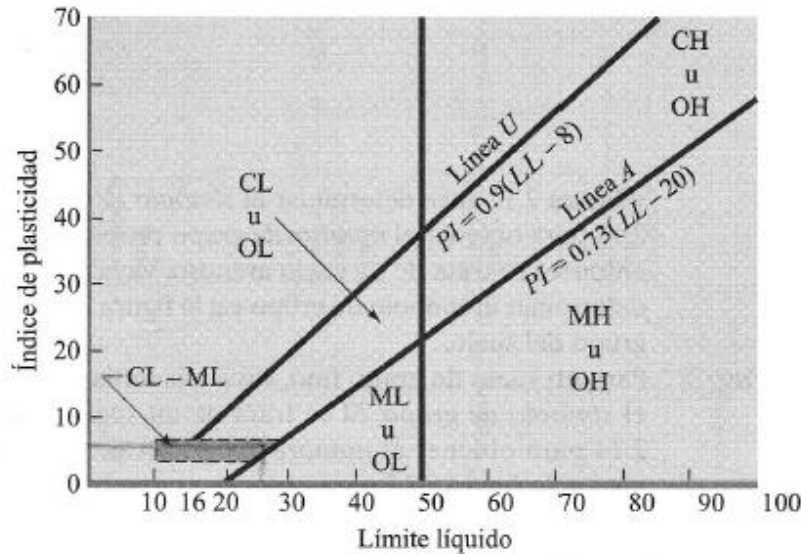


Figura C-01- 5 Carta de plasticidad de Casagrande

Fuente: Tomado de Das (2001)

Para determinar el límite líquido se hace uso de la norma INV-E-125 “Determinación del límite líquido de los suelos”, la cual consiste en tomar material menor a $425\mu\text{m}$ y esparcirlo sobre una cazuela de bronce que se divide en dos partes con un ranurador, permitiendo que esas dos partes fluyan como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la cazuela sobre una base normalizada (Figura C-01- 6).



Figura C-01- 6 Procedimiento para la obtención del límite líquido

Fuente: Tomada por el autor

Se requiere de al menos tres (3) tanteos a diferentes contenidos de agua, para dibujar dichos resultados y establecer una relación a partir de la cual se determina el límite líquido, el cual se define como la humedad en el cual se requiere de 25 golpes para cerrar la ranura generada en la cazuela, tal como se muestra en la Figura C-01- 7.

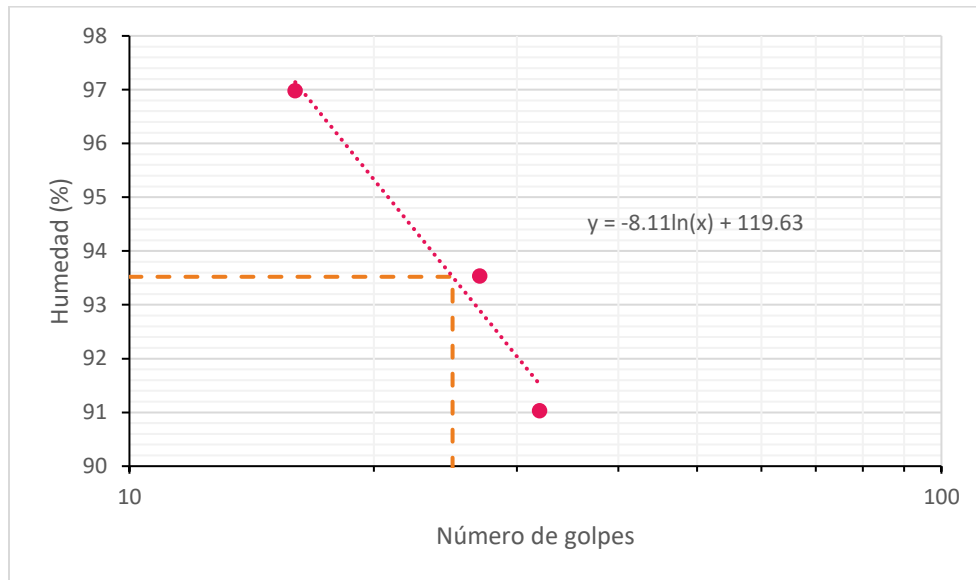


Figura C-01- 7 Método gráfico para obtener el LL

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, para determinar el límite plástico se utiliza la norma INV-E-126 “Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos”, la cual consiste en tomar pequeñas porciones material húmedo menor a 425 μ m y presionarlo de manera repetida para formar rollos de 3.2mm de diámetro, hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el cual se produce agrietamiento y/o desmoronamiento de los rollos (Figura C-01- 8) (INVIAS, 2013).



Figura C-01- 8 Prueba límite plástico

Fuente: Tomada por el autor

C. Granulometría (Hidrometría)

El análisis granulométrico es la determinación del rango de tamaños de partículas presentes en el suelo, expresado como un porcentaje del peso (o masa) seco total. Se usan generalmente dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de las partículas: (i) análisis por tamizado para tamaños mayores a 0.075mm de diámetro y (ii) análisis hidrométrico para menores a 0.075mm. Dado que las muestras utilizadas en esta investigación son materiales finos, se utilizó únicamente el análisis por hidrometría.

El análisis hidrométrico se basa en el principio de la sedimentación de granos de suelo en agua. Cuando un espécimen de suelo se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por simplicidad, se supone que todas las partículas analizadas son esferas y que la velocidad de ellas se puede expresar mediante la ley de Stokes (Ecuación C-01- 7), con lo cual, si se conoce la velocidad de las partículas, es posible determinar el diámetro de estas (Ecuación C-01- 8).

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18 * \eta} * D^2$$

Ecuación C-01- 7

$$D = \sqrt{\frac{18 * \eta * v}{\rho_s - \rho_w}} = \sqrt{\frac{30 * \eta}{G_s - 1} * \frac{L}{t}}$$

Ecuación C-01- 8

Donde:

v: Velocidad

ρ_s : Densidad de las partículas de suelo

ρ_w : Densidad del agua

η : Viscosidad del agua

D: Diámetro de las partículas de suelo

G_s : Gravedad específica de los sólidos

L: Longitud del hidrómetro desde la superficie hasta el centro de gravedad

t: Tiempo

En el laboratorio, la prueba del hidrómetro se conduce en una probeta donde se agregan 50g de material seco al horno junto con 125ml de agente dispersor y agua destilada hasta

completar 1000ml. Cuando el hidrómetro se coloca en la suspensión en un tiempo t , medido desde el inicio de la sedimentación, mide la densidad de sólidos en la vecindad de su bulbo a una profundidad L . La densidad de sólidos es una función de la cantidad de partículas de suelo presentes por volumen unitario de suspensión en esa profundidad. En un tiempo t , las partículas de suelo en suspensión a una profundidad L tendrán un diámetro menor que D , el valor de L cambia con el tiempo t . Las partículas más grandes se habrán asentado más allá de la zona de medición (Das, 2001).

Algunos de los pasos ejecutados en el ensayo de hidrometría se presentan en la Figura C-01- 9.



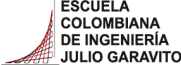

Figura C-01- 9 Ensayo de hidrometría

Fuente: Tomada por el autor

D. Referencias

- Araya, A. A. (2011). *Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements*. Delft University of Technology. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:1d964e6f-e7e5-4d2a-834b-db9b3504745f/datastream/OBJ/download>
- Das, B. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (Intenational Thomson Editores S.A., Ed.) (1st ed.). México D.F.
- Duque Escobar, G., & Escobar, C. E. (2016). Relaciones Gravimétricas Y Volumétricas Del Suelo. *Universidad Nacional de Colombia, Geomecánica. Capítulo 2*, 29–47. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/53252/11/relacionesgravimetricasyvolumetricasdelsuelo.pdf>
- Gutierrez, L. (2018). Notas de clase Escuela Colombiana de Inegniería - Límites de Atterberg.
- INVIAS. (2013). *Normas de Ensayo de materiales para carreteras*.

Anexo D. Formatos ensayos de campo y laboratorio

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
		Profundidad (m):	1.30 - 1.50



1. Determinación del contenido de humedad

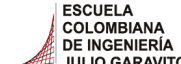

Masa del recipiente (g)	115.53
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	267.28
Masa recipiente + suelo seco (g)	219.94
Contenido de humedad (%)	45.3

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	256.9
Masa de la muestra parafinada (g)	262.4
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	107.9
Temperatura del agua (°)	17
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99878
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	148.77

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	256.9
Volumen de la muestra (cm ³)	148.77
Densidad de la muestra (gr/cm ³)	1.73
Peso unitario de la muestra (kN/m³)	16.94

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
		Profundidad (m):	1.30 - 1.50

4. Calibración del picnómetro

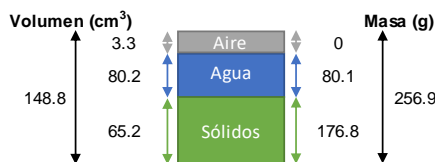
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	174.11	672.21	23.4	0.99745	499.37
2	174.12	672.32	21.4	0.99791	499.24
3	174.11	672.89	16.6	0.99885	499.35
4	174.11	672.84	16.4	0.99888	499.29
5	174.11	672.87	16.8	0.99881	499.35
Prom	174.11	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)	49.29
Temperatura de ensayo (°C)	19.8
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99825
Masa picnómetro vacío (g)	174.11
Volumen picnómetro (cm ³)	499.32
Masa picnómetro con agua (g)	672.56
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	703.68
Gravedad específica sin corregir	2.71
Factor de corrección	1.00004
Gravedad específica corregida	2.71

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	1.28
η (%)	56.15
S (%)	96.06

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
		Profundidad (m):	1.30 - 1.50

1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	9.6
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	26.78
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	26.4
Masa del agua (g)	0.38
Masa material seco (g)	16.8
Humedad higroscópica (%)	2.3
Factor corrección Ch	0.9779

3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	48.9
Gravedad específica del suelo - G _s	2.71
Gravedad específica del agua - G ₁	1.000
$Constante A = \left[\frac{100000}{W_{muestra} \cdot G_s} \cdot \frac{G_s}{G_s - g_1} \right]$	
A	3241

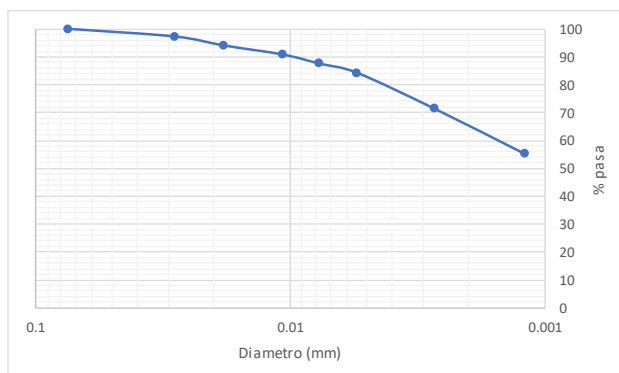
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	8:35
--	------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
8:37	2	1.034	17.2	0.0039	1.030	97.24	0.01388	8.4	0.0285
8:40	5	1.033	17.2	0.0039	1.029	94.00	0.01388	8.6	0.0182
8:50	15	1.032	17.2	0.0039	1.028	90.76	0.01388	8.9	0.0107
9:05	30	1.031	17.6	0.0039	1.027	87.51	0.01388	9.2	0.0077
9:35	60	1.030	17.6	0.0039	1.026	84.27	0.01388	9.4	0.0055
12:52	250	1.026	21.0	0.0035	1.022	71.31	0.01324	10.5	0.0027
8:35	1440	1.021	21.0	0.0035	1.017	55.10	0.01324	11.8	0.0012

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	48.9
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	0.0
% Retenido en tamiz No 200	0.0
% Pasa el tamiz No 200	100.0

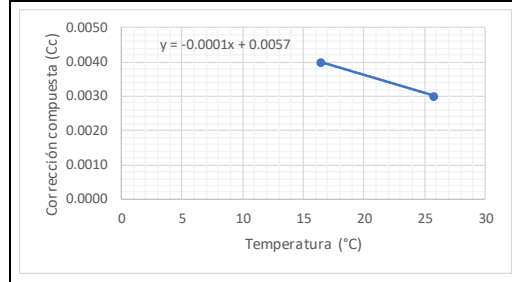
Tamiz (mm)	Tamiz (in)	W _{RETENIDO} (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.0	0.0	100.0	0.0
2.000	No 10	0.0	0.0	100.0	0.0
0.850	No 20	0.0	0.0	100.0	0.0
0.425	No 40	0.0	0.0	100.0	0.0
0.150	No 100	0.0	0.0	100.0	0.0
0.075	No 200	0.0	0.0	100.0	0.0



2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

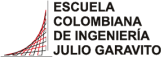

Hidrómetro utilizado	151H
----------------------	------

Rango de temperaturas (°C)	16.4	25.8
Lectura en solución de hexametáfosfato	1.0040	1.0030
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0030



Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	0
Fina	0.425 - 0.075	0
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	100

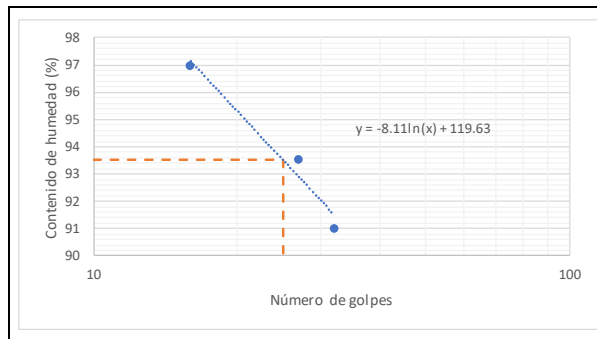
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	0
Finos	< 0.075	100

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
		Profundidad (m):	1.30 - 1.50

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	56V	56N	82
Masa del recipiente (g)	11.035	24.982	6.75
No. Golpes	16	27	32
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	19.326	33.492	14.164
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.244	29.379	10.631
Contenido de humedad (%)	97	94	91



LL (%)	94
--------	----

2. Determinación límite plástico

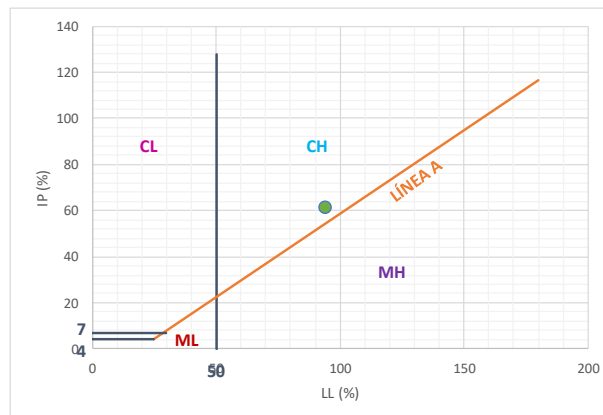
Ensayo	1	2
Número recipiente	C5	88
Masa del recipiente (g)	6.764	6.788
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	10.626	11.465
Masa recipiente + suelo seco (g)	9.705	10.334
Contenido de humedad (%)	31	32

LP (%)	32
--------	----



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	62
--------	----

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	CH
--------------------	----

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

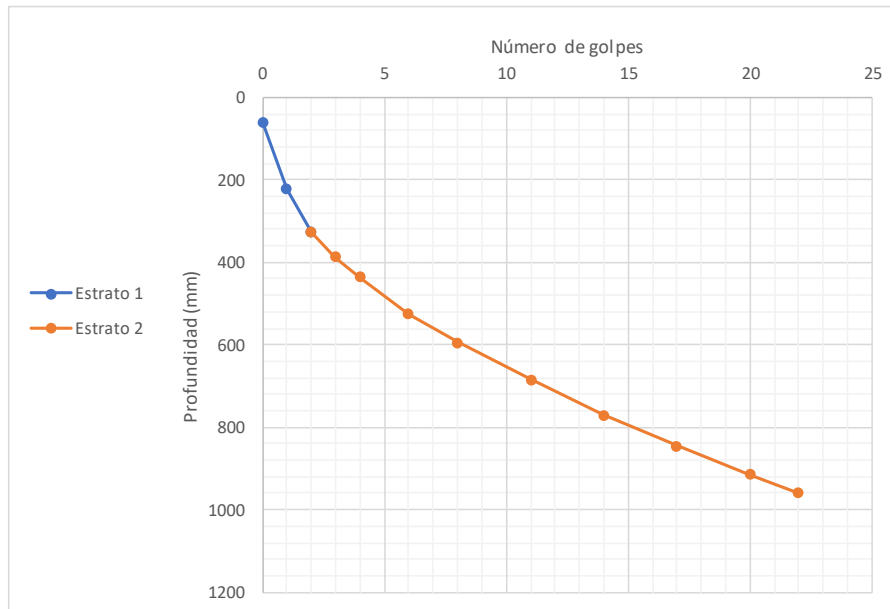
Procedencia:	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras
Fecha de exploración:	Junio 07 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

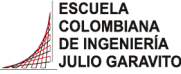

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	60	-	-	-	-
1	223	163	163	1	163
1	327	104	104	1	104
1	386	59	59	1	59
1	435	49	49	1	49
2	525	90	45	1	45
2	594	69	35	1	35
3	685	91	30	1	30
3	770	85	28	1	28
3	845	75	25	1	25
3	914	69	23	1	23
2	960	46	23	1	23

*El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestras

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	134	327
2	30	633



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	163
--	------------

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
		Profundidad (m):	1.30 - 1.50

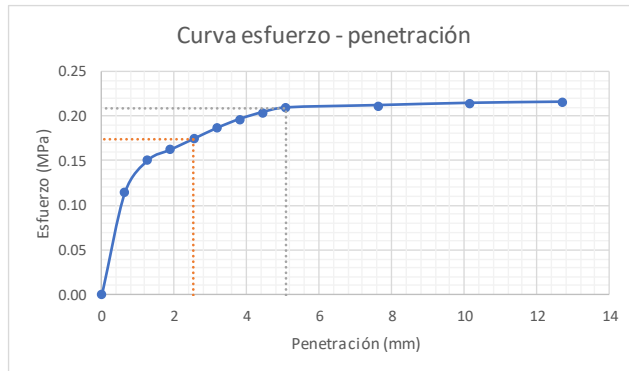
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

Humedad natural	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	114.56
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	419.81
Masa recipiente + muestra seca (g)	324.57
Contenido de humedad (%)	45.4


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	22.51	0.11
0.050	1.270	29.62	0.15
0.075	1.905	31.99	0.16
0.100	2.540	34.36	0.17
0.125	3.175	36.73	0.19
0.150	3.810	38.73	0.20
0.175	4.445	40.23	0.20
0.200	5.080	41.23	0.21
0.300	7.620	41.73	0.21
0.400	10.160	42.23	0.21
0.500	12.700	42.48	0.22


Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.17
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.21
CBR _{2,54} (%)	2.53
CBR _{5,08} (%)	2.02
CBR sin inmersión (%)	2.5



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 color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK-45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
		Profundidad (m):	1.30 - 1.50


Datos de la muestra antes del ensayo				
Dato	1	2	3	4
Altura (mm)	146.8	146.62	146.83	146.56
Diámetro (mm)	72.97	72.94	72.96	72.97
				Prom (mm)
				146.70
				72.96

Área (mm ²)	4180.80
Volumen (cm ³)	613.33
Masa húmeda muestra (g)	1067.29
Densidad húmeda aprox. (g/cm ³)	1.74


Ciclo	Norma	Ensayo																							
		Presión de cámara (kPa)	S _{cíclico}	Esfuerzo cíclico (kPa)	Carga máxima real (N)	P _{máx}	Carga cíclica real (N)	P _{cíclico}	Carga de contacto real (N)	P _{contacto}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{máx r}	Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico r}	Esfuerzo real (kPa)	S _{contacto r}	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	H ₂	Deformación resiliente promedio	H _{promedio}	Deformación resiliente unitaria	ε _r	Módulo resiliente (MPa)
0		41.4	24.8	24.8	110	102	102	8	26.31	24.40	24.40	1.91	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.00035	68.8	
1		41.4	12.4	12.4	49	46	46	3	11.72	11.00	11.00	0.72	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.00018	62.1	
2		41.4	24.8	24.8	103	95	95	8	24.64	22.72	22.72	1.91	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.00041	55.6	
3		41.4	37.3	37.3	181	167	167	14	43.29	39.94	39.94	3.35	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	0.00085	47.3	
4		41.4	49.7	49.7	230	208	208	22	55.01	49.75	49.75	5.26	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.00116	42.9	
5		41.4	62	62	258	231	231	27	61.71	55.25	55.25	6.46	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.00148	37.4	
6		27.6	12.4	12.4	65	62	62	3	15.55	14.83	14.83	0.72	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.00028	53.1	
7		27.6	24.8	24.8	116	108	108	8	27.75	25.83	25.83	1.91	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.00054	48.0	
8		27.6	37.3	37.3	188	174	174	14	44.97	41.62	41.62	3.35	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.00091	45.9	
9		27.6	49.7	49.7	229	210	210	19	54.77	50.23	50.23	4.54	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.00134	37.6	
10		27.6	62	62	260	233	233	27	62.19	55.73	55.73	6.46	0.218	0.218	0.218	0.218	0.218	0.218	0.218	0.218	0.218	0.218	0.00149	37.5	
11		13.8	12.4	12.4	55	52	52	3	13.16	12.44	12.44	0.72	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.00022	57.0	
12		13.8	24.8	24.8	108	98	98	10	25.83	23.44	23.44	2.39	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.00044	52.9	
13		13.8	37.3	37.3	168	154	154	14	40.18	36.84	36.84	3.35	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.00075	48.9	
14		13.8	49.7	49.7	218	199	199	19	52.14	47.60	47.60	4.54	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.00111	43.0	
15		13.8	62	62	285	259	259	26	68.17	61.95	61.95	6.22	0.231	0.231	0.231	0.231	0.231	0.231	0.231	0.231	0.231	0.231	0.00157	39.5	

Datos de humedad al inicio del ensayo	
# recipiente	17
Masa recipiente (g)	116.36
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1183.65
Masa recipiente + muestra seca (g)	850.11
Masa del agua (g)	333.54
Masa material seco (g)	733.75
Masa material húmedo (g)	1067.29
Humedad (%)	45.46

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	17
Masa recipiente (g)	116.36
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1180.37
Masa recipiente + muestra seca (g)	850.11
Masa del agua (g)	330.26
Masa material seco (g)	733.75
Masa material húmedo (g)	1064.01
Humedad (%)	45.01



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

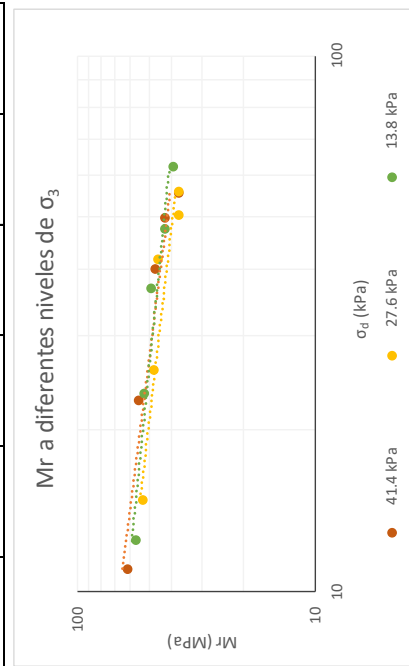
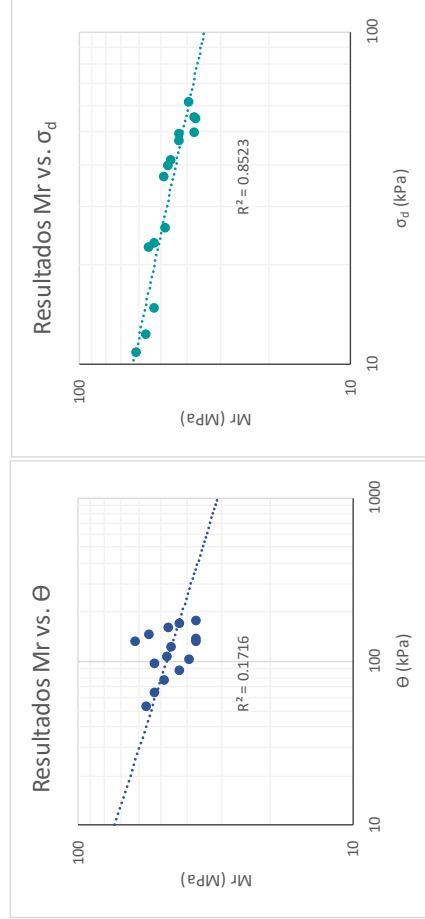
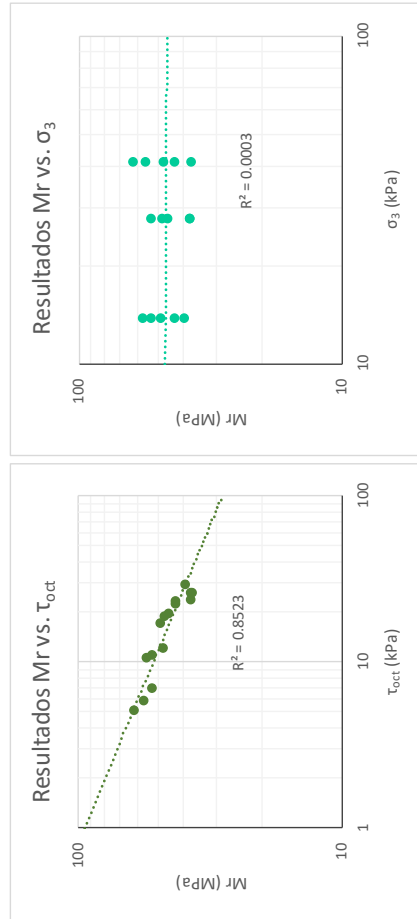


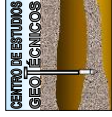
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019
Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
Profundidad (m):	1.30 - 1.50

Ecuaciones

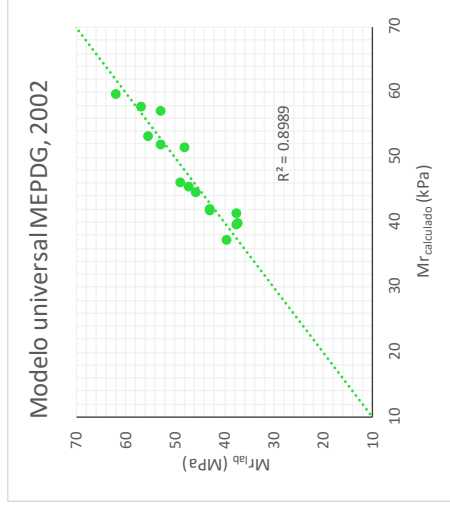
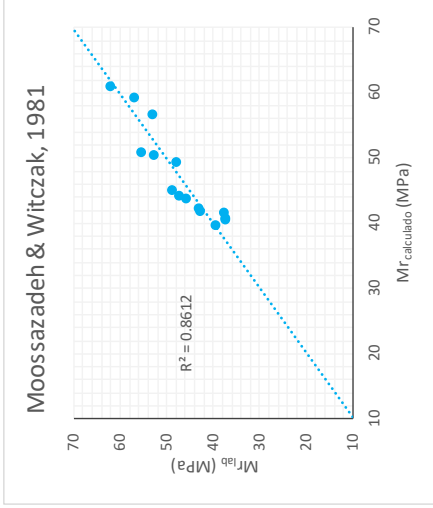
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \quad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.00	41.40	5.1867	135.203	62.1
2	22.72	41.40	10.7117	146.923	55.6
3	39.94	41.40	18.8300	164.144	47.3
4	49.75	41.40	23.4530	173.951	42.9
5	55.25	41.40	26.0463	179.453	37.4
6	14.83	27.60	6.9908	97.630	53.1
7	25.83	27.60	12.1775	108.632	48.0
8	41.62	27.60	19.6193	124.419	45.9
9	50.23	27.60	23.6785	133.030	37.6
10	55.73	27.60	26.2718	138.531	37.5
11	12.44	13.80	5.8632	53.838	57.0
12	23.44	13.80	11.0499	64.840	52.9
13	36.84	13.80	17.3642	78.235	48.9
14	47.60	13.80	22.4382	88.999	43.0
15	61.95	13.80	29.2034	103.350	39.5





Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raices		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECL, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
Profundidad (m):	1.30 - 1.50		



Ciclo	Moossazadeh & Witzcak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	Mr_lab (MPa)	Mr_cal (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (Mpa)	Mr_lab (MPa)	Mr_cal (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)
1	62.1	61.152	0.9	0.9	62.1	59.655	2.4	5.9
2	55.6	50.991	4.6	20.9	55.6	53.238	2.3	5.4
3	47.3	44.270	3.0	8.9	47.3	45.477	1.8	3.2
4	42.9	41.900	1.0	1.1	42.9	41.767	1.2	1.4
5	37.4	40.813	-3.5	12.0	37.4	39.873	-2.5	6.3
6	53.1	56.745	-3.7	13.6	53.1	57.007	-3.9	15.6
7	48.0	49.378	-1.4	2.0	48.0	51.344	-3.4	11.4
8	45.9	43.816	2.1	4.4	45.9	44.534	1.4	1.9
9	37.6	41.800	-4.2	17.7	37.6	41.355	-3.8	14.1
10	37.5	40.725	-3.2	10.4	37.5	39.491	-2.0	3.9
11	57.0	59.302	-2.3	5.2	57.0	57.642	-0.6	0.4
12	52.9	50.595	2.3	5.3	52.9	51.948	1.0	0.9
13	48.9	45.178	3.7	13.9	48.9	46.030	2.9	8.3
14	43.0	42.367	0.6	0.4	43.0	41.944	1.0	1.1
15	39.5	39.660	-0.1	0.0	39.5	37.255	2.3	5.1
			Σ	116.5			Σ	84.8

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$$

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

k₁	35.002	k₁	0.652
k₂	-0.251	k₂	0.022
P_a (kPa)	102	k₃	-2.300
		P_a (kPa)	102

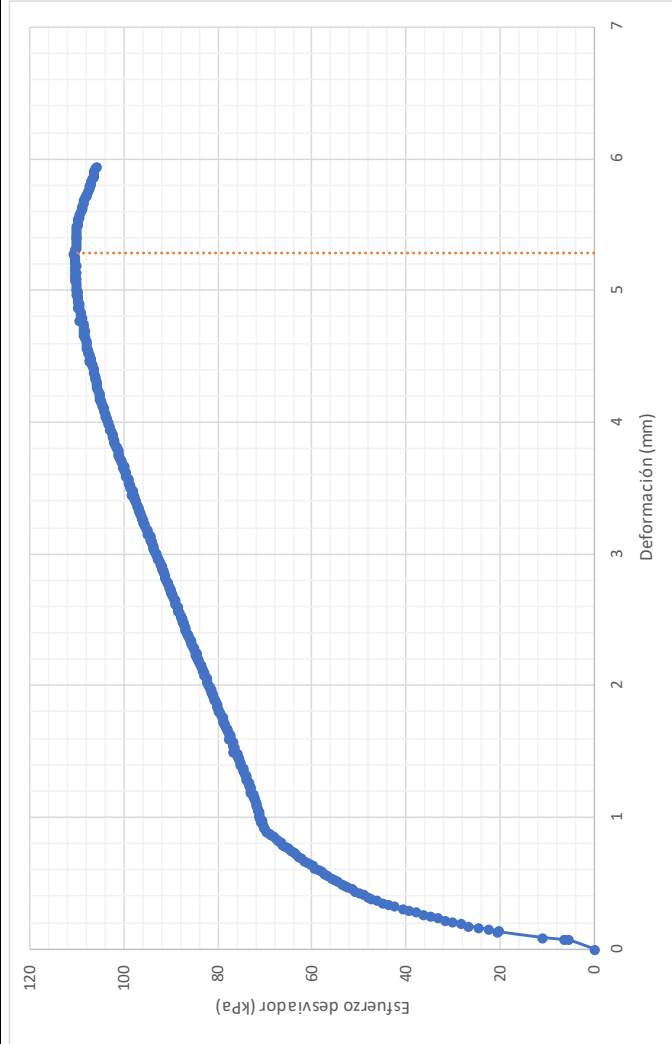


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

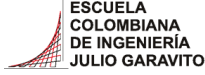



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
Profundidad (m):	1.30 - 1.50		

Prueba rápida de corte



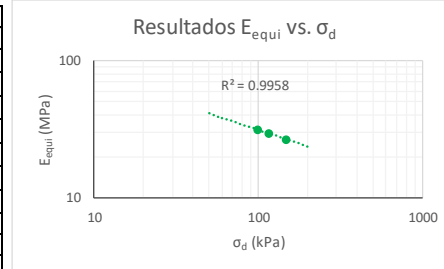
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.147
Máximo esfuerzo (kPa)	110.71
Máxima deformación (mm)	5.281
Máxima deformación (%)	3.6

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

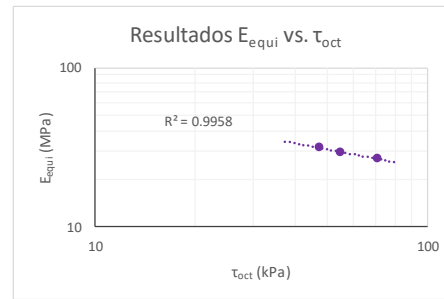
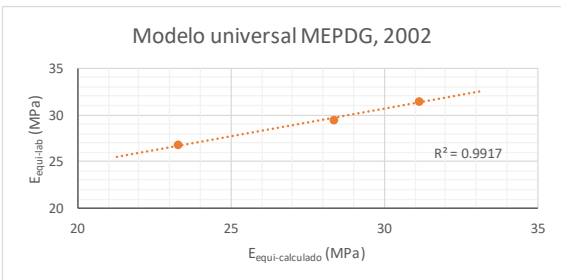
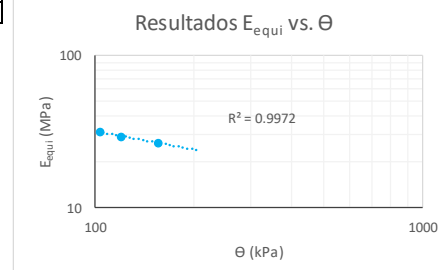
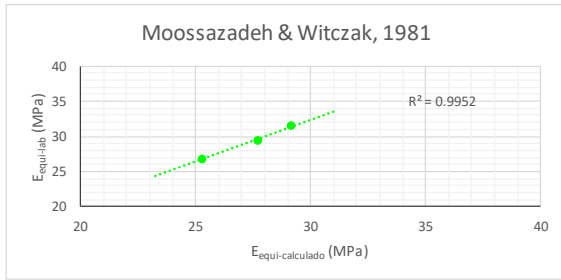
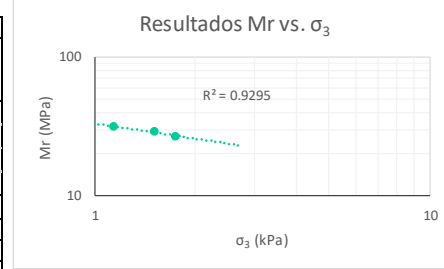
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
		Profundidad (m):	1.30 - 1.50

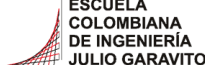

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	45
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo		1	2	3
Penetración objetivo (mm)		0.632	1.304	2.553
Carga máxima pistón (kg)	P_{max}	22.512	29.620	34.360
Carga cíclica pistón (kg)	P_{cíclico}	19.783	22.849	29.62
Carga de contacto pistón (kg)	P_{contacto}	2.729	6.771	4.740
Esfuerzo máximo pistón (kPa)	σ₁	0.114	0.150	0.174
Esfuerzo desviador pistón (MPa)	σ_d	0.100	0.116	0.150
Esfuerzo confinamiento (MPa)	σ₃	0.001	0.002	0.002
Cortante octaédrico (MPa)	τ_{oct}	0.047	0.055	0.071
Invariante de esfuerzos (MPa)	θ	0.104	0.120	0.155
Deformación elástica (mm)	u	0.072	0.089	0.127
Módulo equivalente (MPa)	E_{equi}	31.4	29.4	26.7

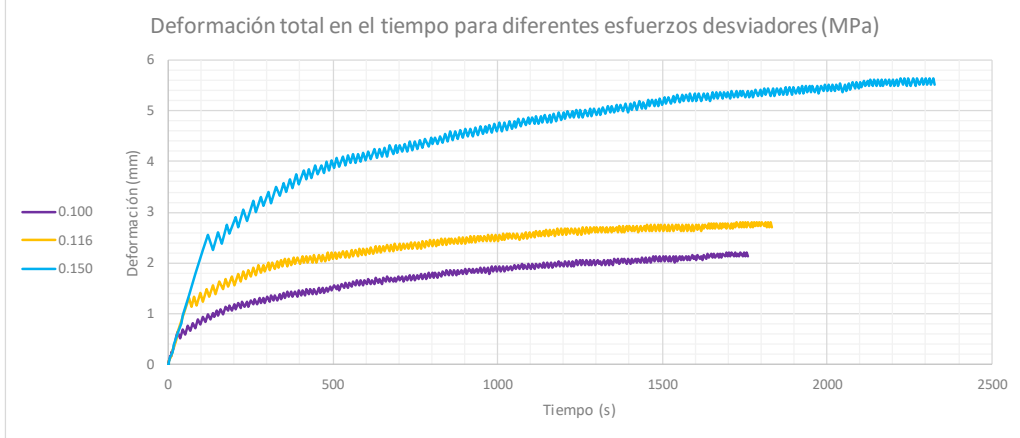


Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
	k₁	28.963		k₁	0.732
	k₂	-0.355		k₂	0.112
	P_a (MPa)	0.102		k₃	-2.300
				P_a (MPa)	0.102
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
31.4	29.14	5.3	31.4	31.14	0.1
29.4	27.69	3.0	29.4	28.36	1.1
26.7	25.25	2.2	26.7	23.27	12.1
	Σ	10.5		Σ	13.3

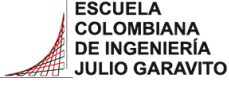



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras				
Fecha exploración:	Junio 07 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019	Profundidad (m):	1.30 - 1.50

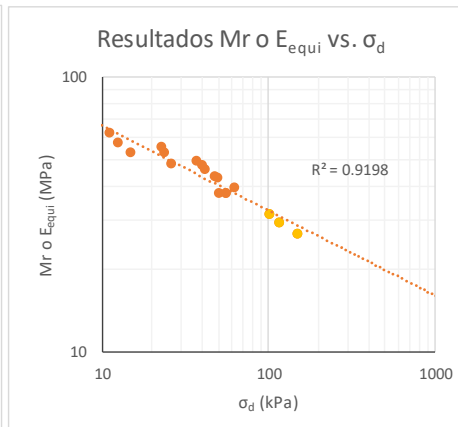
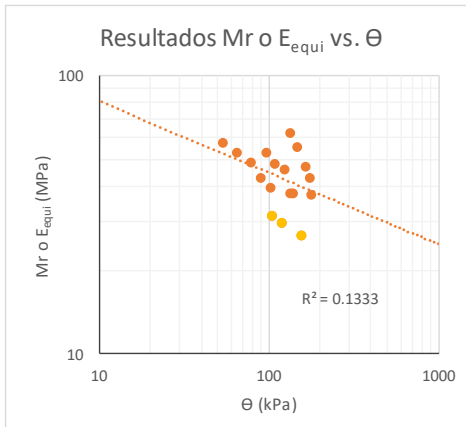
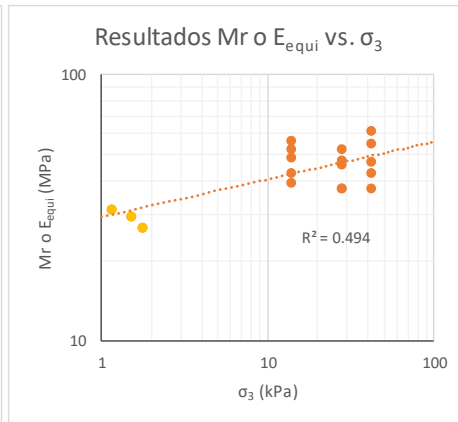
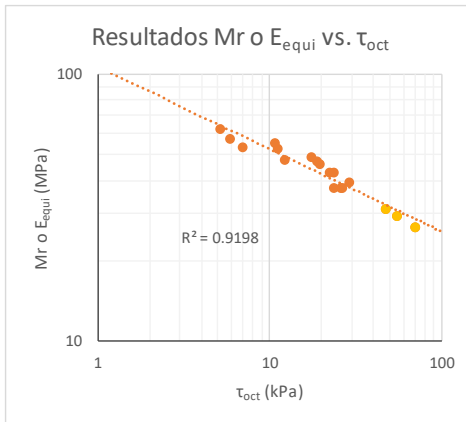


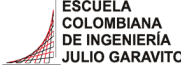

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	
---	--	---

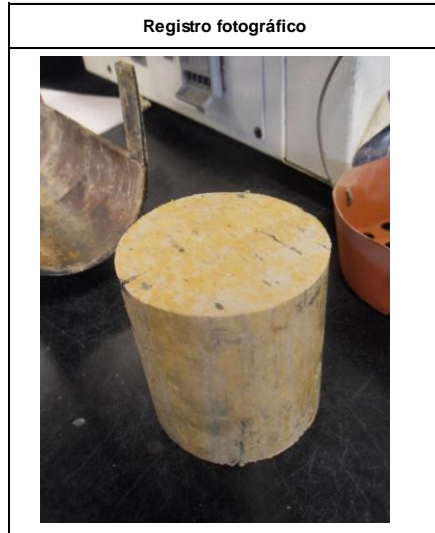
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras
Fecha exploración	Junio 07 de 2019
Fecha ensayos:	Junio 08 a 14 de 2019
Profundidad (m):	1.30 - 1.50

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	11.72	11.00	41.40	5.19	135.20	0.00018	62.08
	2	24.64	22.72	41.40	10.71	146.92	0.00041	55.56
	3	43.29	39.94	41.40	18.83	164.14	0.00085	47.26
	4	55.01	49.75	41.40	23.45	173.95	0.00116	42.93
	5	61.71	55.25	41.40	26.05	179.45	0.00148	37.35
	6	15.55	14.83	27.60	6.99	97.63	0.00028	53.06
	7	27.75	25.83	27.60	12.18	108.63	0.00054	47.97
	8	44.97	41.62	27.60	19.62	124.42	0.00091	45.91
	9	54.77	50.23	27.60	23.68	133.03	0.00134	37.60
	10	62.19	55.73	27.60	26.27	138.53	0.00149	37.50
	11	13.16	12.44	13.80	5.86	53.84	0.00022	57.02
	12	25.83	23.44	13.80	11.05	64.84	0.00044	52.90
	13	40.18	36.84	13.80	17.36	78.24	0.00075	48.90
	14	52.14	47.60	13.80	22.44	89.00	0.00111	42.97
	15	68.17	61.95	13.80	29.20	103.35	0.00157	39.51
cCBR	16	114.11	100.28	1.14	47.27	103.70	-	31.45
	17	150.14	115.82	1.50	54.60	120.32	-	29.41
	18	174.17	150.14	1.74	70.78	155.37	-	26.75



	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 color amarillo y gris con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40



1. Determinación del conteido de humedad

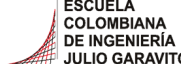

Masa del recipiente (g)	106.59
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	450.62
Masa recipiente + suelo seco (g)	341.56
Contenido de humedad (%)	46.4

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	563
Masa de la muestra parafinada (g)	572.1
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	237.3
Temperatura del agua (°)	16.2
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99891
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	325.38

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	563
Volumen de la muestra (cm ³)	325.38
Densidad de la muestra (gr/cm ³)	1.73
Peso unitario de la muestra (kN/m³)	16.97

	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 color amarillo y gris con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

4. Calibración del picnómetro

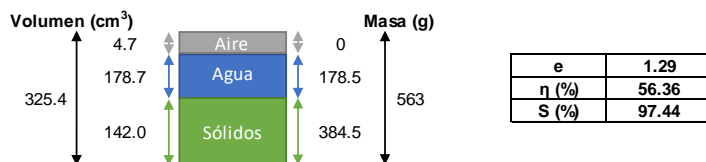
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	174.11	672.21	23.4	0.99745	499.37
2	174.12	672.32	21.4	0.99791	499.24
3	174.11	672.89	16.6	0.99885	499.35
4	174.11	672.84	16.4	0.99888	499.29
5	174.11	672.87	16.8	0.99881	499.35
Prom	174.11	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)	49.29
Temperatura de ensayo (°C)	21.8
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99782
Masa picnómetro vacío (g)	174.11
Volumen picnómetro (cm ³)	499.32
Masa picnómetro con agua (g)	672.35
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	703.46
Gravedad específica sin corregir	2.71
Factor de corrección	0.99961
Gravedad específica corregida	2.71

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo y gris con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

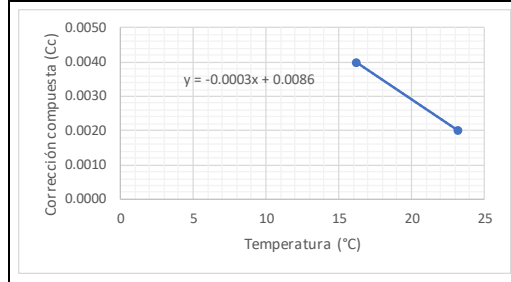
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	9.5
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	24.5
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	24.2
Masa del agua (g)	0.3
Masa material seco (g)	14.7
Humedad higroscópica (%)	2.0
Factor corrección Ch	0.9800

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H
----------------------	------

Rango de temperaturas (°C)	16.2	23.2
Lectura en solución de hexametáfosfato	1.0040	1.0020
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0020



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.4
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	49.4
Gravedad específica del suelo - G _s	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	3209

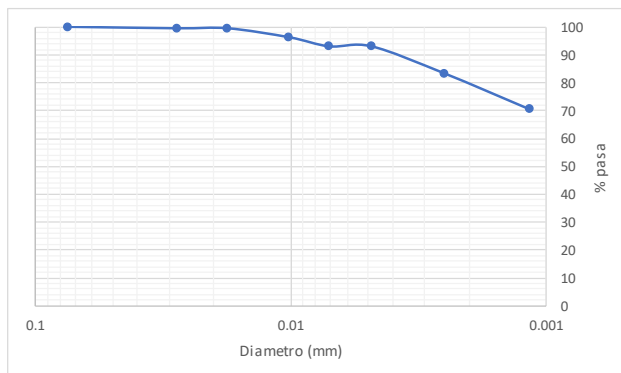
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	8:42
--	------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
8:44	2	1.035	17.1	0.0037	1.031	99.47	0.01390	8.1	0.0280
8:47	5	1.035	17.1	0.0037	1.031	99.47	0.01390	8.1	0.0177
8:57	15	1.033	19.6	0.0030	1.030	96.26	0.01356	8.4	0.0101
9:12	30	1.032	21.0	0.0026	1.029	93.05	0.01324	8.6	0.0071
9:42	60	1.031	24.0	0.0018	1.029	93.05	0.01278	8.6	0.0048
12:59	250	1.028	23.1	0.0020	1.026	83.42	0.01292	9.4	0.0025
8:42	1440	1.025	19.4	0.0031	1.022	70.59	0.01356	10.5	0.0012

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

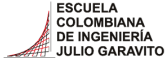

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	49.4
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	0.0
% Retenido en tamiz No 200	0.0
% Pasa el tamiz No 200	100.0

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	W _{RETENIDO} (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.0	0.0	100.0	0.0
2.000	No 10	0.0	0.0	100.0	0.0
0.850	No 20	0.0	0.0	100.0	0.0
0.425	No 40	0.0	0.0	100.0	0.0
0.150	No 100	0.0	0.0	100.0	0.0
0.075	No 200	0.0	0.0	100.0	0.0



Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	0
Fina	0.425 - 0.075	0
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	100

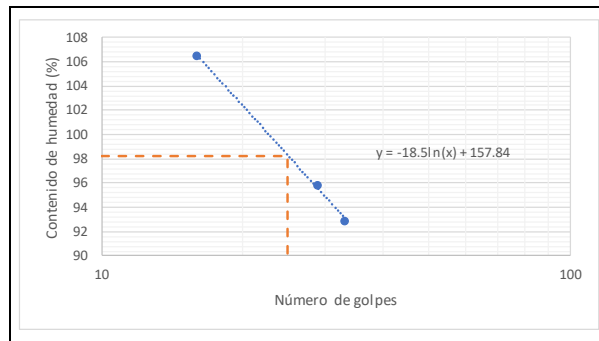
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	0
Finos	< 0.075	100

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo y gris con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	69	63	67
Masa del recipiente (g)	10.973	10.753	11.27
No. Golpes	16	29	33
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	20.424	18.854	20.196
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.55	14.89	15.897
Contenido de humedad (%)	106	96	93



2. Determinación límite plástico

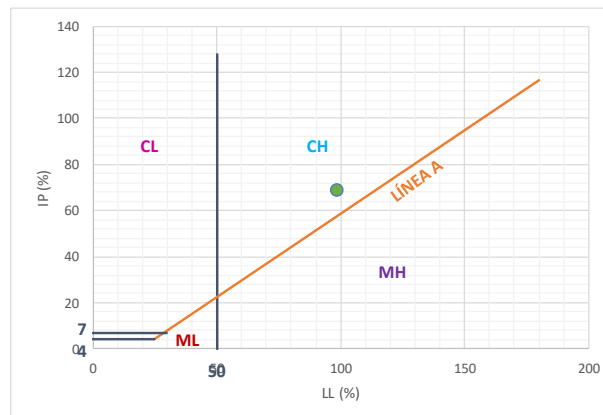
Ensayo	1	2
Número recipiente	74	57
Masa del recipiente (g)	11.182	11.039
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	15.6	15.466
Masa recipiente + suelo seco (g)	14.611	14.459
Contenido de humedad (%)	29	29



LP (%)	29
---------------	-----------

3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	69
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13	
---	--	---

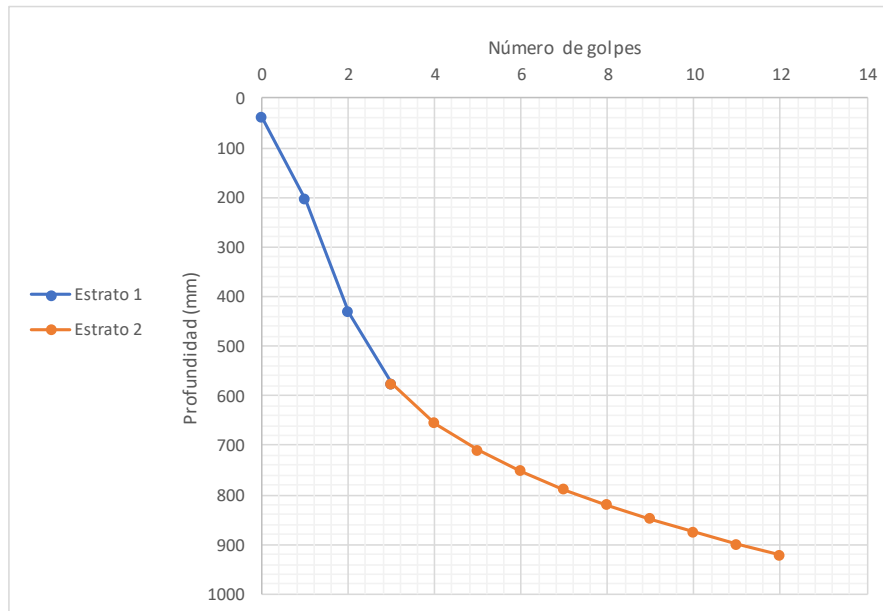
Procedencia:	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

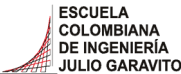

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	40	-	-	-	-
1	205	165	165	1	165
1	432	227	227	1	227
1	577	145	145	1	145
1	656	79	79	1	79
1	710	54	54	1	54
1	752	42	42	1	42
1	790	38	38	1	38
1	821	31	31	1	31
1	849	28	28	1	28
1	875	26	26	1	26
1	900	25	25	1	25
1	922	22	22	1	22

*El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestras

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	184	577
2	32	345



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	184
--	------------

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo y gris con presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras				
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019	Profundidad (m):	1.20 - 1.40

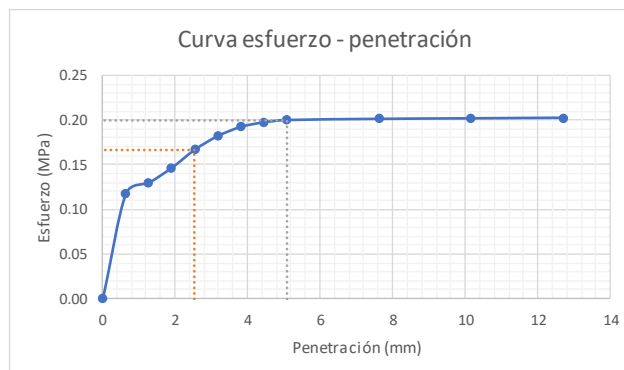
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

Humedad natural	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	110.3
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	539.84
Masa recipiente + muestra seca (g)	403.95
Contenido de humedad (%)	46.3


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)	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	23.17	0.12
0.050	1.270	25.61	0.13
0.075	1.905	28.93	0.15
0.100	2.540	32.93	0.17
0.125	3.175	35.93	0.18
0.150	3.810	37.93	0.19
0.175	4.445	38.93	0.20
0.200	5.080	39.43	0.20
0.300	7.620	39.68	0.20
0.400	10.160	39.80	0.20
0.500	12.700	39.93	0.20


Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.17
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.20
CBR _{2,54} (%)	2.42
CBR _{5,08} (%)	1.93
CBR sin inmersión (%)	2.4



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 color amarillo y gris con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

Area (mm²)	4193.99
Volumen (cm³)	608.03
Masa húmeda muestra (g)	1063.49
Densidad húmeda aprox. (g/cm³)	1.75

Datos de la muestra antes del ensayo				
Dato	1	2	3	4
Altura (mm)	145.17	144.79	145.11	144.84
Diámetro (mm)	72.82	73.11	73.16	73.21
				Prom (mm)
				73.08

Ciclo	Norma	Ensayo										Módulo resiliente (MPa)	
		Presión de cámara (kPa) S ₃	Carga máxima real (N) P _{max}	Carga cíclica real (N) P _{cíclico}	Carga de contacto real (N) P _{contacto}	Esfuerzo máximo real (kPa) S _{max.r}	Esfuerzo cíclico real (kPa) S _{cíclico.r}	Esfuerzo de contacto real (kPa) S _{contacto.r}	Deformación resiliente LVDT1 (mm) H ₁	Deformación resiliente prom (mm) H ₂	Deformación resiliente H _{promedio}		Deformación resiliente unitaria ε _r
0		41.4	102	93	9	24.32	22.17	2.15	0.046	0.046	0.046	0.00032	69.9
1		41.4	52	48	4	12.40	11.44	0.95	0.019	0.019	0.019	0.00013	87.3
2		41.4	110	100	10	26.23	23.84	2.38	0.052	0.051	0.052	0.00036	67.1
3		41.4	172	157	15	41.01	37.43	3.58	0.103	0.104	0.104	0.00071	52.4
4		41.4	225	203	22	53.65	48.40	5.25	0.169	0.168	0.169	0.00116	41.6
5		41.4	276	249	27	65.81	59.37	6.44	0.2	0.196	0.198	0.00137	43.5
6		27.6	52	47	5	12.40	11.21	1.19	0.019	0.018	0.019	0.00013	87.8
7		27.6	107	96	11	25.51	22.89	2.62	0.052	0.052	0.052	0.00036	63.8
8		27.6	184	170	14	43.87	40.53	3.34	0.114	0.115	0.115	0.00079	51.3
9		27.6	239	219	20	56.99	52.22	4.77	0.181	0.181	0.181	0.00125	41.8
10		27.6	273	247	26	65.09	58.89	6.20	0.215	0.213	0.214	0.00148	39.9
11		13.8	52	48	4	12.40	11.44	0.95	0.023	0.023	0.023	0.00016	72.1
12		13.8	116	106	10	27.66	25.27	2.38	0.065	0.065	0.065	0.00045	56.4
13		13.8	182	166	16	43.40	39.58	3.81	0.121	0.122	0.122	0.00084	47.2
14		13.8	216	194	22	51.50	46.26	5.25	0.182	0.182	0.182	0.00126	36.8
15		13.8	274	247	27	65.33	58.89	6.44	0.221	0.221	0.221	0.00152	38.7

Datos de humedad al inicio del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	110.32
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1173.81
Masa recipiente + muestra seca (g)	839.98
Masa del agua (g)	333.83
Masa material seco (g)	729.66
Masa material húmedo (g)	1063.49
Humedad (%)	45.75

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	110.32
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1173.34
Masa recipiente + muestra seca (g)	839.98
Masa del agua (g)	333.36
Masa material seco (g)	729.66
Masa material húmedo (g)	1063.02
Humedad (%)	45.69



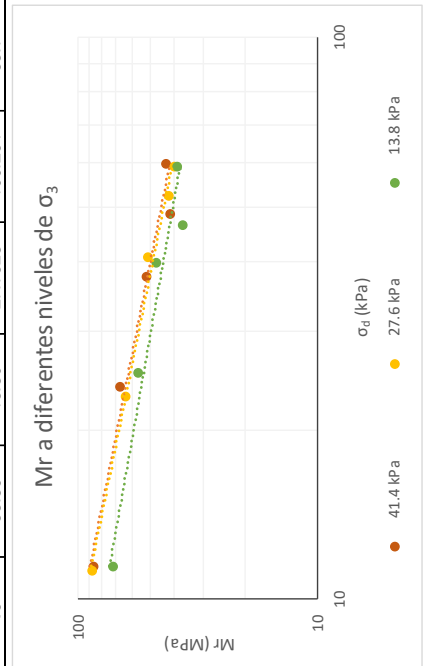
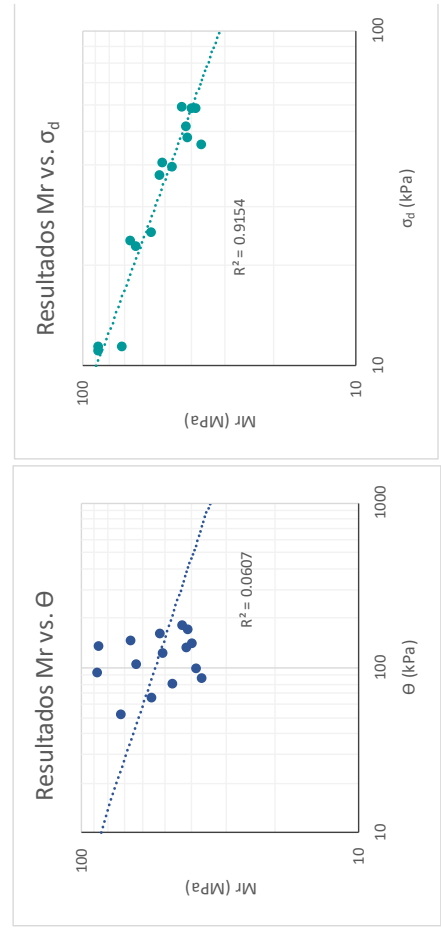
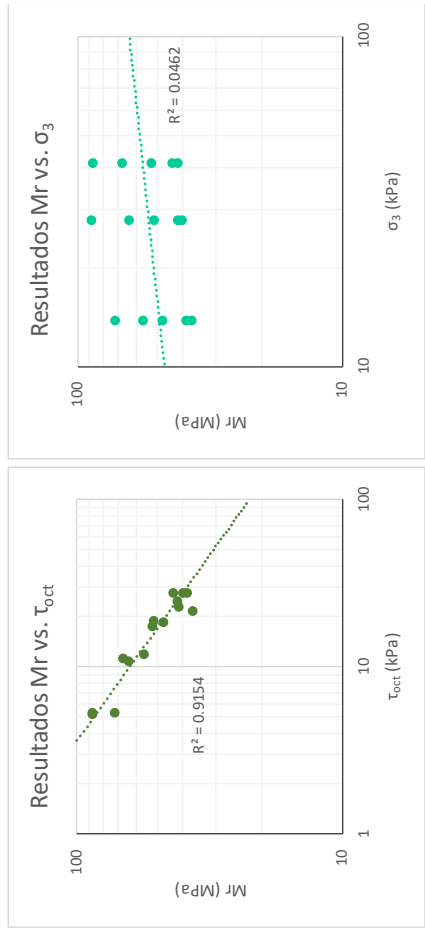
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo y gris con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK 45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019
Profundidad (m):	1.20 - 1.40		

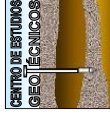
$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d$ $\theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$

Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.44	41.40	5.3952	135.645	87.3
2	23.84	41.40	11.2400	148.044	67.1
3	37.43	41.40	17.6468	161.635	52.4
4	48.40	41.40	22.8172	172.603	41.6
5	59.37	41.40	27.9876	183.571	43.5
6	11.21	27.60	5.2828	94.007	87.8
7	22.89	27.60	10.7904	105.690	63.8
8	40.53	27.60	19.1080	123.334	51.3
9	52.22	27.60	24.6156	135.018	41.8
10	58.89	27.60	27.7628	141.694	39.9
11	11.44	13.80	5.3952	52.845	72.1
12	25.27	13.80	11.9144	66.674	56.4
13	39.58	13.80	18.6584	80.980	47.2
14	46.26	13.80	21.8056	87.657	36.8
15	58.89	13.80	27.7628	100.294	38.7

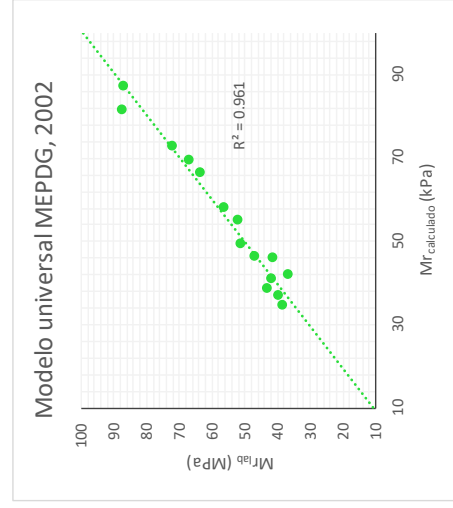
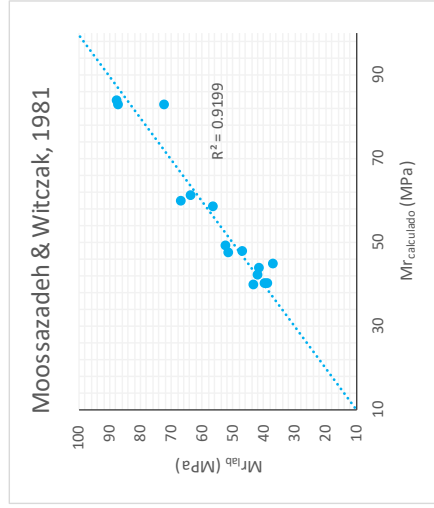




ESCUOLA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo y gris con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK-45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40



Ciclo	Moossazadeh & Witzczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	Mr _{lab} (MPa)	Mr _{cal} (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (Mpa)	Mr _{lab} (MPa)	Mr _{cal} (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)
1	87.3	83.206	4.1	17.0	87.3	87.225	0.1	0.0
2	67.1	60.204	6.9	47.9	67.1	69.626	-2.5	6.3
3	52.4	49.346	3.1	9.5	52.4	55.066	-2.6	6.9
4	41.6	44.061	-2.4	5.8	41.6	45.963	-4.3	18.6
5	43.5	40.267	3.2	10.3	43.5	38.638	4.8	23.4
6	87.8	83.982	3.8	14.7	87.8	81.776	6.0	36.5
7	63.8	61.297	2.5	6.4	63.8	66.528	-2.7	7.3
8	51.3	47.646	3.7	13.5	51.3	49.503	1.8	3.3
9	41.8	42.612	-0.8	0.6	41.8	41.106	0.7	0.5
10	39.9	40.410	-0.5	0.3	39.9	37.084	2.8	7.9
11	72.1	83.206	-11.1	122.4	72.1	72.993	-0.9	0.7
12	56.4	58.677	-2.3	5.3	56.4	58.283	-1.9	3.7
13	47.2	48.148	-0.9	0.8	47.2	46.503	0.7	0.5
14	36.8	44.951	-8.1	65.7	36.8	41.970	-5.1	26.2
15	38.7	40.410	-1.7	2.8	38.7	34.740	4.0	15.9
			Σ	323.1			Σ	157.8

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_3} * \left(\frac{r_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

k ₁	31.720	k ₁	1.025
k ₂	-0.441	k ₂	0.189
P _a (kPa)	102	k ₃	-4.564
		P _a (kPa)	102

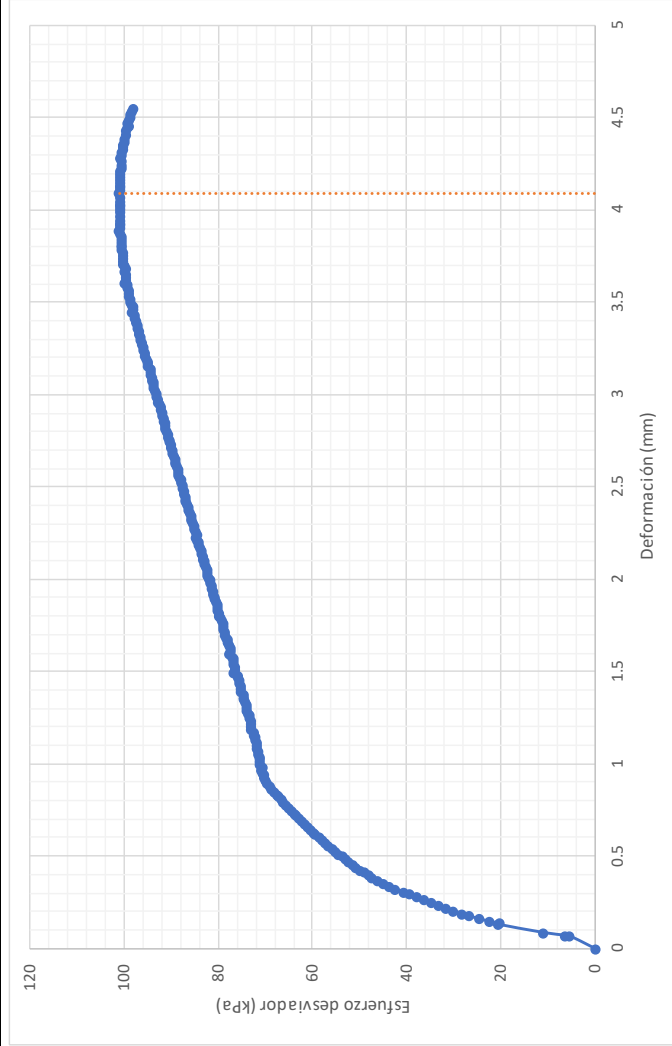


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

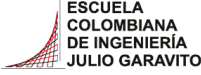



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo y gris con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019
Profundidad (m):	1.20 - 1.40		

Prueba rápida de corte



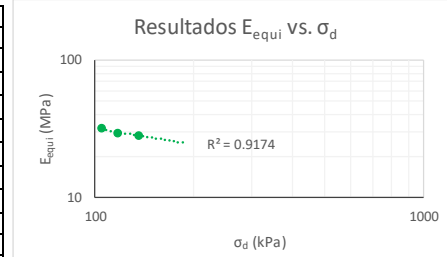
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.145
Máximo esfuerzo (kPa)	101.27
Máxima deformación (mm)	4.093
Máxima deformación (%)	2.823

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)	
---	--	---

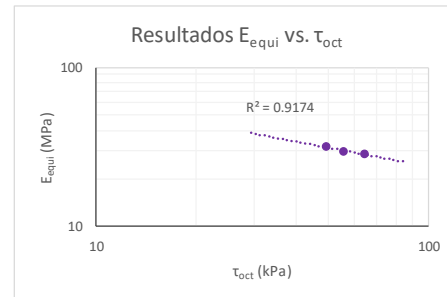
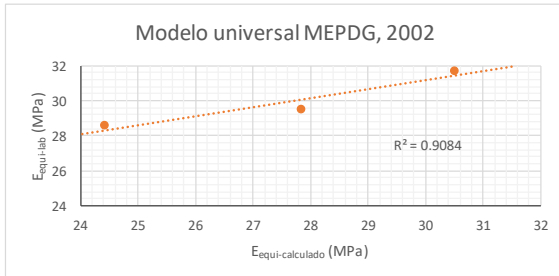
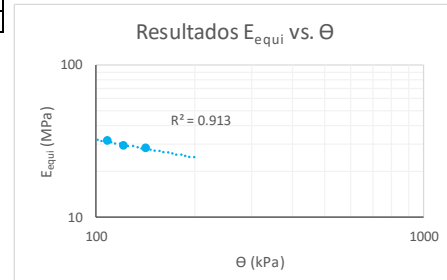
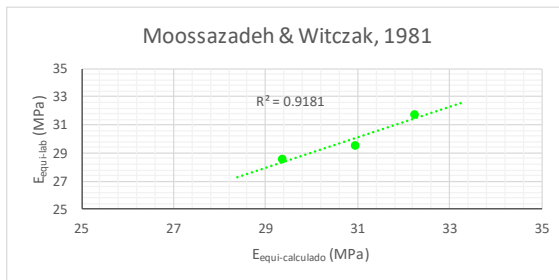
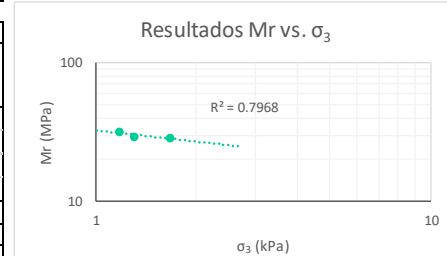
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo y gris con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), E.CI. pozo aguas negras		
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

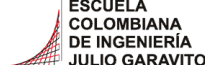

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	46
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo		1	2	3
Penetración objetivo (mm)		0.668	1.324	2.682
Carga máxima pistón (kg)	P_{max}	23.170	25.609	32.926
Carga cíclica pistón (kg)	P_{cíclico}	20.633	23.17	26.829
Carga de contacto pistón (kg)	P_{contacto}	2.537	2.439	6.097
Esfuerzo máximo pistón (kPa)	σ₁	0.117	0.130	0.167
Esfuerzo desviador pistón (MPa)	σ_d	0.105	0.117	0.136
Esfuerzo confinamiento (MPa)	σ₃	0.001	0.001	0.002
Cortante octaédrico (MPa)	τ_{oct}	0.049	0.055	0.064
Invariante de esfuerzos (MPa)	θ	0.108	0.121	0.141
Deformación elástica (mm)	u	0.075	0.090	0.108
Módulo equivalente (MPa)	E_{equi}	31.7	29.5	28.6

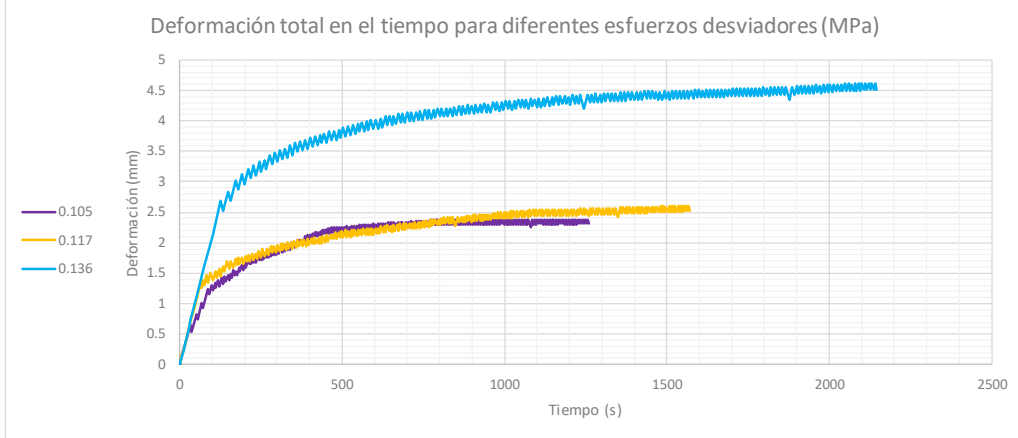


Moosazadeh & Witzcak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
	k₁	32.544		k₁	1.435
	k₂	-0.356		k₂	0.589
	P_a (MPa)	0.102		k₃	-4.064
				P_a (MPa)	0.102
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
31.7	32.26	0.3	31.7	30.51	1.5
29.5	30.95	2.1	29.5	27.83	2.7
28.6	29.38	0.7	28.6	24.41	17.2
	Σ	3.1		Σ	21.5

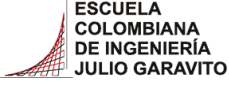



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo y gris con presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, pozo aguas negras				
Fecha exploración:	Junio 21 de 2019	Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019	Profundidad (m):	1.20 - 1.40

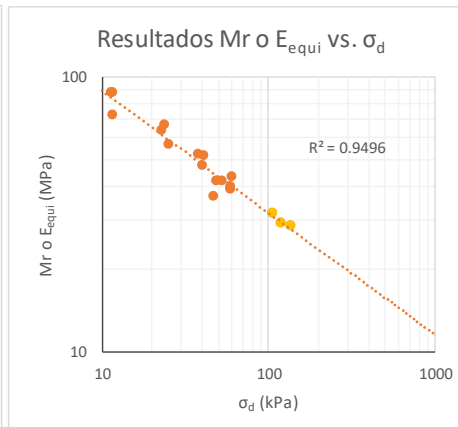
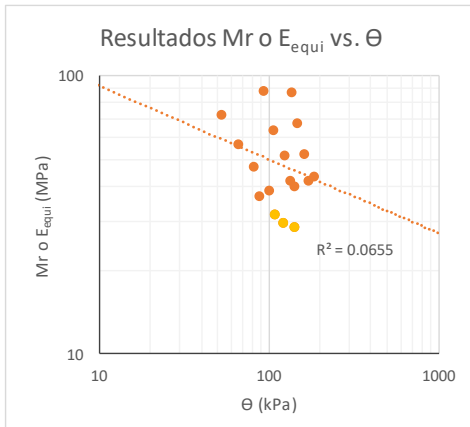
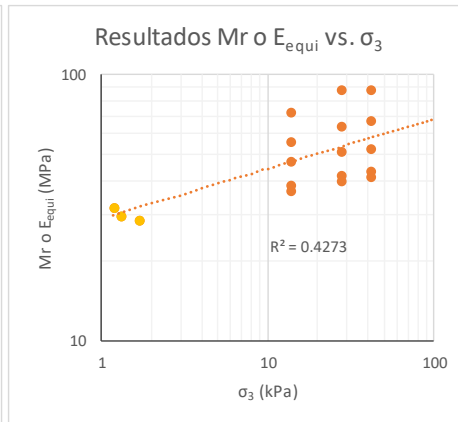
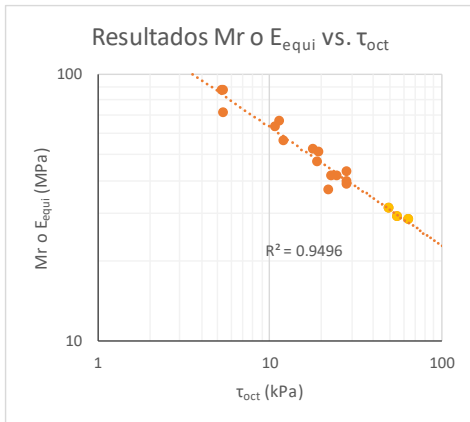


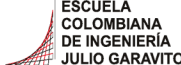

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo y gris con presencia de raíces
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECL, pozo aguas negras
Fecha exploración	Junio 21 de 2019
Fecha ensayos:	Junio 22 a 28 de 2019
Profundidad (m):	1.20 - 1.40

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	12.40	11.44	41.40	5.40	135.64	0.00013	87.33
	2	26.23	23.84	41.40	11.24	148.04	0.00036	67.12
	3	41.01	37.43	41.40	17.65	161.63	0.00071	52.44
	4	53.65	48.40	41.40	22.82	172.60	0.00116	41.65
	5	65.81	59.37	41.40	27.99	183.57	0.00137	43.47
	6	12.40	11.21	27.60	5.28	94.01	0.00013	87.82
	7	25.51	22.89	27.60	10.79	105.69	0.00036	63.82
	8	43.87	40.53	27.60	19.11	123.33	0.00079	51.32
	9	56.99	52.22	27.60	24.62	135.02	0.00125	41.83
	10	65.09	58.89	27.60	27.76	141.69	0.00148	39.90
	11	12.40	11.44	13.80	5.40	52.84	0.00016	72.14
	12	27.66	25.27	13.80	11.91	66.67	0.00045	56.37
	13	43.40	39.58	13.80	18.66	80.98	0.00084	47.23
	14	51.50	46.26	13.80	21.81	87.66	0.00126	36.85
	15	65.33	58.89	13.80	27.76	100.29	0.00152	38.72
cCBR	16	117.45	104.59	1.17	49.30	108.11	-	31.73
	17	129.81	117.45	1.30	55.37	121.34	-	29.49
	18	166.90	135.99	1.67	64.11	141.00	-	28.56



	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L		
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
		Profundidad (m):	1.60 - 1.80



1. Determinación del contenido de humedad

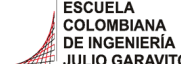

Masa del recipiente (g)	109.32
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	1543.07
Masa recipiente + suelo seco (g)	1006.13
Contenido de humedad (%)	59.9

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	67.1
Masa de la muestra parafinada (g)	69.7
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	24.3
Temperatura del agua (°)	15.8
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99898
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	42.65

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	67.1
Volumen de la muestra (cm ³)	42.65
Densidad de la muestra (gr/cm ³)	1.57
Peso unitario de la muestra (kN/m³)	15.43

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L		
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
		Profundidad (m):	1.60 - 1.80

4. Calibración del picnómetro

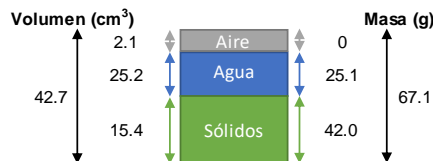
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	143.00	641.30	23.4	0.99745	499.57
2	143.00	641.42	21.4	0.99791	499.46
3	143.00	642.01	16.6	0.99885	499.58
4	143.00	642.01	16.4	0.99888	499.57
5	143.00	641.99	16.8	0.99881	499.58
Prom	143.00	641.75			499.56
Desv.	0.00	0.36			0.05

*Calibración realizada en agosto de 2018



5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.1
Temperatura de ensayo (°C)	18
Densidad del agua (g/cm ³)	0.9986
Masa picnómetro vacío (g)	143.00
Volumen picnómetro (cm ³)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	641.86
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	672.9
Gravedad específica sin corregir	2.72
Factor de corrección	1.00039
Gravedad específica corregida	2.72

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	1.76
η (%)	63.79
S (%)	92.46

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L		
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
		Profundidad (m):	1.60 - 1.80

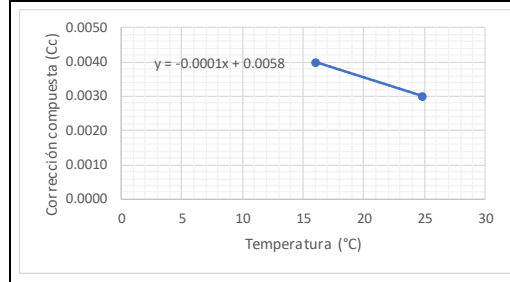
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	17.7
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	32.8
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	32.6
Masa del agua (g)	0.2
Masa material seco (g)	14.9
Humedad higroscópica (%)	1.3
Factor corrección Ch	0.9868

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H
----------------------	------

Rango de temperaturas (°C)	16	24.8
Lectura en solución de hexametáfosfato	1.0040	1.0030
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0030



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	51.8
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	51.1
Gravedad específica del suelo - G _s	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	3094

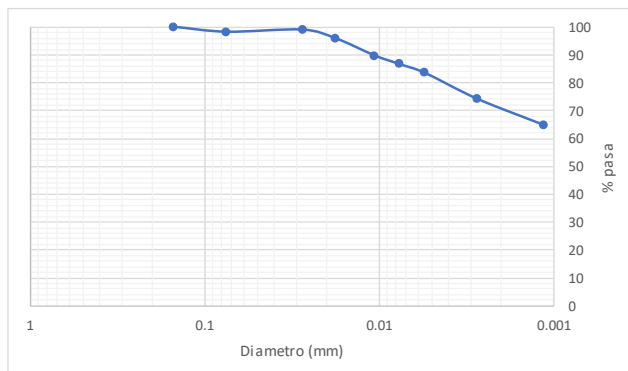
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	8:20
--	------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
8:22	2	1.036	16.4	0.0040	1.032	99.00	0.01399	7.8	0.0276
8:25	5	1.035	16.4	0.0040	1.031	95.91	0.01399	8.1	0.0178
8:35	15	1.033	16.4	0.0040	1.029	89.72	0.01399	8.6	0.0106
8:50	30	1.032	16.8	0.0039	1.028	86.63	0.01399	8.9	0.0076
9:20	60	1.031	16.8	0.0039	1.027	83.53	0.01399	9.2	0.0055
12:37	250	1.028	18.0	0.0038	1.024	74.25	0.01370	10.0	0.0027
8:20	1440	1.024	20.4	0.0035	1.021	64.97	0.01330	10.7	0.0011

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)



Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	51.1
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	0.9
% Retenido en tamiz No 200	1.8
% Pasa el tamiz No 200	98.2

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	W _{RETENIDO} (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.0	0.0	100.0	0.0
2.000	No 10	0.0	0.0	100.0	0.0
0.850	No 20	0.0	0.0	100.0	0.0
0.425	No 40	0.0	0.0	100.0	0.0
0.150	No 100	0.0	0.0	100.0	0.0
0.075	No 200	0.9	1.8	98.2	1.8



Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	0
Fina	0.425 - 0.075	2
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	98

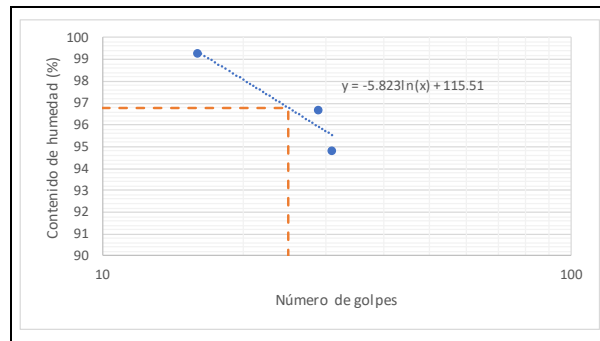
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	2
Finos	< 0.075	98

	<p>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</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK, 45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L		
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
		Profundidad (m):	1.60 - 1.80

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	73	64	52
Masa del recipiente (g)	10.803	10.963	10.895
No. Golpes	16	29	31
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	20.313	20.732	24.125
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.575	15.93	17.686
Contenido de humedad (%)	99	97	95



LL (%)	97
---------------	-----------

2. Determinación límite plástico

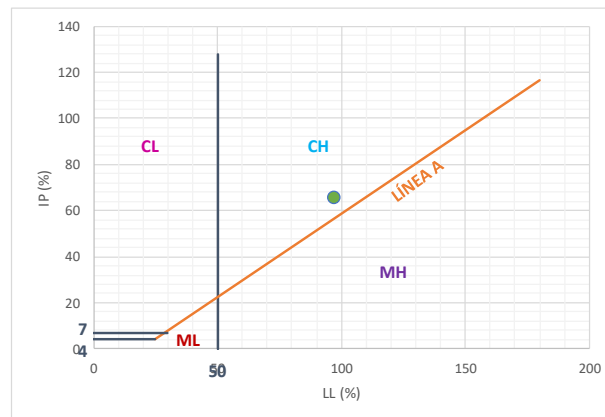
Ensayo	1	2
Número recipiente	59	70
Masa del recipiente (g)	11.299	11.241
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	16.141	16.3
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.008	15.111
Contenido de humedad (%)	31	31

LP (%)	31
---------------	-----------

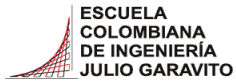
3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	66
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	CH
---------------------------	-----------



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
INV - E - 172 - 13



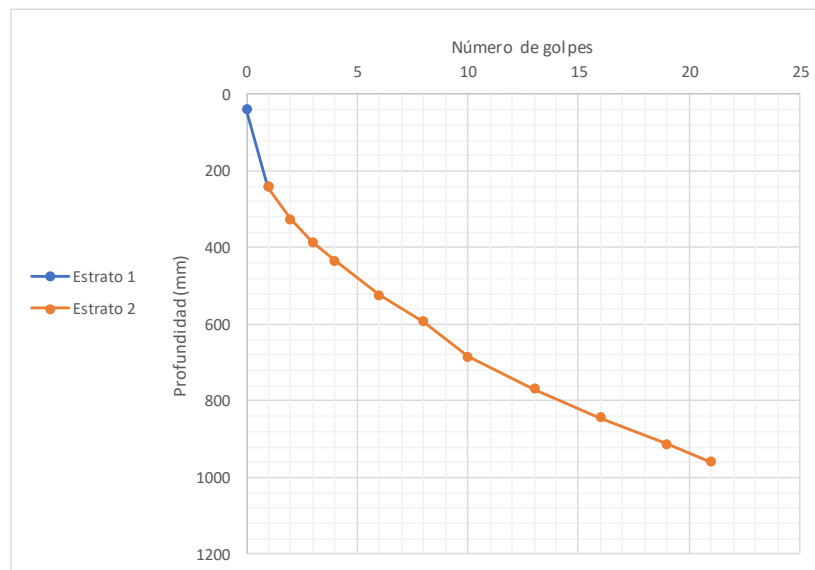
Procedencia:	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

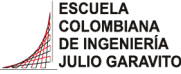

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	40	-	-	-	-
1	243	203	203	1	203
1	327	84	84	1	84
1	386	59	59	1	59
1	435	49	49	1	49
2	525	90	45	1	45
2	594	69	35	1	35
2	685	91	46	1	46
3	770	85	28	1	28
3	845	75	25	1	25
3	914	69	23	1	23
2	960	46	23	1	23

*El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestras

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	203	243
2	33	717



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	203
--	------------

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L		
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
		Profundidad (m):	1.60 - 1.80

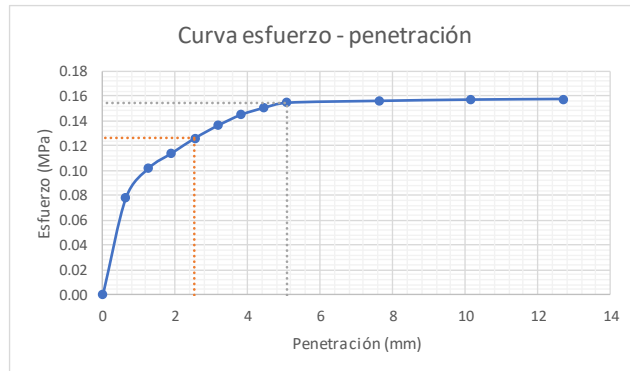
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

Humedad natural	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	106.94
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	189.38
Masa recipiente + muestra seca (g)	158.4
Contenido de humedad (%)	60.2


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	15.40	0.08
0.050	1.270	20.14	0.10
0.075	1.905	22.51	0.11
0.100	2.540	24.88	0.13
0.125	3.175	26.88	0.14
0.150	3.810	28.58	0.14
0.175	4.445	29.68	0.15
0.200	5.080	30.48	0.15
0.300	7.620	30.78	0.16
0.400	10.160	30.98	0.16
0.500	12.700	31.08	0.16


Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.13
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.15
CBR _{2,54} (%)	1.83
CBR _{5,08} (%)	1.49
CBR sin inmersión (%)	1.8



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 color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L		
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
			Profundidad (m): 1.60 - 1.80

Datos de la muestra antes del ensayo				
Dato	1	2	3	4
Altura (mm)	154.86	155.09	155.15	155.07
Diámetro (mm)	73.56	73.33	73.14	73.36

Área (mm ²)	4226.77
Volumen (cm ³)	655.42
Masa húmeda muestra (g)	1014.23
Densidad húmeda aprox. (g/cm ³)	1.55

Ciclo	Presión de cámara (kPa)	Norma				Ensayo										Módulo resiliente (MPa)		
		S ₃	S _{cíclico}	S _{máx}	S _{cíclico}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{máx}	S _{cíclico}	Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico}	Esfuerzo real (kPa)	S _{contacto}	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm)		H ₂	Deformación resiliente prom (mm)
0	41.4	24.8	104	95	24.61	22.48	2.13	2.13	2.13	0.117	0.113	0.115	0.00074	30.3				
1	41.4	12.4	51	47	12.07	11.12	0.95	0.95	0.95	0.049	0.047	0.048	0.00031	35.9				
2	41.4	24.8	109	100	25.79	23.66	2.13	2.13	2.13	0.133	0.13	0.132	0.00085	27.9				
3	41.4	37.3	164	149	38.80	35.25	3.55	3.55	3.55	0.226	0.224	0.225	0.00145	24.3				
4	41.4	49.7	216	195	51.10	46.13	4.97	4.97	4.97	0.294	0.286	0.290	0.00187	24.7				
5	41.4	62	242	215	57.25	50.87	6.39	6.39	6.39	0.361	0.358	0.360	0.00232	21.9				
6	27.6	12.4	49	45	11.59	10.65	0.95	0.95	0.95	0.048	0.046	0.047	0.00030	35.1				
7	27.6	24.8	104	95	24.61	22.48	2.13	2.13	2.13	0.12	0.117	0.119	0.00076	29.4				
8	27.6	37.3	164	149	38.80	35.25	3.55	3.55	3.55	0.211	0.207	0.209	0.00135	26.2				
9	27.6	49.7	182	161	43.06	38.09	4.97	4.97	4.97	0.285	0.284	0.285	0.00183	20.8				
10	27.6	62	254	227	60.09	53.71	6.39	6.39	6.39	0.371	0.367	0.369	0.00238	22.6				
11	13.8	12.4	53	48	12.54	11.36	1.18	1.18	1.18	0.049	0.048	0.049	0.00031	36.3				
12	13.8	24.8	101	91	23.90	21.53	2.37	2.37	2.37	0.119	0.117	0.118	0.00076	28.3				
13	13.8	37.3	159	144	37.62	34.07	3.55	3.55	3.55	0.209	0.207	0.208	0.00134	25.4				
14	13.8	49.7	198	177	46.84	41.88	4.97	4.97	4.97	0.301	0.299	0.300	0.00193	21.6				
15	13.8	62	251	224	59.38	53.00	6.39	6.39	6.39	0.367	0.365	0.366	0.00236	22.5				

Datos de humedad al inicio del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	110.46
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1124.69
Masa recipiente + muestra seca (g)	745.38
Masa del agua (g)	379.31
Masa material seco (g)	634.92
Masa material húmedo (g)	1014.23
Humedad (%)	59.74

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	110.46
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1118.23
Masa recipiente + muestra seca (g)	745.38
Masa del agua (g)	372.85
Masa material seco (g)	634.92
Masa material húmedo (g)	1007.77
Humedad (%)	58.72



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

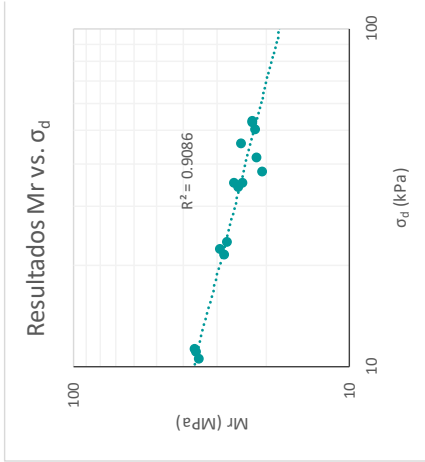
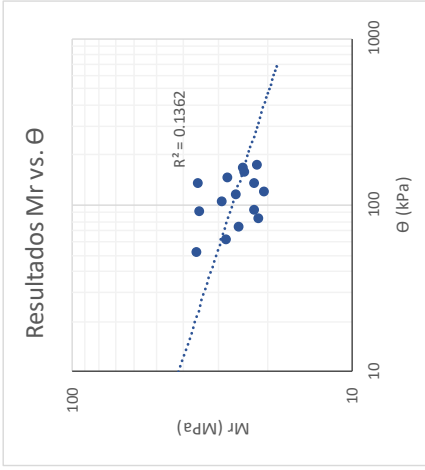
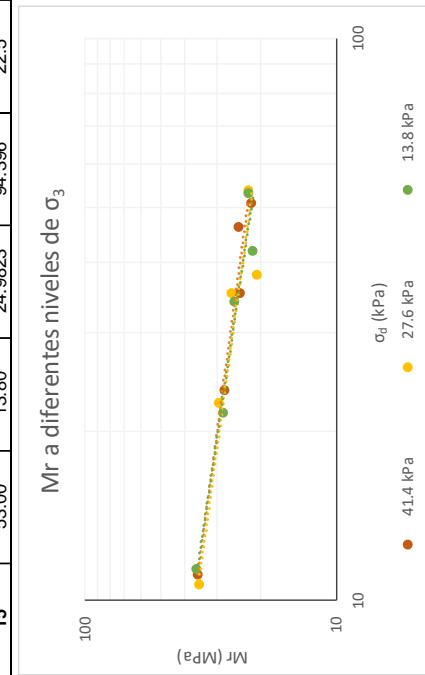
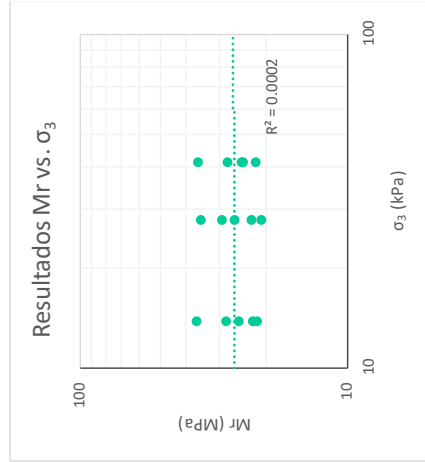
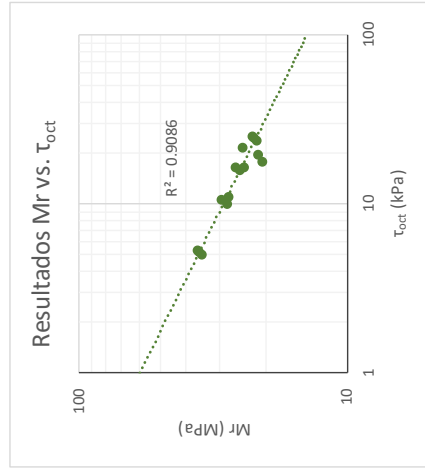


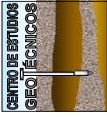
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-69 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L		
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
Profundidad (m):	1.60 - 1.80		

Ecuaciones

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \quad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.12	41.40	5.2418	135.320	35.9
2	23.66	41.40	11.1528	147.859	27.9
3	35.25	41.40	16.6177	159.452	24.3
4	46.13	41.40	21.7480	170.335	24.7
5	50.87	41.40	23.9786	175.066	21.9
6	10.65	27.60	5.0188	93.446	35.1
7	22.48	27.60	10.5952	105.276	29.4
8	35.25	27.60	16.6177	118.052	26.2
9	38.09	27.60	17.9561	120.891	20.8
10	53.71	27.60	25.3169	136.505	22.6
11	11.36	13.80	5.3534	52.756	36.3
12	21.53	13.80	10.1491	62.929	28.3
13	34.07	13.80	16.0601	75.469	25.4
14	41.88	13.80	19.7405	83.276	21.6
15	53.00	13.80	24.9823	94.396	22.5

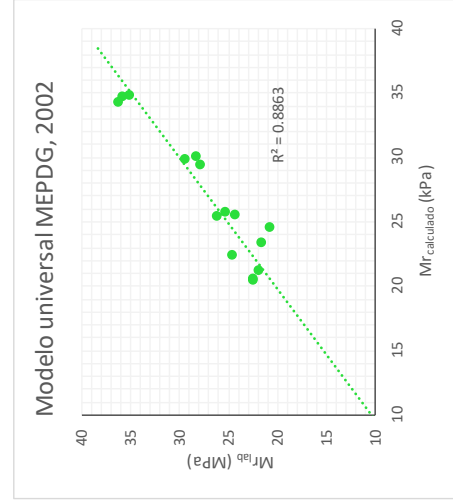
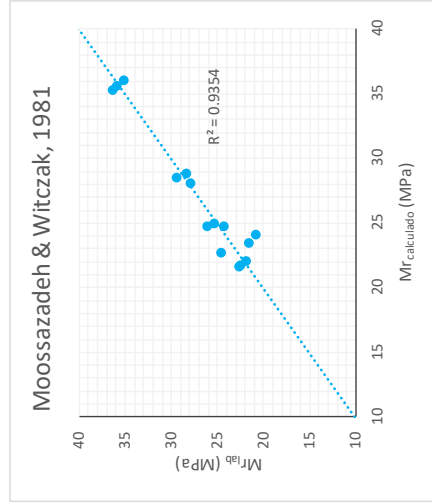




ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK-45 No.205-59 (Autopista Norte), E.C.I. detrás bloque L		
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
		Profundidad (m):	1.60 - 1.80



Moossazadeh & Witczak, 1981		Modelo universal MEPDG, 2002						
$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_v}{P_a} \right)^{k_2}$		$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$						
k_1	17.706	k_1	0.396					
k_2	-0.315	k_2	0.009					
P_a (kPa)	102	k_3	-3.066					
		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	35.9	35.591	0.3	0.1	35.9	34.707	1.2	1.5
2	27.9	28.057	-0.2	0.0	27.9	29.467	-1.6	2.5
3	24.3	24.745	-0.5	0.2	24.3	25.517	-1.2	1.5
4	24.7	22.734	1.9	3.7	24.7	22.425	2.2	5.0
5	21.9	22.046	-0.1	0.0	21.9	21.235	0.7	0.5
6	35.1	36.082	-1.0	0.9	35.1	34.808	0.3	0.1
7	29.4	28.514	0.9	0.8	29.4	29.822	-0.4	0.2
8	26.2	24.745	1.4	2.0	26.2	25.446	0.7	0.5
9	20.8	24.149	-3.4	11.5	20.8	24.591	-3.8	14.7
10	22.6	21.672	0.9	0.8	22.6	20.510	2.1	4.2
11	36.3	35.356	1.0	0.9	36.3	34.293	2.0	4.1
12	28.3	28.903	-0.6	0.4	28.3	30.042	-1.7	3.1
13	25.4	25.013	0.4	0.1	25.4	25.708	-0.3	0.1
14	21.6	23.438	-1.8	3.2	21.6	23.420	-1.8	3.2
15	22.5	21.763	0.7	0.5	22.5	20.605	1.8	3.4
		Σ		25.2			Σ	44.4

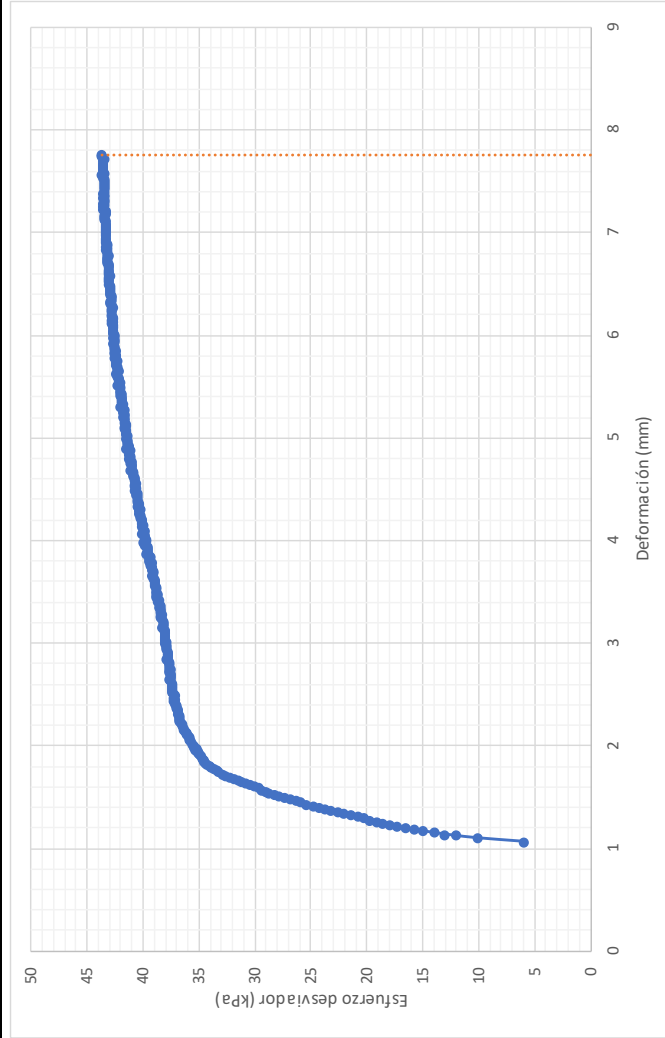


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

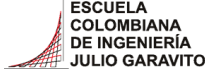



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L		
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
		Profundidad (m):	1.60 - 1.80

Prueba rápida de corte



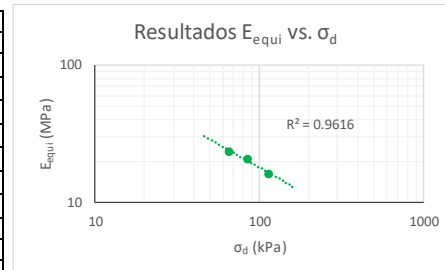
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.155
Máximo esfuerzo (kPa)	43.71
Máxima deformación (mm)	7.762
Máxima deformación (%)	5.006

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

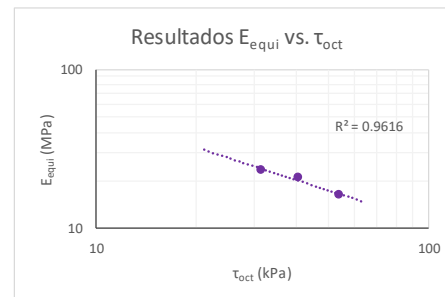
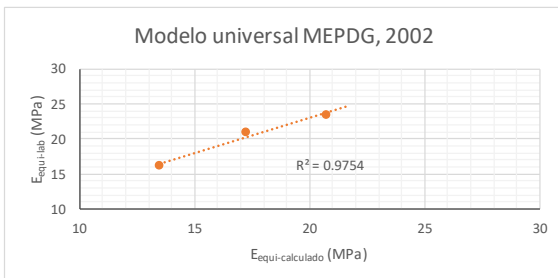
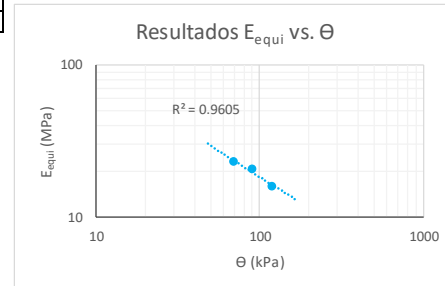
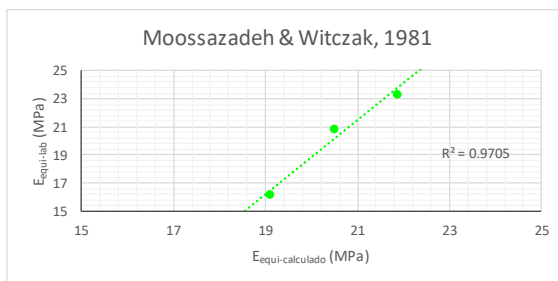
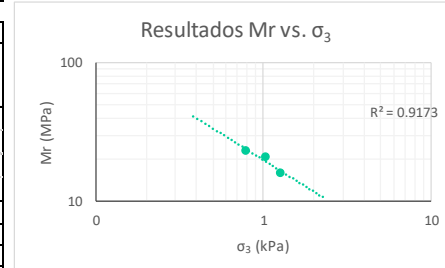
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L		
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
		Profundidad (m):	1.60 - 1.80



Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	60
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo		1	2	3
Penetración objetivo (mm)		0.639	1.310	2.531
Carga máxima pistón (kg)	P_{max}	15.402	20.141	24.881
Carga cíclica pistón (kg)	P_{cíclico}	13.032	16.919	22.512
Carga de contacto pistón (kg)	P_{contacto}	2.370	3.222	2.369
Esfuerzo máximo pistón (kPa)	σ₁	0.078	0.102	0.126
Esfuerzo desviador pistón (MPa)	σ_d	0.066	0.086	0.114
Esfuerzo confinamiento (MPa)	σ₃	0.001	0.001	0.001
Cortante octaédrico (MPa)	τ_{oct}	0.031	0.040	0.054
Invariante de esfuerzos (MPa)	θ	0.068	0.089	0.118
Deformación elástica (mm)	u	0.064	0.093	0.159
Módulo equivalente (MPa)	E_{equi}	23.4	20.9	16.2

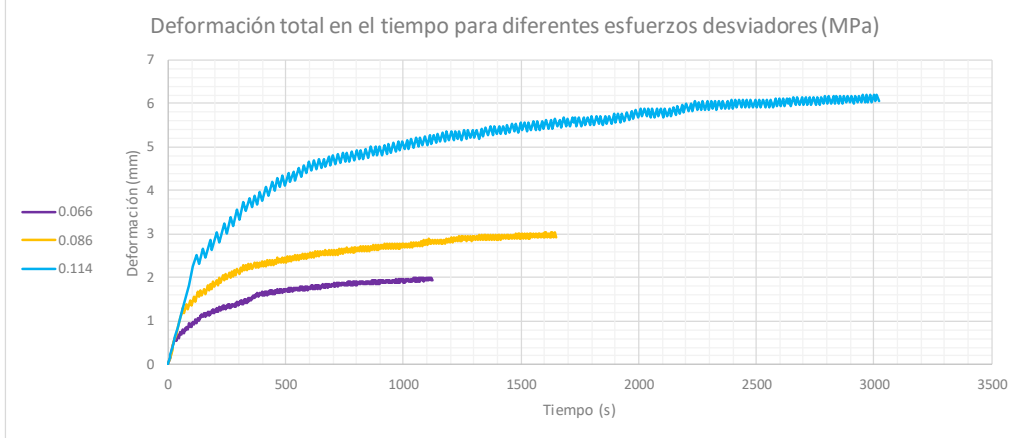


Moosazadeh & Witzcak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
	k₁	19.646		k₁	0.426
	k₂	-0.246		k₂	0.010
	P_a (MPa)	0.102		k₃	-2.766
				P_a (MPa)	0.102
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
23.4	21.86	2.4	23.4	20.70	7.3
20.9	20.50	0.2	20.9	17.22	13.7
16.2	19.11	8.6	16.2	13.48	7.3
	Σ	11.1		Σ	28.3





 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces				
Precedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L				
Fecha exploración:	Julio 05 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019	Profundidad (m):	1.60 - 1.80

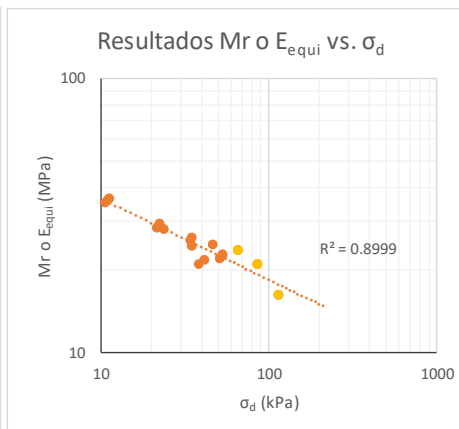
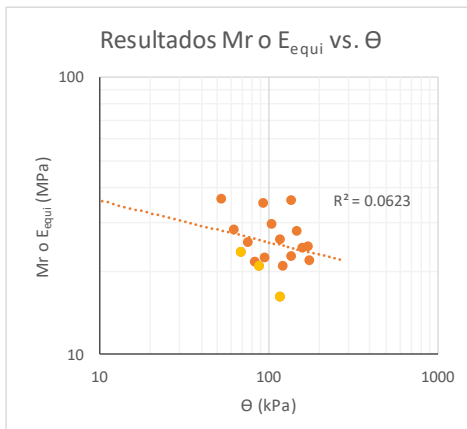
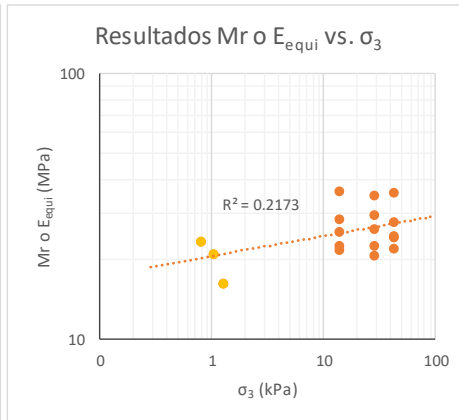
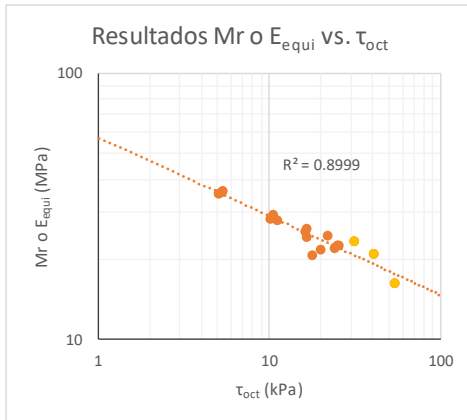


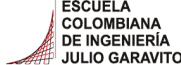

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)
<p style="text-align: center;">Carga (kg) vs Deformación (mm) for 0.066 MPa</p>	<p style="text-align: center;">Deformaciones vs Ciclo for 0.066 MPa</p>
<p style="text-align: center;">Carga (kg) vs Deformación (mm) for 0.086 MPa</p>	<p style="text-align: center;">Deformaciones vs Ciclo for 0.086 MPa</p>
<p style="text-align: center;">Carga (kg) vs Deformación (mm) for 0.114 MPa</p>	<p style="text-align: center;">Deformaciones vs Ciclo for 0.114 MPa</p>

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia de raíces
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, detrás bloque L
Fecha exploración	Julio 05 de 2019
Fecha ensayos:	Julio 06 a 12 de 2019
Profundidad (m):	1.60 - 1.80

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	12.07	11.12	41.40	5.24	135.32	0.00031	35.92
	2	25.79	23.66	41.40	11.15	147.86	0.00085	27.90
	3	38.80	35.25	41.40	16.62	159.45	0.00145	24.29
	4	51.10	46.13	41.40	21.75	170.33	0.00187	24.67
	5	57.25	50.87	41.40	23.98	175.07	0.00232	21.94
	6	11.59	10.65	27.60	5.02	93.45	0.00030	35.13
	7	24.61	22.48	27.60	10.60	105.28	0.00076	29.41
	8	38.80	35.25	27.60	16.62	118.05	0.00135	26.15
	9	43.06	38.09	27.60	17.96	120.89	0.00183	20.76
	10	60.09	53.71	27.60	25.32	136.51	0.00238	22.57
	11	12.54	11.36	13.80	5.35	52.76	0.00031	36.31
	12	23.90	21.53	13.80	10.15	62.93	0.00076	28.29
	13	37.62	34.07	13.80	16.06	75.47	0.00134	25.40
	14	46.84	41.88	13.80	19.74	83.28	0.00193	21.64
	15	59.38	53.00	13.80	24.98	94.40	0.00236	22.45
cCBR	16	78.07	66.06	0.78	31.14	68.40	-	23.40
	17	102.09	85.76	1.02	40.43	88.82	-	20.92
	18	126.12	114.11	1.26	53.79	117.90	-	16.18



	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00



1. Determinación del contenido de humedad

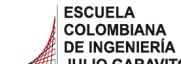

Masa del recipiente (g)	119.8
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	265.1
Masa recipiente + suelo seco (g)	199.67
Contenido de humedad (%)	81.9

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	165.1
Masa de la muestra parafinada (g)	169.2
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	48.9
Temperatura del agua (°)	15
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99910
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	116.00

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	165.1
Volumen de la muestra (cm ³)	116.00
Densidad de la muestra (gr/cm ³)	1.42
Peso unitario de la muestra (kN/m³)	13.96

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

4. Calibración del picnómetro

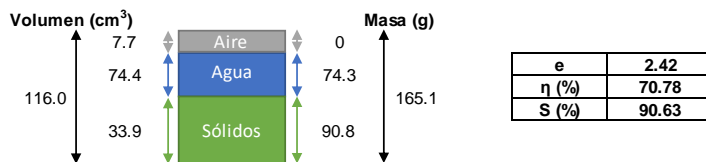
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	174.11	672.21	23.4	0.99745	499.37
2	174.12	672.32	21.4	0.99791	499.24
3	174.11	672.89	16.6	0.99885	499.35
4	174.11	672.84	16.4	0.99888	499.29
5	174.11	672.87	16.8	0.99881	499.35
Prom	174.11	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)	50.4
Temperatura de ensayo (°C)	21.2
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99795
Masa picnómetro vacío (g)	174.11
Volumen picnómetro (cm ³)	499.32
Masa picnómetro con agua (g)	672.41
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	704.01
Gravedad específica sin corregir	2.68
Factor de corrección	0.99974
Gravedad específica corregida	2.68

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	16.4
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	31.4
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	31.4
Masa del agua (g)	0
Masa material seco (g)	15
Humedad higroscópica (%)	0.0
Factor corrección Ch	1.0000

3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.6
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	50.6
Gravedad específica del suelo - G _s	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	3153

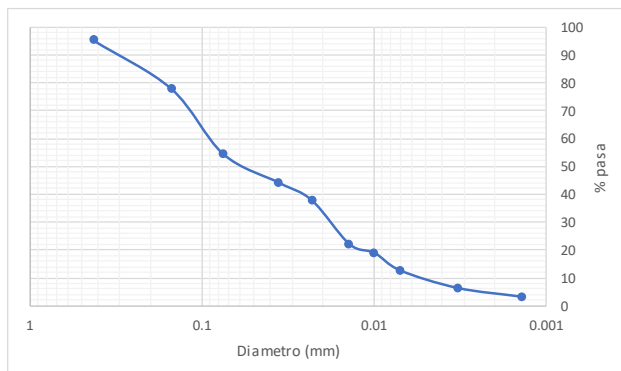
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	6:30
--	------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
6:32	2	1.017	16.4	0.0030	1.014	44.14	0.01415	12.6	0.0355
6:35	5	1.015	16.4	0.0030	1.012	37.83	0.01415	13.1	0.0229
6:45	15	1.010	16.4	0.0030	1.007	22.07	0.01415	14.4	0.0139
7:00	30	1.009	16.6	0.0030	1.006	18.92	0.01415	14.7	0.0099
7:30	60	1.007	17.8	0.0030	1.004	12.61	0.01397	15.2	0.0070
10:47	250	1.005	23.4	0.0030	1.002	6.31	0.01299	15.8	0.0033
6:30	1440	1.004	22.6	0.0030	1.001	3.15	0.01314	16.0	0.0014

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

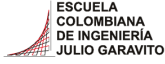

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	50.6
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	23.03
% Retenido en tamiz No 200	45.5
% Pasa el tamiz No 200	54.5

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	W _{RETENIDO} (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.0	100.0	0.0
2.000	No 10	0.00	0.0	100.0	0.0
0.850	No 20	0.20	0.4	99.6	0.4
0.425	No 40	2.15	4.2	95.4	4.6
0.150	No 100	8.83	17.5	77.9	22.1
0.075	No 200	11.85	23.4	54.5	45.5



Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	5
Fina	0.425 - 0.075	41
Finos		
Limo - Arcilla	>0.075	54

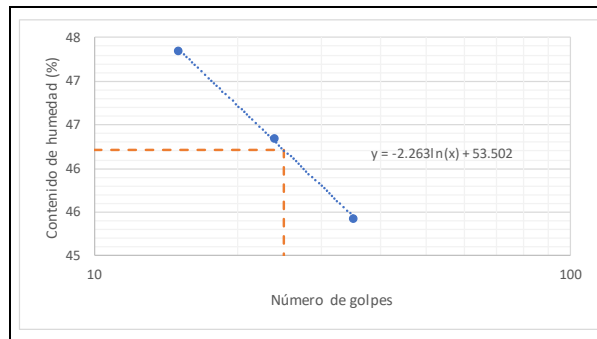
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	46
Finos	< 0.075	54

	<p>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</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	70	12	62
Masa del recipiente (g)	11.26	9.53	10.931
No. Golpes	15	24	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	21.84	17.72	22.311
Masa recipiente + suelo seco (g)	18.44	15.126	18.756
Contenido de humedad (%)	47	46	45



LL (%)	46
---------------	-----------

2. Determinación límite plástico

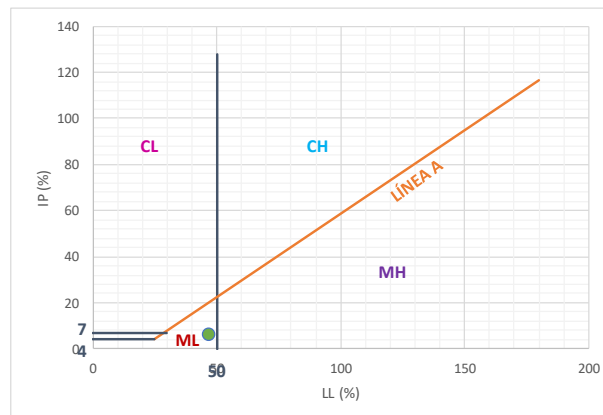
Ensayo	1	2
Número recipiente	64	66
Masa del recipiente (g)	10.981	11.142
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	19.221	17.174
Masa recipiente + suelo seco (g)	16.824	15.499
Contenido de humedad (%)	41	38

LP (%)	40
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	6
---------------	----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	ML
---------------------------	-----------

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

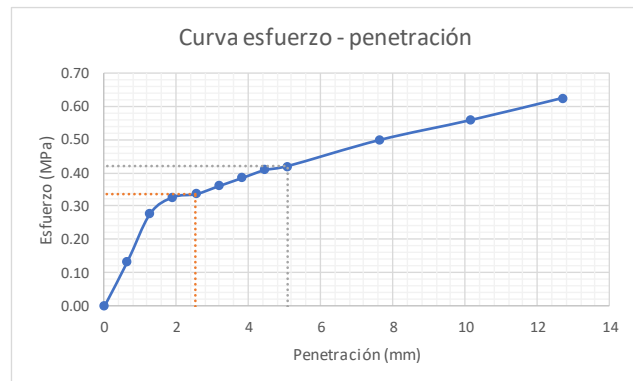
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

Humedad natural	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	106.94
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	199.48
Masa recipiente + muestra seca (g)	158.4
Contenido de humedad (%)	79.8

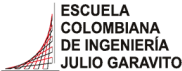

Datos iniciales del ensayo	
# del molde	-
Masa del molde (g)	-
Volumen del molde (cm ³)	-
Masa molde + suelo húmedo (g)	-
Densidad húmeda (g/cm ³)	-
Densidad seca (g/cm ³)	-

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	26.31	0.13
0.050	1.270	54.91	0.28
0.075	1.905	64.56	0.33
0.100	2.540	66.35	0.34
0.125	3.175	71.09	0.36
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	98.34	0.50
0.400	10.160	110.19	0.56
0.500	12.700	123.22	0.62

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.34
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.42
CBR _{2,54} (%)	4.88
CBR _{5,08} (%)	4.07
CBR sin inmersión (%)	4.9

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

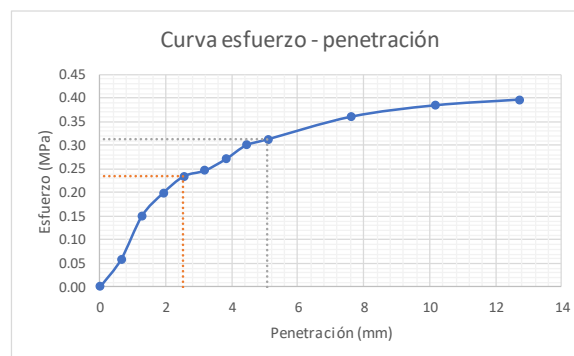
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	106.94
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	199.48
Masa recipiente + muestra seca (g)	158.4
Contenido de humedad (%)	79.8


Inmersión	
Tiempo de inmersión (h)	96
Altura inicial de la muestra (mm)	177.8
Lectura inicial (mm)	2
Lectura final (mm)	2
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	11.484	0.06
0.050	1.270	29.620	0.15
0.075	1.905	39.098	0.20
0.100	2.540	46.207	0.23
0.125	3.175	48.577	0.25
0.150	3.810	53.316	0.27
0.175	4.445	59.240	0.30
0.200	5.080	61.610	0.31
0.300	7.620	71.088	0.36
0.400	10.160	75.827	0.38
0.500	12.700	78.197	0.40




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 (%)	3.4

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	-
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	-
Masa recipiente + muestra seca (g)	-
Contenido de humedad (%)	N/A



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA DE INGENIERIA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



CENTRO DE ESTUDIOS GEOTECNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

Datos de la muestra antes del ensayo				
Dato	1	2	3	4
Altura (mm)	127.48	127.79	127.81	127.42
Diámetro (mm)	61.22	60.55	61.36	61.09
				61.06

Área (mm ²)	2927.74
Volumen (cm ³)	373.65
Masa húmeda muestra (g)	502.76
Densidad húmeda aprox. (g/cm ³)	1.35

Ciclo	Presión de cámara (kPa)	Norma				Ensayo										Módulo resiliente (MPa)									
		S ₃	S _{cíclico}	S _{máx}	S _{cíclico}	Carga máxima real (N)	P _{cíclico}	Carga cíclica real (N)	P _{cíclico}	Carga de contacto real (N)	P _{contacto}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{máx}	Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico}		Esfuerzo real (kPa)	S _{contacto}	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	H ₂	Deformación resiliente prom (mm)	H _{promedio}	Deformación resiliente unitaria ε _r
0	41.4	24.8	62	56	21.18	19.13	2.05	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.0053	35.9
1	41.4	12.4	24	21	8.20	7.17	1.02	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.00013	53.8
2	41.4	24.8	57	52	19.47	17.76	1.71	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.00049	36.6
3	41.4	37.3	83	75	28.35	25.62	2.73	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.00070	36.7
4	41.4	49.7	160	146	54.65	49.87	4.78	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.00147	34.0
5	41.4	62	167	148	57.04	50.55	6.49	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.00197	25.7
6	27.6	12.4	26	24	8.88	8.20	0.68	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.00018	45.5
7	27.6	24.8	84	77	28.69	26.30	2.39	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.00078	33.6
8	27.6	37.3	101	91	34.50	31.08	3.42	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.00093	33.3
9	27.6	49.7	150	135	51.23	46.11	5.12	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.00151	30.5
10	27.6	62	168	149	57.38	50.89	6.49	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.00172	29.7
11	13.8	12.4	48	46	16.39	15.71	0.68	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.00038	40.9
12	13.8	24.8	65	63	22.20	21.52	0.68	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.00063	33.9
13	13.8	37.3	111	101	37.91	34.50	3.42	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.00118	29.2
14	13.8	49.7	147	132	50.21	45.09	5.12	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.00190	23.8
15	13.8	62	180	163	61.48	55.67	5.81	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.00273	20.4

Datos de humedad al inicio del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	109.27
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	612.03
Masa recipiente + muestra seca (g)	387.66
Masa del agua (g)	224.37
Masa material seco (g)	278.39
Masa material húmedo (g)	502.76
Humedad (%)	80.60

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	109.27
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	609.92
Masa recipiente + muestra seca (g)	387.66
Masa del agua (g)	222.26
Masa material seco (g)	278.39
Masa material húmedo (g)	500.65
Humedad (%)	79.84



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

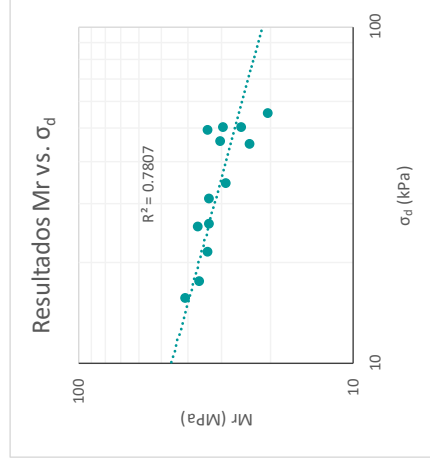
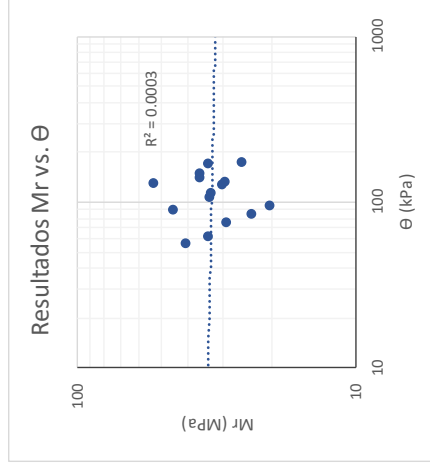
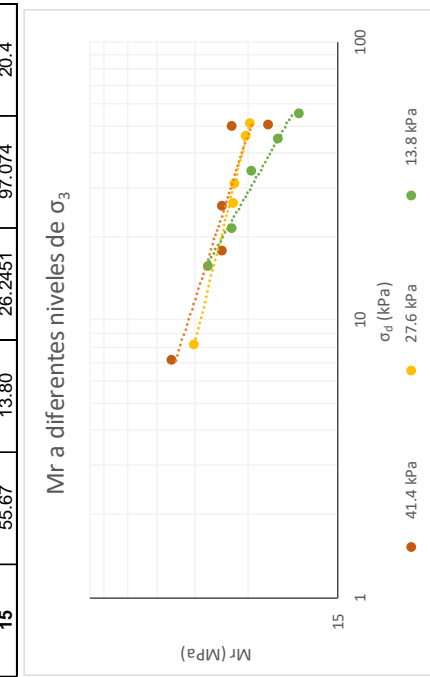
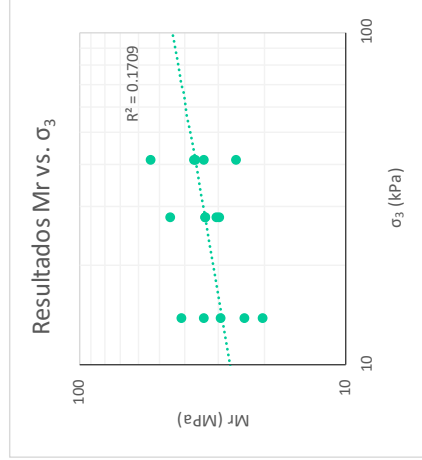
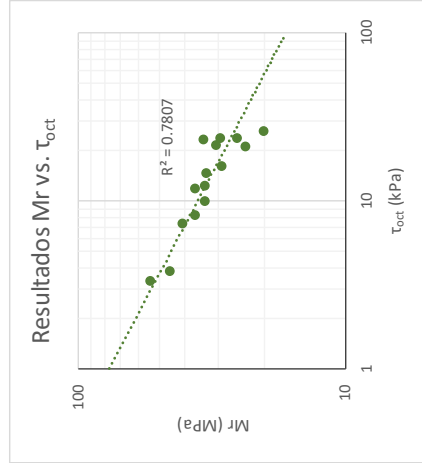


Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 68 No. 151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
Profundidad (m):	0.80 - 1.00		

Ecuaciones

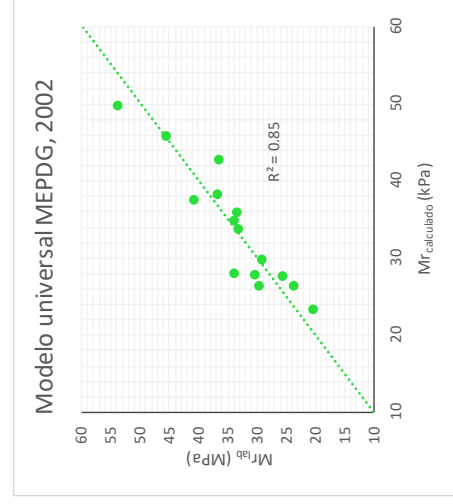
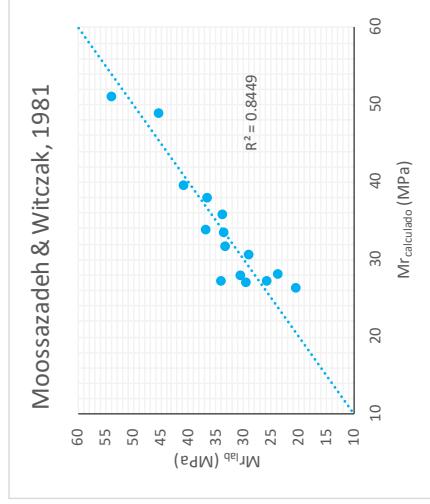
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \quad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	Mr (MPa)
1	7.17	41.40	3.3813	131.373	53.8
2	17.76	41.40	8.3727	141.961	96.6
3	25.62	41.40	12.0760	149.817	36.7
4	49.87	41.40	23.5079	174.088	34.0
5	50.55	41.40	23.8299	174.751	25.7
6	8.20	27.60	3.8643	90.997	45.5
7	26.30	27.60	12.3980	109.100	33.6
8	31.08	27.60	14.6522	113.882	33.3
9	46.11	27.60	21.7368	128.911	30.5
10	50.89	27.60	23.9910	133.693	29.7
11	15.71	13.80	7.4066	57.112	40.9
12	21.52	13.80	10.1438	62.918	33.9
13	34.50	13.80	16.2623	75.898	29.2
14	45.09	13.80	21.2537	86.486	23.8
15	55.67	13.80	26.2451	97.074	20.4





Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
Profundidad (m):	0.80 - 1.00		



Ciclo	Moossazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	Mr_lab (MPa)	Mr_cal (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (Mpa)	Mr_lab (MPa)	Mr_cal (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)
1	53.8	51.032	2.8	7.9	53.8	49.712	4.1	17.1
2	36.6	38.094	-1.5	2.4	36.6	42.699	-6.1	37.7
3	36.7	33.850	2.9	8.3	36.7	38.302	-1.6	2.5
4	34.0	27.307	6.7	45.3	34.0	27.936	6.1	37.2
5	25.7	27.187	-1.5	2.2	25.7	27.700	-2.0	4.0
6	45.5	48.881	-3.4	11.5	45.5	45.790	-0.3	0.1
7	33.6	33.564	0.0	0.0	33.6	35.823	-2.3	5.1
8	33.3	31.804	1.5	2.3	33.3	33.659	-0.3	0.1
9	30.5	28.005	2.5	6.2	30.5	27.857	2.6	6.9
10	29.7	27.128	2.5	6.4	29.7	26.282	3.4	11.4
11	40.9	39.630	1.3	1.7	40.9	37.435	3.5	12.2
12	33.9	35.808	-1.9	3.6	33.9	34.860	-1.0	0.9
13	29.2	30.752	-1.6	2.5	29.2	29.798	-0.6	0.4
14	23.8	28.209	-4.4	19.6	23.8	26.301	-2.5	6.4
15	20.4	26.354	-5.9	35.2	20.4	23.288	-2.9	8.2
			Σ	155.2			Σ	150.2

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_3} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3} + 1$$

k₁	21.680
k₂	-0.322
P_a (kPa)	102
k₁	0.524
k₂	0.179
k₃	-3.586
P_a (kPa)	102

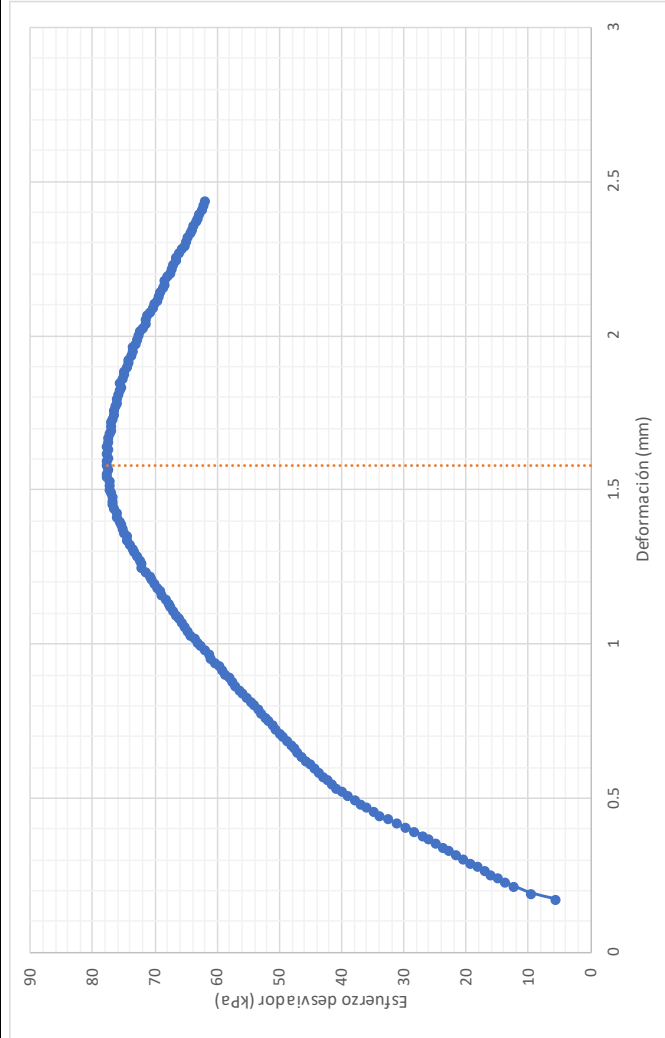


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

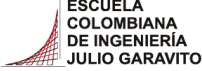



Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
Profundidad (m):	0.80 - 1.00		

Prueba rápida de corte



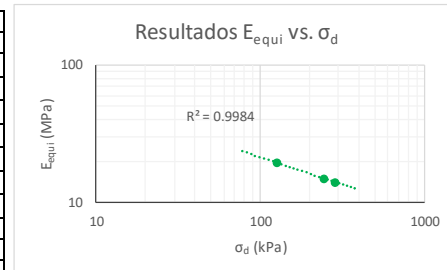
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.128
Máximo esfuerzo (kPa)	77.84
Máxima deformación (mm)	1.58
Máxima deformación (%)	1.238

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)	
---	--	---

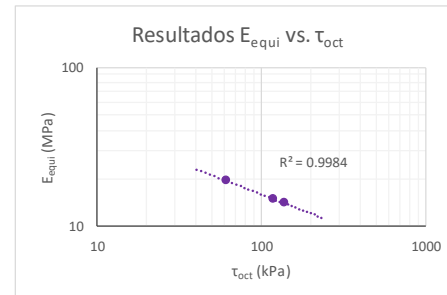
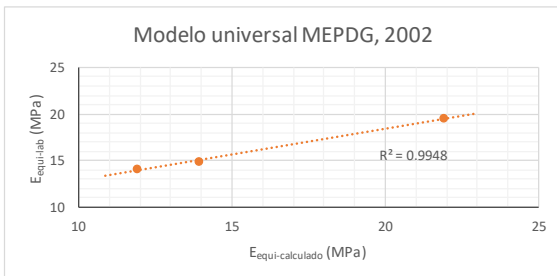
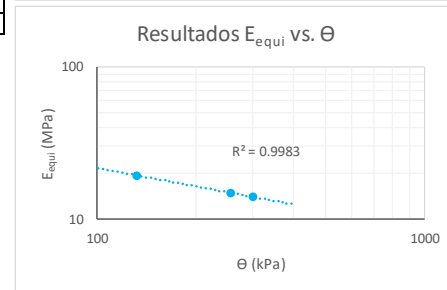
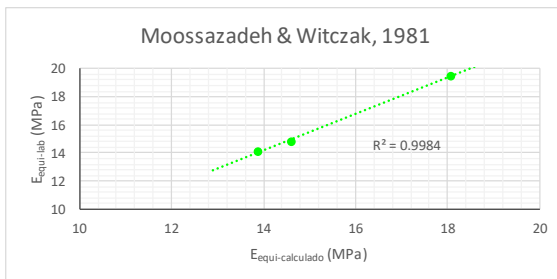
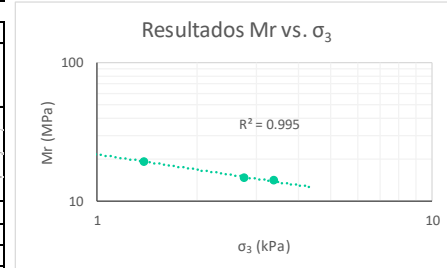
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

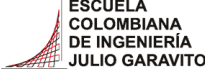

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	82
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.632	1.277	2.419
Carga máxima pistón (kg) P_{max}	27.250	54.501	66.349
Carga cíclica pistón (kg) P_{cíclico}	25.231	48.911	57.198
Carga de contacto pistón (kg) P_{contacto}	2.019	5.590	9.151
Esfuerzo máximo pistón (kPa) σ₁	0.138	0.276	0.336
Esfuerzo desviador pistón (MPa) σ_d	0.128	0.248	0.290
Esfuerzo confinamiento (MPa) σ₃	0.001	0.003	0.003
Cortante octaédrico (MPa) τ_{oct}	0.060	0.117	0.137
Invariante de esfuerzos (MPa) θ	0.132	0.256	0.300
Deformación elástica (mm) u	0.148	0.372	0.456
Módulo equivalente (MPa) E_{equi}	19.5	14.8	14.1

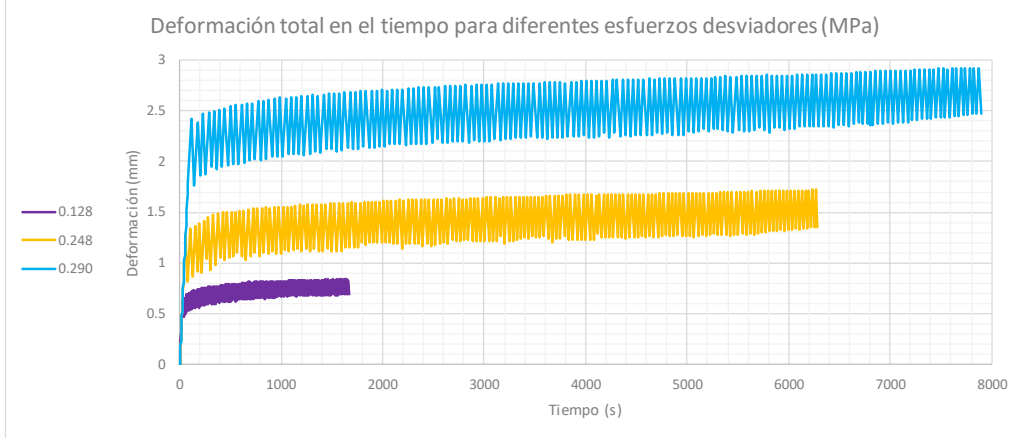


Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
k₁	19.446		k₁	0.804	
k₂	-0.322		k₂	0.799	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-3.286	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
19.5	18.08	2.0	19.5	21.90	5.9
14.8	14.61	0.1	14.8	13.92	0.8
14.1	13.89	0.1	14.1	11.88	5.1
	Σ	2.1		Σ	11.8





 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31				
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019	Profundidad (m):	0.80 - 1.00

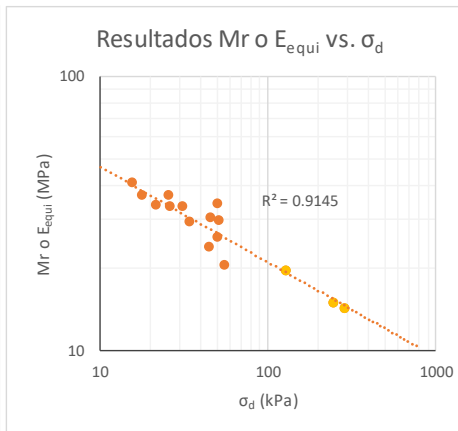
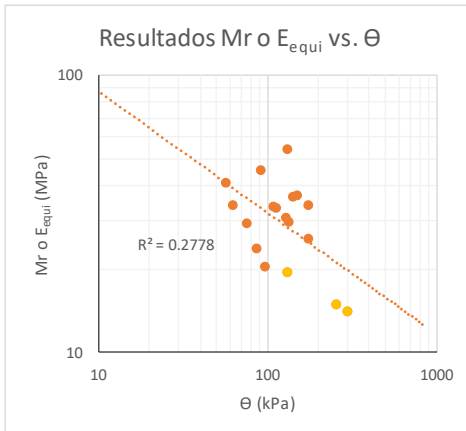
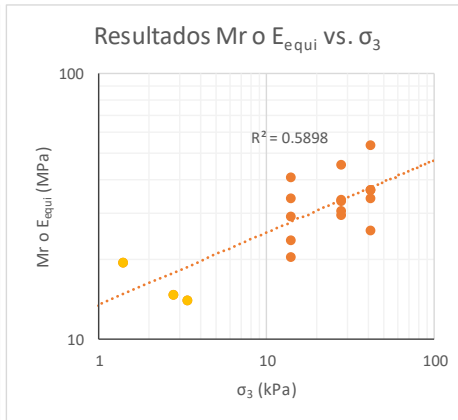
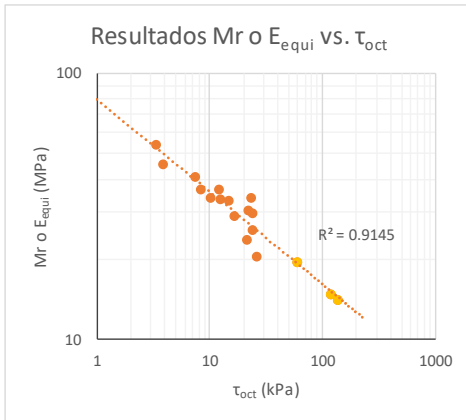




Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena
Procedencia (Localización):	Proyecto Carrá, Carrera 58 No.151-31
Fecha exploración	Julio 19 de 2019
Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
Profundidad (m):	0.80 - 1.00

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	8.20	7.17	41.40	3.38	131.37	0.00013	53.85
	2	19.47	17.76	41.40	8.37	141.96	0.00049	36.56
	3	28.35	25.62	41.40	12.08	149.82	0.00070	36.73
	4	54.65	49.87	41.40	23.51	174.07	0.00147	34.03
	5	57.04	50.55	41.40	23.83	174.75	0.00197	25.70
	6	8.88	8.20	27.60	3.86	91.00	0.00018	45.49
	7	28.69	26.30	27.60	12.40	109.10	0.00078	33.57
	8	34.50	31.08	27.60	14.65	113.88	0.00093	33.33
	9	51.23	46.11	27.60	21.74	128.91	0.00151	30.49
	10	57.38	50.89	27.60	23.99	133.69	0.00172	29.66
	11	16.39	15.71	13.80	7.41	57.11	0.00038	40.92
	12	22.20	21.52	13.80	10.14	62.92	0.00063	33.90
	13	37.91	34.50	13.80	16.26	75.90	0.00118	29.16
	14	50.21	45.09	13.80	21.25	86.49	0.00190	23.78
	15	61.48	55.67	13.80	26.25	97.07	0.00273	20.42
cCBR	16	138.13	127.89	1.38	60.29	132.04	-	19.48
	17	276.26	247.93	2.76	116.87	256.21	-	14.84
	18	336.32	289.93	3.36	136.68	300.02	-	14.13



	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40



1. Determinación del contenido de humedad

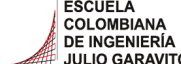

Masa del recipiente (g)	108.52
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	181.74
Masa recipiente + suelo seco (g)	158.2
Contenido de humedad (%)	47.4

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	257.5
Masa de la muestra parafinada (g)	260
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	105.4
Temperatura del agua (°)	15.8
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99898
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	152.07

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	257.5
Volumen de la muestra (cm ³)	152.07
Densidad de la muestra (gr/cm ³)	1.69
Peso unitario de la muestra (kN/m³)	16.61

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

4. Calibración del picnómetro

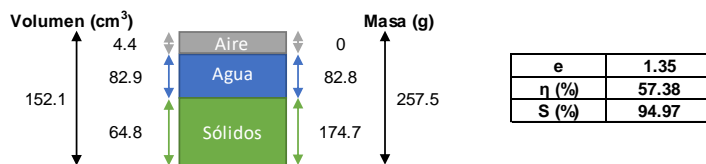
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.66	21.4	0.99791	499.46
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	143.24	641.98			499.55
Desv.	0.00	0.35			0.05



*Calibración realizada en agosto de 2018

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	50.09
Temperatura de ensayo (°C)	20.2
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99816
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm ³)	499.55
Masa picnómetro con agua (g)	641.87
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	673.4
Gravedad específica sin corregir	2.70
Factor de corrección	0.99996
Gravedad específica corregida	2.70

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	17.6
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	33.1
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	33.1
Masa del agua (g)	0
Masa material seco (g)	15.5
Humedad higroscópica (%)	0.0
Factor corrección Ch	1.0000

3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	51
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	51.0
Gravedad específica del suelo - G _s	2.70
Gravedad específica del agua - G ₁	1.000
$Constante A = \left[\frac{100000}{W_{muestra} * G_s} * \frac{G_s}{G_s - g_1} \right]$	
A	3114

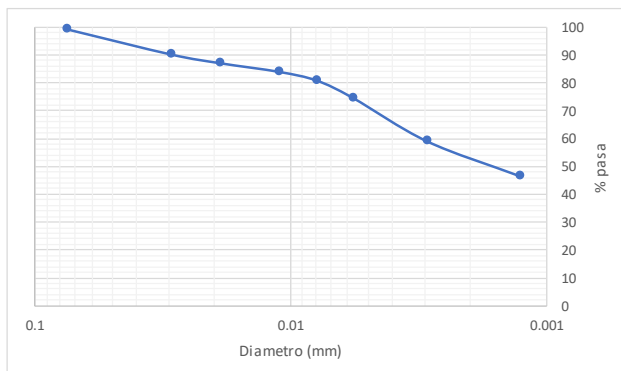
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	6:38
--	------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
6:40	2	1.032	16.2	0.0030	1.029	90.31	0.01410	8.6	0.0292
6:43	5	1.031	16.2	0.0030	1.028	87.20	0.01410	8.9	0.0188
6:53	15	1.030	16.2	0.0030	1.027	84.08	0.01410	9.2	0.0110
7:08	30	1.029	16.4	0.0030	1.026	80.97	0.01410	9.4	0.0079
7:38	60	1.027	17.0	0.0030	1.024	74.74	0.01396	10.0	0.0057
10:55	250	1.022	18.6	0.0030	1.019	59.17	0.01375	11.3	0.0029
6:38	1440	1.018	18.6	0.0030	1.015	46.71	0.01375	12.3	0.0013

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)



Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	51.0
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	0.31
% Retenido en tamiz No 200	0.6
% Pasa el tamiz No 200	99.4

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	W _{RETENIDO} (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.0	100.0	0.0
2.000	No 10	0.00	0.0	100.0	0.0
0.850	No 20	0.02	0.0	100.0	0.0
0.425	No 40	0.02	0.0	99.9	0.1
0.150	No 100	0.11	0.2	99.7	0.3
0.075	No 200	0.16	0.3	99.4	0.6



Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	0
Fina	0.425 - 0.075	1
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	99

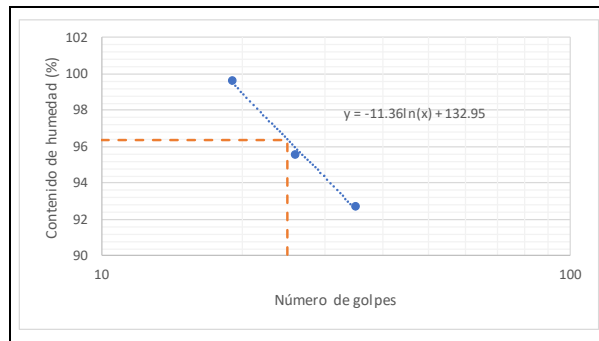
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	1
Finos	< 0.075	99

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	12	70	64
Masa del recipiente (g)	9.542	11.259	10.98
No. Golpes	19	26	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	20.883	21.059	20.106
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.222	16.269	15.715
Contenido de humedad (%)	100	96	93



LL (%)	96
---------------	-----------

2. Determinación límite plástico

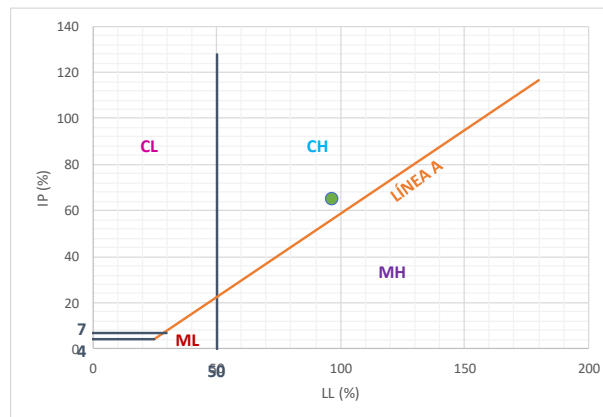
Ensayo	1	2
Número recipiente	62	66
Masa del recipiente (g)	10.938	11.175
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	15.48	16.76
Masa recipiente + suelo seco (g)	14.408	15.424
Contenido de humedad (%)	31	31

LP (%)	31
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	65
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	CH
---------------------------	-----------

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13	
---	--	---

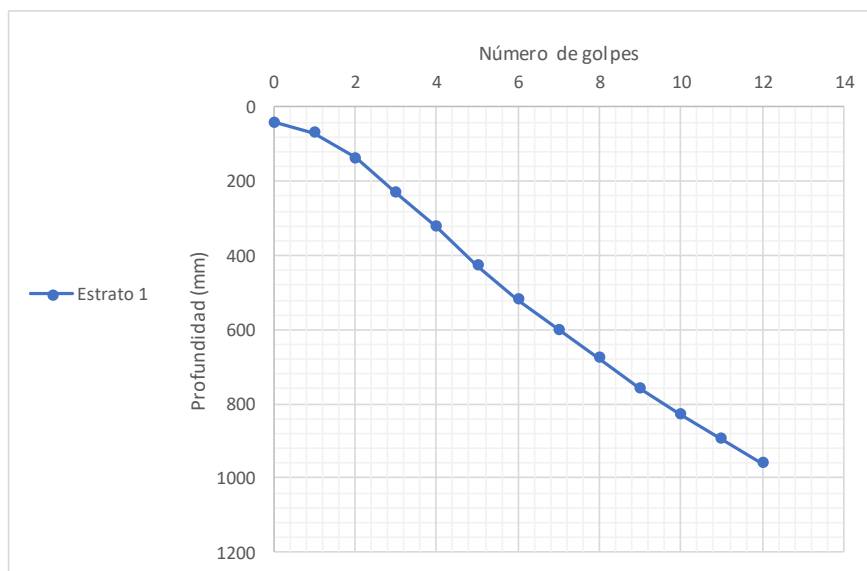
Procedencia:	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

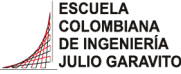

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	40	-	-	-	-
1	69	75	75	1	75
1	136	71	71	1	71
1	230	69	69	1	69
1	323	30	30	1	30
1	427	41	41	1	41
1	518	39	39	1	39
1	600	40	40	1	40
1	677	42	42	1	42
1	760	32	32	1	32
1	829	47	47	1	47
1	895	32	32	1	32
1	960	60	60	1	60

*El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestras

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	82	960



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	82
--	-----------

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

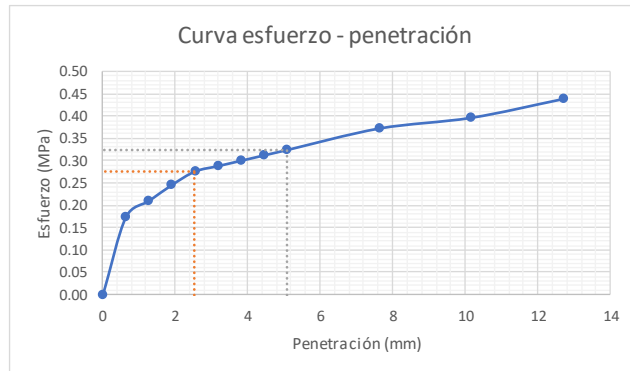
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

Humedad natural	
# recipiente	1
Masa recipiente (g)	115.04
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	916.48
Masa recipiente + muestra seca (g)	658.69
Contenido de humedad (%)	47.4

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	34.36	0.17
0.050	1.270	41.47	0.21
0.075	1.905	48.58	0.25
0.100	2.540	54.50	0.28
0.125	3.175	56.87	0.29
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	73.46	0.37
0.400	10.160	78.20	0.40
0.500	12.700	86.49	0.44

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.28
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.32
CBR _{2,54} (%)	4.01
CBR _{5,08} (%)	3.14
CBR sin inmersión (%)	4.0



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK-45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40


Datos de la muestra antes del ensayo				
Dato	1	2	3	4
Altura (mm)	152.52	152.69	151.88	151.75
Diámetro (mm)	72.86	72.66	73.03	73.21
				72.94

Área (mm ²)	4178.51
Volumen (cm ³)	636.01
Masa húmeda muestra (g)	1081.73
Densidad húmeda aprox. (g/cm ³)	1.70


Ciclo	Norma		Ensayo										Módulo resiliente (MPa)													
	Presión de cámara (kPa)	S ₃	Esfuerzo cíclico (kPa)	S _{cíclico}	Carga máxima real (N)	P _{max}	Carga cíclica real (N)	F _{cíclico}	Carga de contacto real (N)	P _{contacto}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{max r}		Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico r}	Esfuerzo de contacto real (kPa)	S _{contacto r}	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	H ₂	Deformación resiliente promedio (mm)	H _{promedio}	Deformación resiliente unitaria	ε _r	M _r
0	41.4	41.4	24.8	24.8	100	100	91	91	9	23.93	23.93	21.78	21.78	2.15	2.15	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.00028	0.00028	77.1
1	41.4	41.4	12.4	12.4	58	58	55	55	3	13.88	13.88	13.16	13.16	0.72	0.72	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.00016	0.00016	83.5
2	41.4	41.4	24.8	24.8	114	114	104	104	10	27.28	27.28	24.89	24.89	2.39	2.39	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00033	0.00033	75.8
3	41.4	41.4	37.3	37.3	154	154	139	139	15	36.86	36.86	33.27	33.27	3.59	3.59	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00059	0.00059	56.6
4	41.4	41.4	49.7	49.7	236	236	216	216	20	56.48	56.48	51.69	51.69	4.79	4.79	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00092	0.00092	56.2
5	41.4	41.4	62	62	294	294	268	268	26	70.36	70.36	64.14	64.14	6.22	6.22	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.00120	0.00120	53.3
6	27.6	27.6	12.4	12.4	48	48	44	44	4	11.49	11.49	10.53	10.53	0.96	0.96	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.00014	0.00014	76.3
7	27.6	27.6	24.8	24.8	119	119	109	109	10	28.48	28.48	26.09	26.09	2.39	2.39	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00039	0.00039	66.2
8	27.6	27.6	37.3	37.3	172	172	157	157	15	41.16	41.16	37.57	37.57	3.59	3.59	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.00068	0.00068	55.0
9	27.6	27.6	49.7	49.7	239	239	218	218	21	57.20	57.20	52.17	52.17	5.03	5.03	0.153	0.153	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.00101	0.00101	51.7
10	27.6	27.6	62	62	294	294	267	267	27	70.36	70.36	63.90	63.90	6.46	6.46	0.188	0.188	0.189	0.189	0.189	0.189	0.189	0.189	0.00124	0.00124	51.6
11	13.8	13.8	12.4	12.4	59	59	56	56	3	14.12	14.12	13.40	13.40	0.72	0.72	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00020	0.00020	68.0
12	13.8	13.8	24.8	24.8	109	109	100	100	9	26.09	26.09	23.93	23.93	2.15	2.15	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.00043	0.00043	56.0
13	13.8	13.8	37.3	37.3	180	180	165	165	15	43.08	43.08	39.49	39.49	3.59	3.59	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122	0.00080	0.00080	49.3
14	13.8	13.8	49.7	49.7	228	228	208	208	20	54.56	54.56	49.78	49.78	4.79	4.79	0.175	0.175	0.176	0.176	0.176	0.176	0.176	0.176	0.00115	0.00115	43.2
15	13.8	13.8	62	62	275	275	248	248	27	65.81	65.81	59.35	59.35	6.46	6.46	0.199	0.199	0.199	0.199	0.199	0.199	0.199	0.199	0.00131	0.00131	45.4

Datos de humedad al inicio del ensayo	
# recipiente	25
Masa recipiente (g)	109.05
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1190.78
Masa recipiente + muestra seca (g)	843.23
Masa del agua (g)	347.55
Masa material seco (g)	734.18
Masa material húmedo (g)	1081.73
Humedad (%)	47.34

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	25
Masa recipiente (g)	109.05
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1189.61
Masa recipiente + muestra seca (g)	843.23
Masa del agua (g)	346.38
Masa material seco (g)	734.18
Masa material húmedo (g)	1080.56
Humedad (%)	47.18



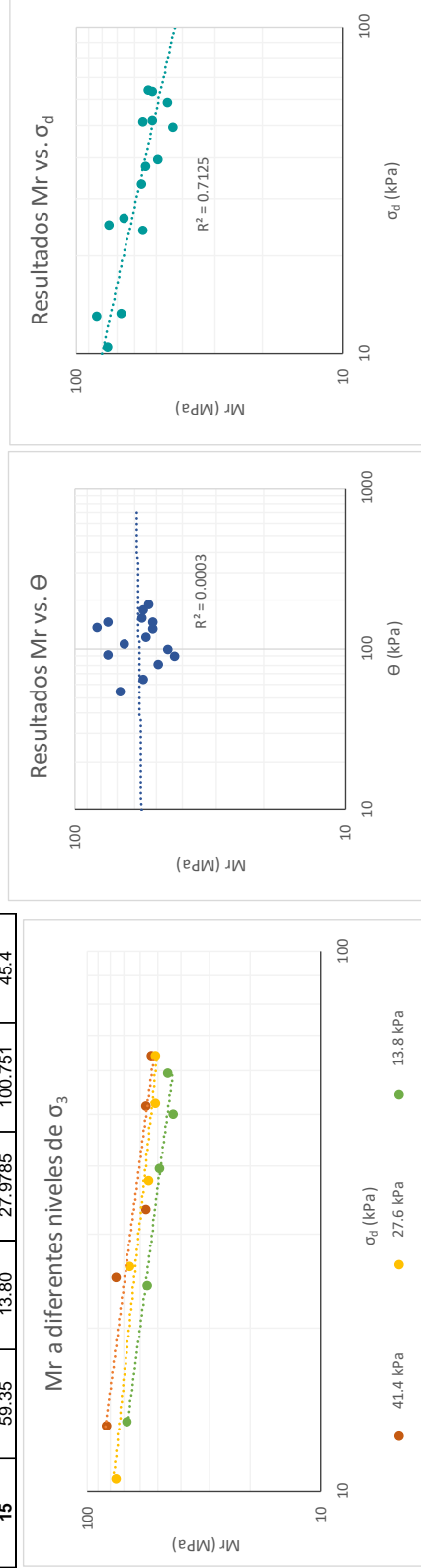
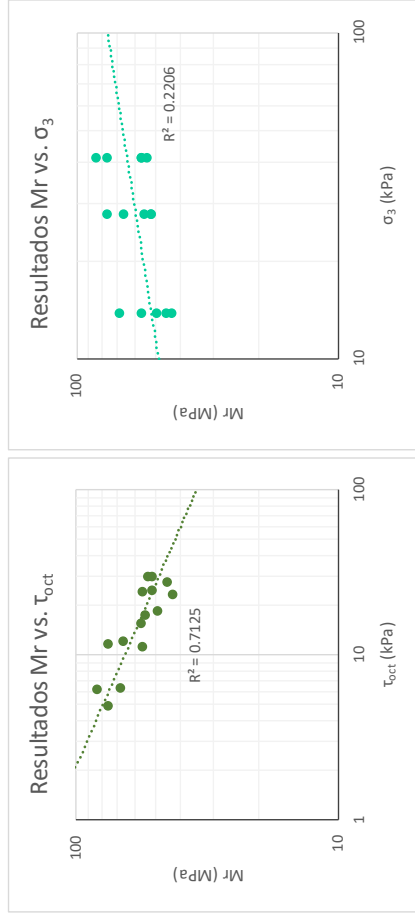
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK 45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
Profundidad (m):	1.20 - 1.40		

Ecuaciones					
$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d$ $\theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$					
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	Mr (MPa)
1	13.16	41.40	6.2049	137.363	83.5
2	24.89	41.40	11.7329	149.089	75.8
3	33.27	41.40	15.6815	157.465	56.6
4	51.69	41.40	24.3683	175.893	56.2
5	64.14	41.40	30.2348	188.338	53.3
6	10.53	27.60	4.9639	93.330	76.3
7	26.09	27.60	12.2970	108.886	66.2
8	37.57	27.60	17.7122	120.373	55.0
9	52.17	27.60	24.5940	134.972	51.7
10	63.90	27.60	30.1220	146.698	51.6
11	13.40	13.80	6.3177	54.802	68.0
12	23.93	13.80	11.2816	65.332	56.0
13	39.49	13.80	18.6147	80.888	49.3
14	49.78	13.80	23.4658	91.179	43.2
15	59.35	13.80	27.9785	100.751	45.4

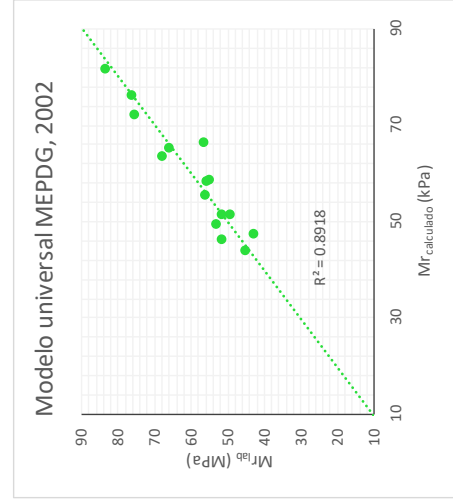
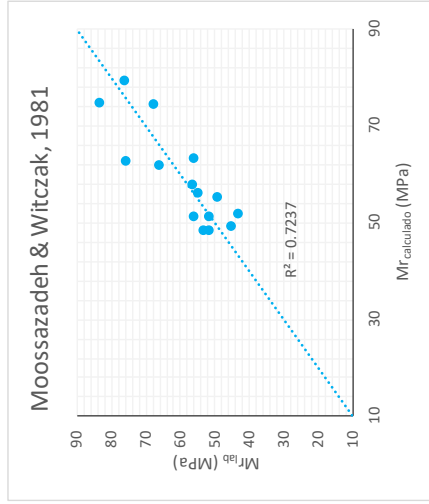




ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13




Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
Profundidad (m):	1.20 - 1.40		




Ciclo	Moossazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	$M_{r_{lab}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)	$M_{r_{lab}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)
1	83.5	74.853	8.6	74.4	83.5	81.694	1.8	3.2
2	75.8	62.850	12.9	166.9	75.8	72.183	3.6	12.9
3	56.6	58.042	-1.5	2.2	56.6	66.289	-9.7	94.4
4	56.2	51.430	4.8	22.8	56.2	55.444	0.8	0.6
5	53.3	48.475	4.9	23.7	53.3	49.450	3.9	15.2
6	76.3	79.579	-3.3	10.6	76.3	76.130	0.2	0.0
7	66.2	62.045	4.1	17.1	66.2	65.360	0.8	0.7
8	55.0	56.134	-1.1	1.3	55.0	58.642	-3.7	13.3
9	51.7	51.300	0.4	0.2	51.7	51.351	0.4	0.1
10	51.6	48.524	3.1	9.4	51.6	46.341	5.3	27.6
11	68.0	74.484	-6.5	42.1	68.0	63.557	4.4	19.7
12	56.0	63.530	-7.5	56.1	56.0	58.450	-2.4	5.8
13	49.3	55.374	-6.1	37.3	49.3	51.530	-2.3	5.1
14	43.2	51.965	-8.8	77.3	43.2	47.420	-4.2	18.0
15	45.4	49.517	-4.1	17.0	45.4	43.927	1.5	2.2
	Σ		Σ	558.3			Σ	218.8

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_3} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

k_1	42.681	k_1	0.879
k_2	-0.274	k_2	0.270
P_a (kPa)	102	k_3	-2.928
		P_a (kPa)	102

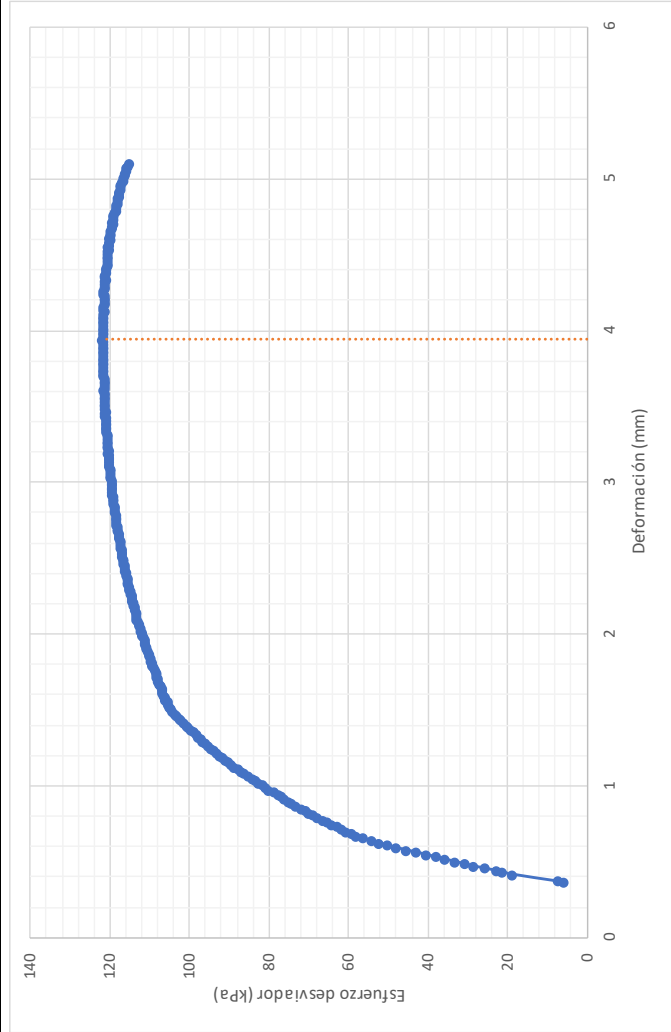


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

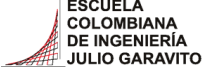



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
Profundidad (m):	1.20 - 1.40		

Prueba rápida de corte



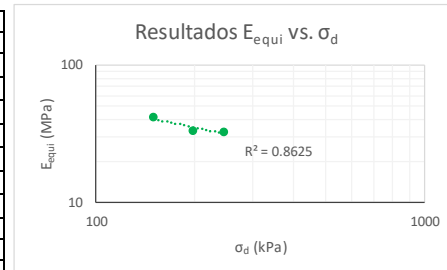
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.152
Máximo esfuerzo (kPa)	122.05
Máxima deformación (mm)	3.942
Máxima deformación (%)	2.59

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

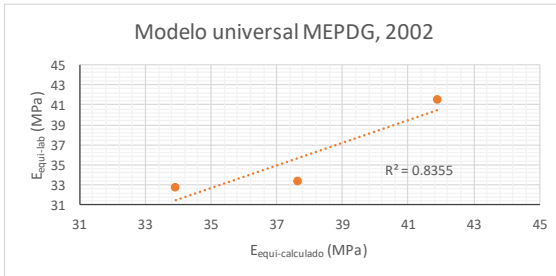
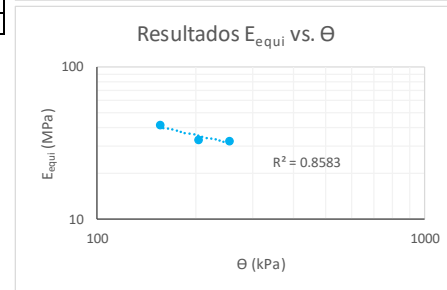
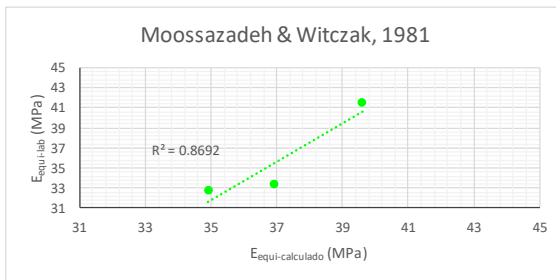
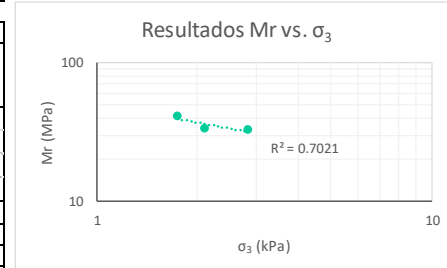
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

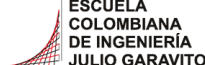

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	47
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo		1	2	3
Penetración objetivo (mm)		0.668	1.270	2.553
Carga máxima pistón (kg)	P_{max}	34.359	41.468	55.686
Carga cíclica pistón (kg)	P_{cíclico}	29.62	39.098	48.577
Carga de contacto pistón (kg)	P_{contacto}	4.739	2.370	7.109
Esfuerzo máximo pistón (kPa)	σ₁	0.174	0.210	0.282
Esfuerzo desviador pistón (MPa)	σ_d	0.150	0.198	0.246
Esfuerzo confinamiento (MPa)	σ₃	0.002	0.002	0.003
Cortante octaédrico (MPa)	τ_{oct}	0.071	0.093	0.116
Invariante de esfuerzos (MPa)	θ	0.155	0.204	0.255
Deformación elástica (mm)	u	0.082	0.134	0.169
Módulo equivalente (MPa)	E_{equi}	41.5	33.4	32.7

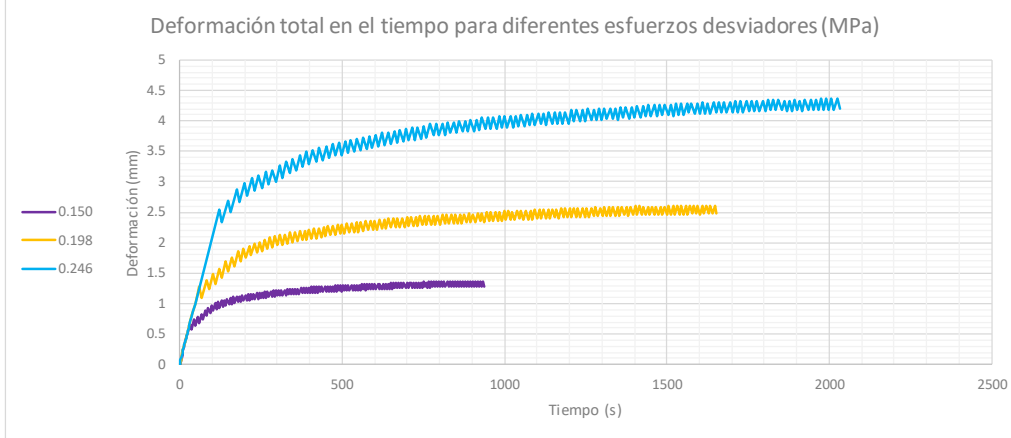


Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
k₁	43.681		k₁	0.829	
k₂	-0.254		k₂	0.321	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-1.589	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
41.5	39.60	3.7	41.5	41.89	0.1
33.4	36.90	12.4	33.4	37.62	17.9
32.7	34.92	4.7	32.7	33.91	1.4
	Σ	20.8		Σ	19.5





 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I		
Fecha exploración:	Julio 19 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
		Profundidad (m):	1.20 - 1.40

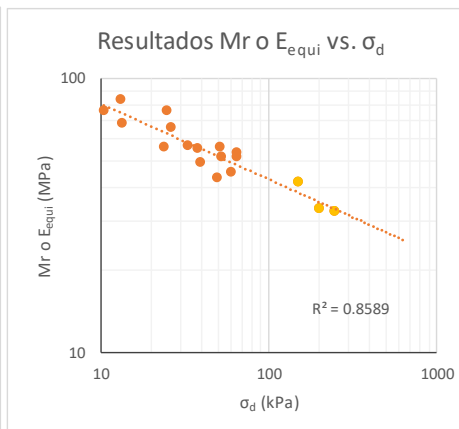
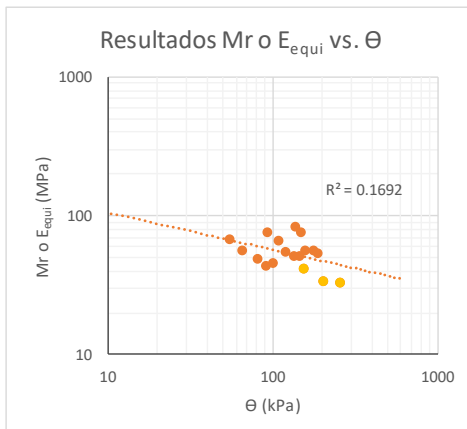
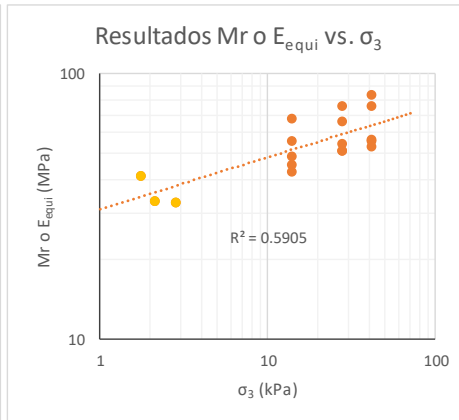
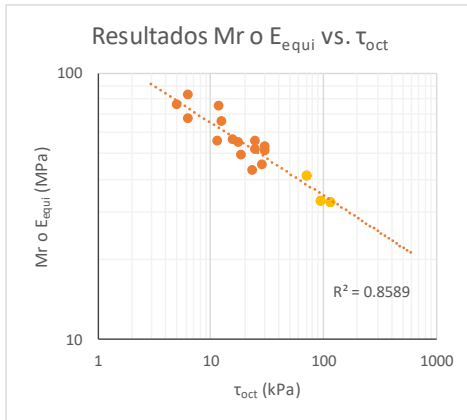




Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color amarillo con tonalidades grises con presencia importante de raíces
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, frente al bloque I
Fecha exploración	Julio 19 de 2019
Fecha ensayos:	Julio 22 a 27 de 2019
Profundidad (m):	1.20 - 1.40

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	13.88	13.16	41.40	6.20	137.36	0.00016	83.48
	2	27.28	24.89	41.40	11.73	149.09	0.00033	75.77
	3	36.86	33.27	41.40	15.68	157.47	0.00059	56.57
	4	56.48	51.69	41.40	24.37	175.89	0.00092	56.20
	5	70.36	64.14	41.40	30.23	188.34	0.00120	53.35
	6	11.49	10.53	27.60	4.96	93.33	0.00014	76.32
	7	28.48	26.09	27.60	12.30	108.89	0.00039	66.18
	8	41.16	37.57	27.60	17.71	120.37	0.00068	54.99
	9	57.20	52.17	27.60	24.59	134.97	0.00101	51.73
	10	70.36	63.90	27.60	30.12	146.70	0.00124	51.60
	11	14.12	13.40	13.80	6.32	54.80	0.00020	68.00
	12	26.09	23.93	13.80	11.28	65.33	0.00043	56.04
	13	43.08	39.49	13.80	18.61	80.89	0.00080	49.27
	14	54.56	49.78	13.80	23.47	91.18	0.00115	43.17
	15	65.81	59.35	13.80	27.98	100.75	0.00131	45.40
cCBR	16	174.16	150.14	1.74	70.78	155.37	-	41.51
	17	210.20	198.18	2.10	93.43	204.49	-	33.38
	18	282.27	246.23	2.82	116.08	254.70	-	32.75



	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 color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki				
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019	Profundidad (m):	1.00 - 1.20



1. Determinación del contenido de humedad

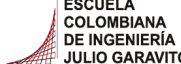

Masa del recipiente (g)	106.59
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	252.8
Masa recipiente + suelo seco (g)	197.18
Contenido de humedad (%)	61.4

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	178.4
Masa de la muestra parafinada (g)	182.5
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	66.9
Temperatura del agua (°)	16
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99895
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	111.31

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	178.4
Volumen de la muestra (cm ³)	111.31
Densidad de la muestra (gr/cm ³)	1.60
Peso unitario de la muestra (kN/m³)	15.72

	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 color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki				
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019	Profundidad (m):	1.00 - 1.20

4. Calibración del picnómetro

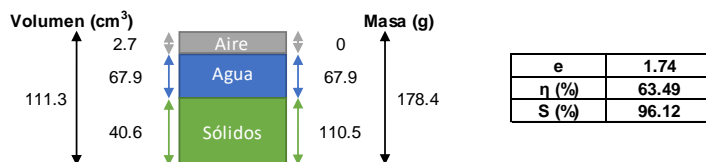
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	143.00	641.30	23.4	0.99745	499.57
2	143.00	641.42	21.4	0.99791	499.46
3	143.00	642.01	16.6	0.99885	499.58
4	143.00	642.01	16.4	0.99888	499.57
5	143.00	641.99	16.8	0.99881	499.58
Prom	143.00	641.75			499.56
Desv.	0.00	0.36			0.05

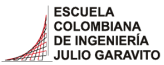

*Calibración realizada en agosto de 2018

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	51
Temperatura de ensayo (°C)	18.2
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99856
Masa picnómetro vacío (g)	143.00
Volumen picnómetro (cm ³)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	641.84
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	674.1
Gravedad específica sin corregir	2.72
Factor de corrección	1.00035
Gravedad específica corregida	2.72

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Okí Doki		
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019
		Profundidad (m):	1.00 - 1.20

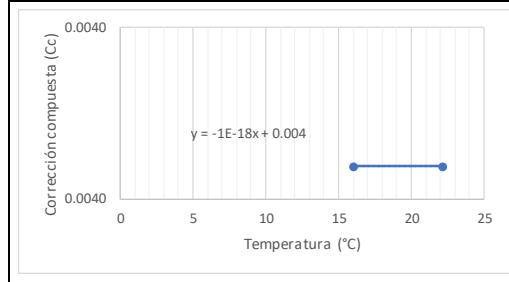
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	7.41
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	22.41
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	22.3
Masa del agua (g)	0.11
Masa material seco (g)	14.89
Humedad higroscópica (%)	0.7
Factor corrección Ch	0.9927

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H
----------------------	------

Rango de temperaturas (°C)	16	22.2
Lectura en solución de hexametáfosfato	1.0040	1.0040
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0040



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.1
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	49.7
Gravedad específica del suelo - G _s	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	3180

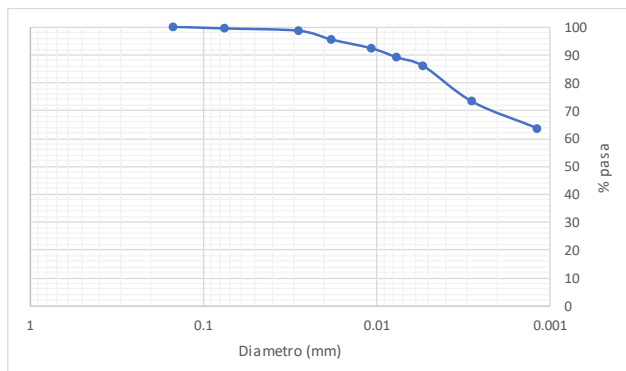
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	8:40
--	------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
8:42	2	1.035	16.2	0.0040	1.031	98.57	0.01402	8.1	0.0282
8:45	5	1.034	16.2	0.0040	1.030	95.39	0.01402	8.4	0.0182
8:55	15	1.033	16.2	0.0040	1.029	92.21	0.01402	8.6	0.0106
9:10	30	1.032	16.8	0.0040	1.028	89.03	0.01402	8.9	0.0076
9:40	60	1.031	18.4	0.0040	1.027	85.85	0.01367	9.2	0.0054
12:57	250	1.027	17.8	0.0040	1.023	73.14	0.01384	10.2	0.0028
10:15	1535	1.024	17.8	0.0040	1.020	63.60	0.01384	11.0	0.0012

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

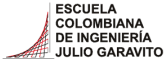

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	49.7
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	0.3
% Retenido en tamiz No 200	0.6
% Pasa el tamiz No 200	99.4

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	W _{RETENIDO} (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.0	0.0	100.0	0.0
2.000	No 10	0.0	0.0	100.0	0.0
0.850	No 20	0.0	0.0	100.0	0.0
0.425	No 40	0.0	0.0	100.0	0.0
0.150	No 100	0.0	0.0	100.0	0.0
0.075	No 200	0.3	0.6	99.4	0.6



Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	0
Fina	0.425 - 0.075	1
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	99

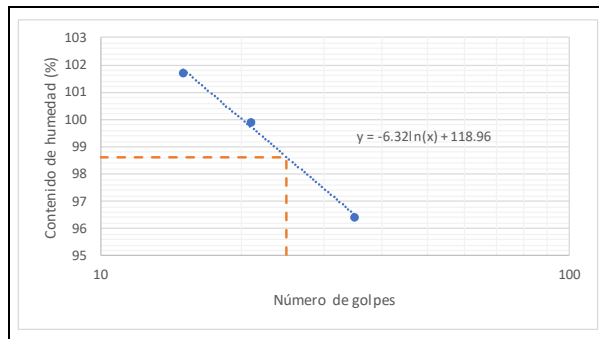
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	1
Finos	< 0.075	99

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki		
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019
		Profundidad (m):	1.00 - 1.20

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	70	64	12
Masa del recipiente (g)	11.266	10.99	9.547
No. Golpes	15	21	35
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	22.385	17.783	17.205
Masa recipiente + suelo seco (g)	16.778	14.388	13.446
Contenido de humedad (%)	102	100	96



LL (%)	99
---------------	-----------

2. Determinación límite plástico

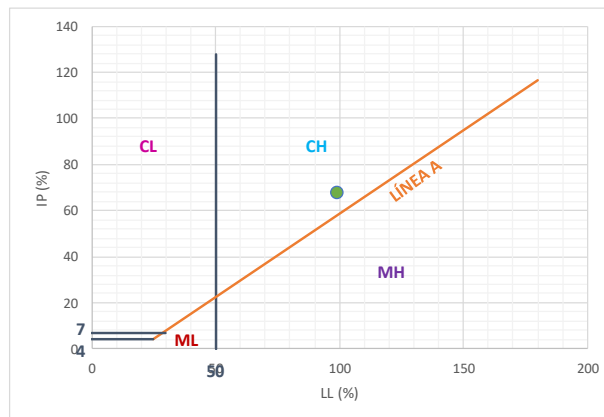
Ensayo	1	2
Número recipiente	62	66
Masa del recipiente (g)	10.941	11.163
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	17.84	17.532
Masa recipiente + suelo seco (g)	16.271	16.01
Contenido de humedad (%)	29	31

LP (%)	30
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	68
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	CH
---------------------------	-----------

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13	
---	--	---

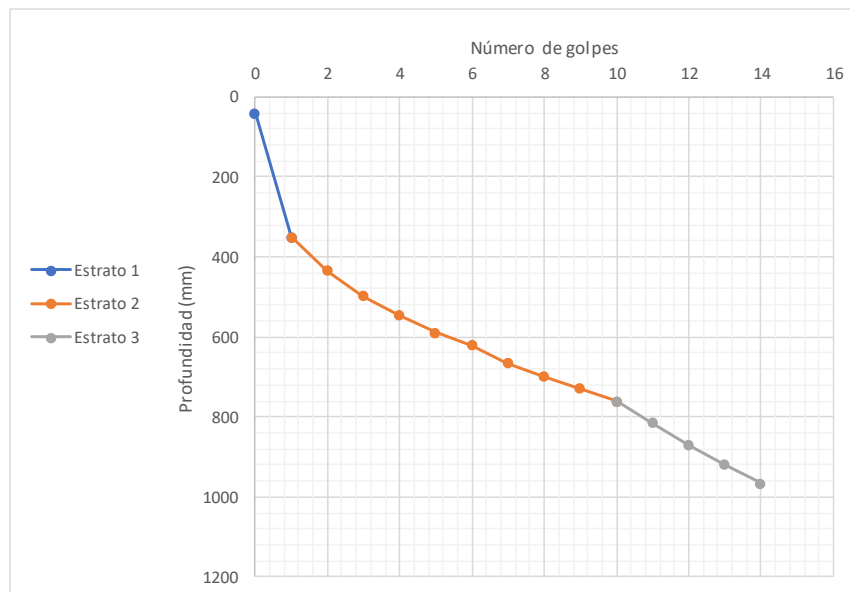
Procedencia:	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

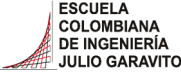

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	40	-	-	-	-
1	350	310	310	1	310
1	435	85	85	1	85
1	497	62	62	1	62
1	547	50	50	1	50
1	590	43	43	1	43
1	620	30	30	1	30
1	665	45	45	1	45
1	700	35	35	1	35
1	730	30	30	1	30
1	760	30	30	1	30
1	815	55	55	1	55
1	870	55	55	1	55
1	919	49	49	1	49
1	966	47	47	1	47

*El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestras

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	310	350
2	40	410
3	50	206



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	310
--	------------

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13</p>	
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki		
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019
		Profundidad (m):	1.00 - 1.20

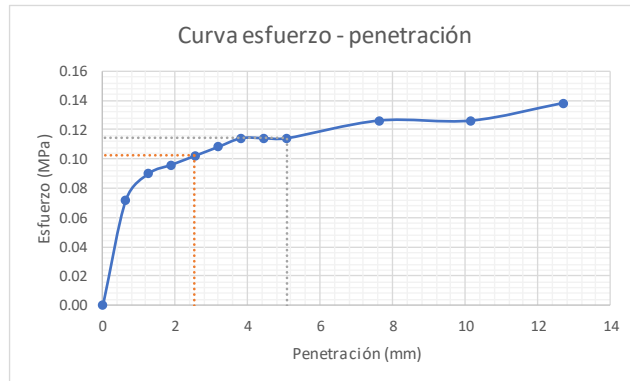
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

Humedad natural	
# recipiente	38
Masa recipiente (g)	119.81
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	723.28
Masa recipiente + muestra seca (g)	496.5
Contenido de humedad (%)	60.2



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	14.22	0.07
0.050	1.270	17.77	0.09
0.075	1.905	18.96	0.10
0.100	2.540	20.14	0.10
0.125	3.175	21.33	0.11
0.150	3.810	22.51	0.11
0.175	4.445	22.51	0.11
0.200	5.080	22.51	0.11
0.300	7.620	24.88	0.13
0.400	10.160	24.88	0.13
0.500	12.700	27.25	0.14

Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.10
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.11
CBR _{2,54} (%)	1.48
CBR _{5,08} (%)	1.10
CBR sin inmersión (%)	1.5

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

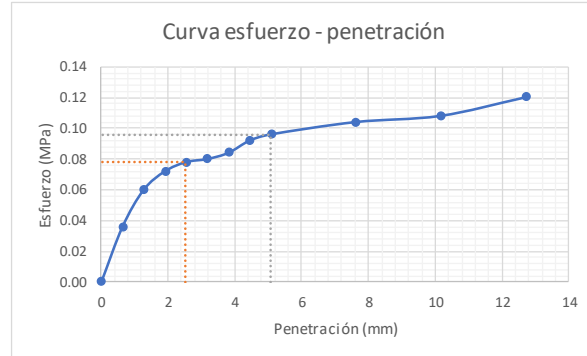
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki				
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019	Profundidad (m):	1.00 - 1.20

ENSAYO CON INMERSIÓN

Humedad inicial	
# recipiente	38
Masa recipiente (g)	119.81
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	723.28
Masa recipiente + muestra seca (g)	496.5
Contenido de humedad (%)	60.2


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	7.109	0.04
0.050	1.270	11.848	0.06
0.075	1.905	14.218	0.07
0.100	2.540	15.403	0.08
0.125	3.175	15.797	0.08
0.150	3.810	16.587	0.08
0.175	4.445	18.167	0.09
0.200	5.080	18.957	0.10
0.300	7.620	20.536	0.10
0.400	10.160	21.326	0.11
0.500	12.700	23.696	0.12




Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.08
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.10
CBR _{2,54} (%)	1.13
CBR _{5,08} (%)	0.93
CBR con inmersión (%)	1.1

Humedad final	
# recipiente	-
Masa recipiente (g)	-
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	-
Masa recipiente + muestra seca (g)	-
Contenido de humedad (%)	N/A



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



CENTRO DE ESTUDIOS GEOTECNICOS

ESCUOLA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces	
Procedencia (Localización):	AK-45 No.205-59 (Autopista Norte), E.CI. costado norte casa Oki Doki	
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos: Julio 27 a 31 de 2019
		Profundidad (m): 1.00 - 1.20

Área (mm²)	4148.20
Volumen (cm³)	616.37
Masa húmeda muestra (g)	1021.65
Densidad húmeda aprox. (g/cm³)	1.66

Datos de la muestra antes del ensayo				
Dato	1	2	3	4
Altura (mm)	148.71	148.61	148.63	148.4
Diámetro (mm)	72.89	72.67	72.7	72.44
				Prom (mm)
				148.59
				72.68

Ciclo	Presión de cámara (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)	Esfuerzo de contacto real (kPa)	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	Deformación resiliente prom (mm)	Deformación resiliente unitaria ϵ_r	Módulo resiliente (MPa)
	S_3	$S_{ciclico}$												
0	41.4	24.8	110	100	10	26.52	24.11	2.41	2.41	0.054	0.055	0.055	0.00037	65.7
1	41.4	12.4	52	48	4	12.54	11.57	0.96	0.96	0.027	0.026	0.027	0.00018	64.9
2	41.4	24.8	110	101	9	26.52	24.35	2.17	2.17	0.074	0.074	0.074	0.00050	48.9
3	41.4	37.3	185	170	15	44.60	40.98	3.62	3.62	0.145	0.145	0.145	0.00098	42.0
4	41.4	49.7	211	191	20	50.87	46.04	4.82	4.82	0.177	0.176	0.177	0.00119	38.8
5	41.4	62	263	237	26	63.40	57.13	6.27	6.27	0.236	0.235	0.236	0.00158	36.0
6	27.6	12.4	56	52	4	13.50	12.54	0.96	0.96	0.034	0.034	0.034	0.00023	54.8
7	27.6	24.8	100	92	8	24.11	22.18	1.93	1.93	0.064	0.063	0.064	0.00043	51.9
8	27.6	37.3	173	157	16	41.70	37.85	3.86	3.86	0.118	0.120	0.119	0.00080	47.3
9	27.6	49.7	231	211	20	55.69	50.87	4.82	4.82	0.176	0.177	0.177	0.00119	42.8
10	27.6	62	266	239	27	64.12	57.62	6.51	6.51	0.216	0.218	0.217	0.00146	39.5
11	13.8	12.4	47	43	4	11.33	10.37	0.96	0.96	0.028	0.028	0.028	0.00019	55.0
12	13.8	24.8	108	98	10	26.04	23.62	2.41	2.41	0.072	0.072	0.072	0.00048	48.8
13	13.8	37.3	172	157	15	41.46	37.85	3.62	3.62	0.119	0.119	0.119	0.00080	47.3
14	13.8	49.7	229	209	20	55.20	50.38	4.82	4.82	0.199	0.199	0.199	0.00134	37.6
15	13.8	62	262	236	26	63.16	56.89	6.27	6.27	0.259	0.258	0.259	0.00174	32.7

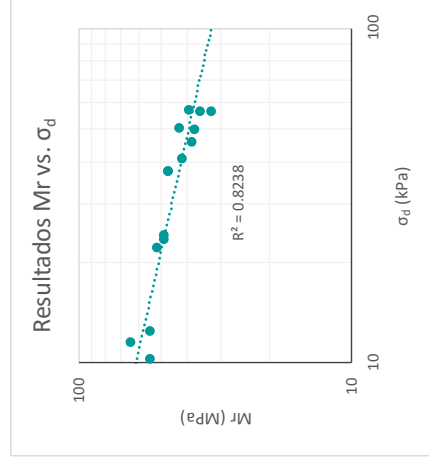
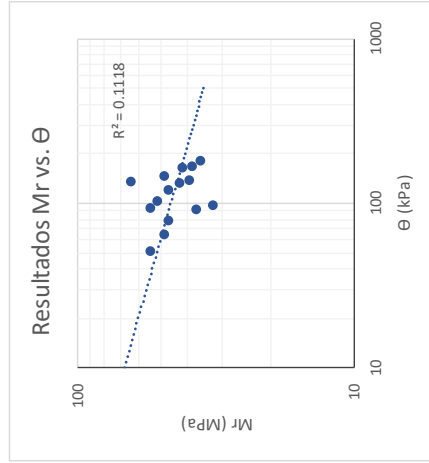
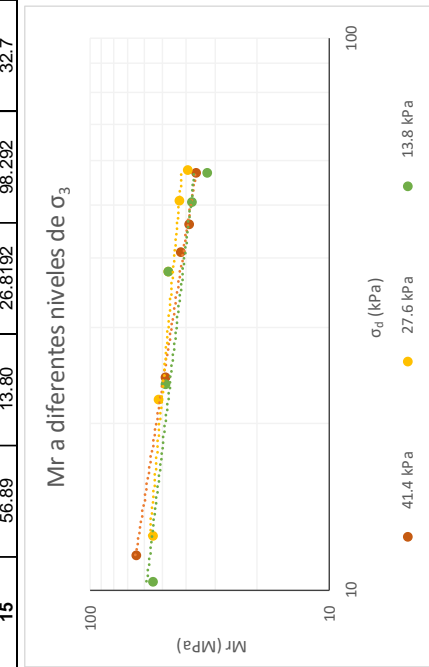
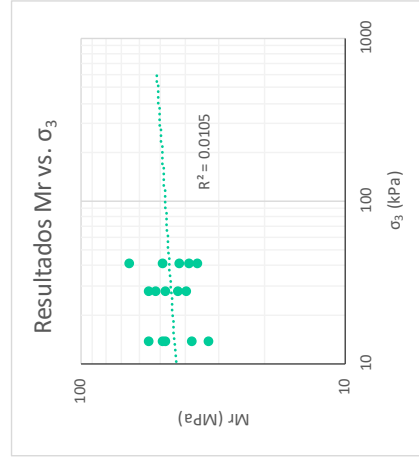
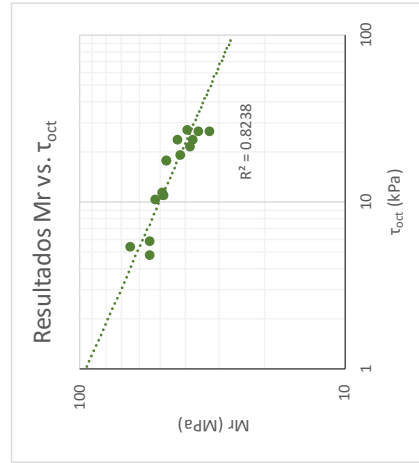
Datos de humedad al inicio del ensayo	
# recipiente	E11
Masa recipiente (g)	115.3
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1136.95
Masa recipiente + muestra seca (g)	750.79
Masa del agua (g)	386.16
Masa material seco (g)	635.49
Masa material húmedo (g)	1021.65
Humedad (%)	60.77

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	E11
Masa recipiente (g)	115.3
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1136.95
Masa recipiente + muestra seca (g)	750.79
Masa del agua (g)	386.16
Masa material seco (g)	635.49
Masa material húmedo (g)	1021.65
Humedad (%)	60.77



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillentas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK-45 No. 205-69 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki		
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019
Profundidad (m):	1.00 - 1.20		

Ciclo	$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d$			$\theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$		
	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Mr (MPa)
1	11.57	41.40	5.4548	135.771	64.9	64.9
2	24.35	41.40	11.4777	148.548	48.9	48.9
3	40.98	41.40	19.3189	165.182	42.0	42.0
4	46.04	41.40	21.7054	170.244	38.8	38.8
5	57.13	41.40	26.9328	181.333	36.0	36.0
6	12.54	27.60	5.9093	95.336	54.8	54.8
7	22.18	27.60	10.4549	104.978	51.9	51.9
8	37.85	27.60	17.8416	120.648	47.3	47.3
9	50.87	27.60	23.9782	133.665	42.8	42.8
10	57.62	27.60	27.1601	140.415	39.5	39.5
11	10.37	13.80	4.8865	51.766	55.0	55.0
12	23.62	13.80	11.1368	65.025	48.8	48.8
13	37.85	13.80	17.8416	79.248	47.3	47.3
14	50.38	13.80	23.7509	91.783	37.6	37.6
15	56.89	13.80	26.8192	98.292	32.7	32.7

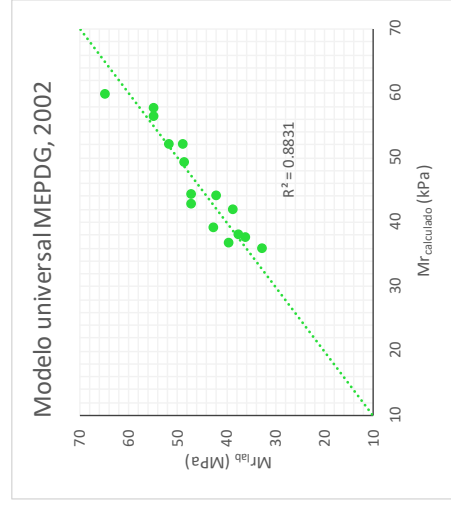
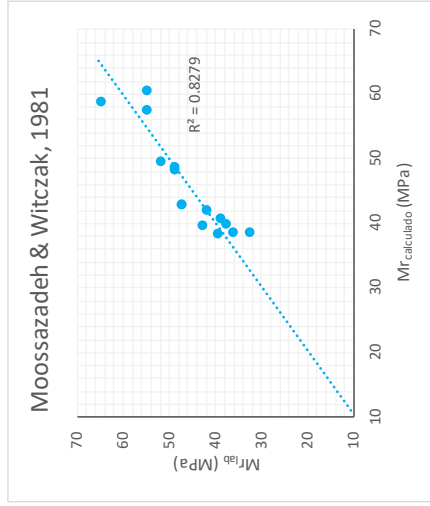




ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK-45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Profundidad (m):	1.00 - 1.20




Ciclo	Moossazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	Mr _{lab} (MPa)	Mr _{cal} (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)	Mr _{lab} (MPa)	Mr _{cal} (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)
1	64.9	58.863	6.0	36.2	64.9	59.940	4.9	24.4
2	48.9	48.360	0.5	0.3	48.9	52.174	-3.3	10.8
3	42.0	42.145	-0.1	0.0	42.0	44.003	-2.0	4.0
4	38.8	40.867	-2.1	4.4	38.8	41.869	-3.1	9.7
5	36.0	38.603	-2.6	6.5	36.0	37.669	-1.6	2.6
6	54.8	57.631	-2.8	8.1	54.8	57.628	-2.8	8.1
7	51.9	49.567	2.3	5.4	51.9	52.001	-0.1	0.0
8	47.3	43.040	4.2	17.8	47.3	44.350	2.9	8.5
9	42.8	39.806	3.0	9.1	42.8	39.121	3.7	13.7
10	39.5	38.517	0.9	0.9	39.5	36.739	2.7	7.4
11	55.0	60.599	-5.6	31.2	55.0	56.319	-1.3	1.7
12	48.8	48.747	0.0	0.0	48.8	49.259	-0.5	0.3
13	47.3	43.040	4.2	17.8	47.3	42.896	4.4	19.0
14	37.6	39.906	-2.3	5.2	37.6	38.155	-0.5	0.3
15	32.7	38.646	-5.9	35.3	32.7	35.967	-3.3	10.7
			Σ	178.4			Σ	121.1


$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$$

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

k₁	33.122	k₁	0.660
k₂	-0.264	k₂	0.079
P_a (kPa)	102	k₃	-2.675
		P_a (kPa)	102



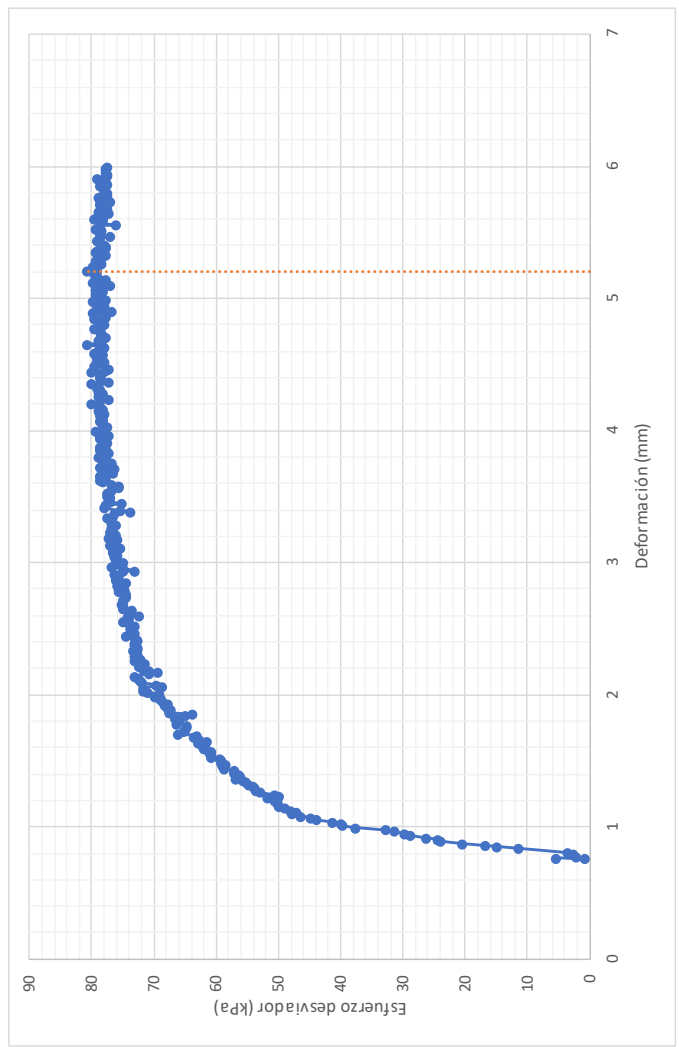
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



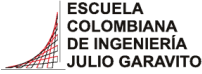

CENTRO DE ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK. 45 No. 205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki		
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019
		Profundidad (m):	1.00 - 1.20

Prueba rápida de corte



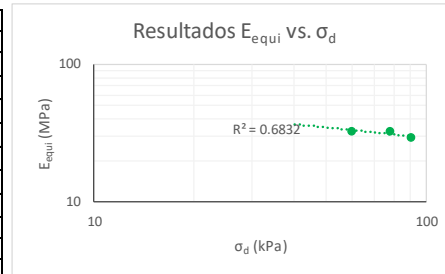
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.149
Máximo esfuerzo (kPa)	80.79
Máxima deformación (mm)	5.203
Máxima deformación (%)	3.502

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

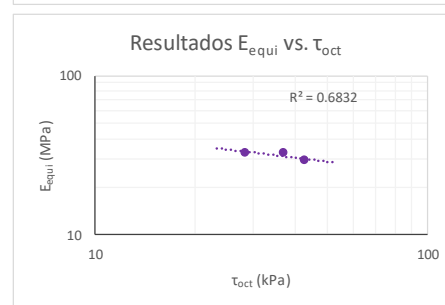
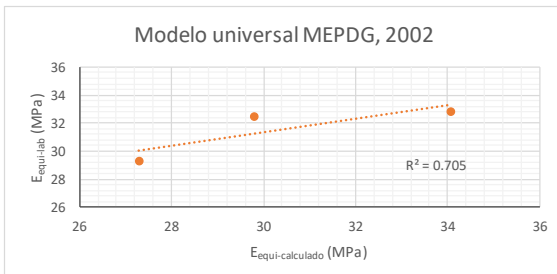
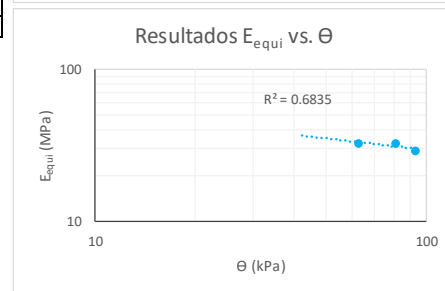
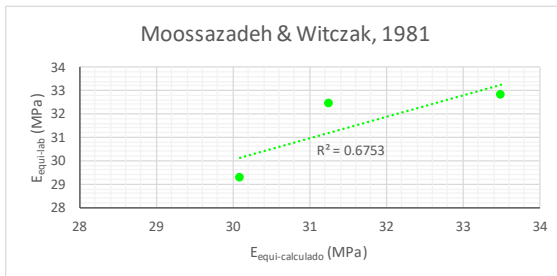
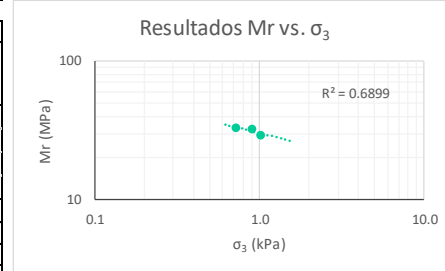
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki		
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019
		Profundidad (m):	1.00 - 1.20

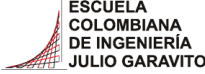

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	61
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.556	1.444	2.539
Carga máxima pistón (kg)	P_{max} 14.218	17.772	20.142
Carga cíclica pistón (kg)	P_{cíclico} 11.848	15.402	17.772
Carga de contacto pistón (kg)	P_{contacto} 2.370	2.370	2.370
Esfuerzo máximo pistón (kPa)	σ₁ 0.072	0.090	0.102
Esfuerzo desviador pistón (MPa)	σ_d 0.060	0.078	0.090
Esfuerzo confinamiento (MPa)	σ₃ 0.001	0.001	0.001
Cortante octaédrico (MPa)	τ_{oct} 0.028	0.037	0.042
Invariante de esfuerzos (MPa)	θ 0.062	0.081	0.093
Deformación elástica (mm)	u 0.042	0.055	0.070
Módulo equivalente (MPa)	E_{equi} 32.8	32.5	29.3

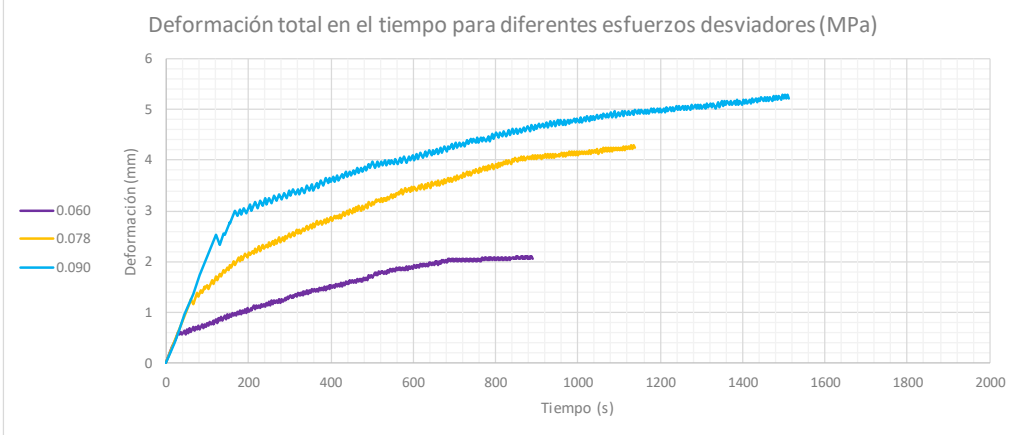


Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
k₁	29.122		k₁	0.679	
k₂	-0.264		k₂	0.126	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-2.642	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
32.8	33.49	0.4	32.8	34.07	1.5
32.5	31.25	1.4	32.5	29.80	7.1
29.3	30.09	0.6	29.3	27.30	4.1
	Σ	2.5		Σ	12.6

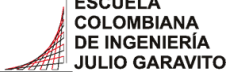



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki				
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019	Profundidad (m):	1.00 - 1.20

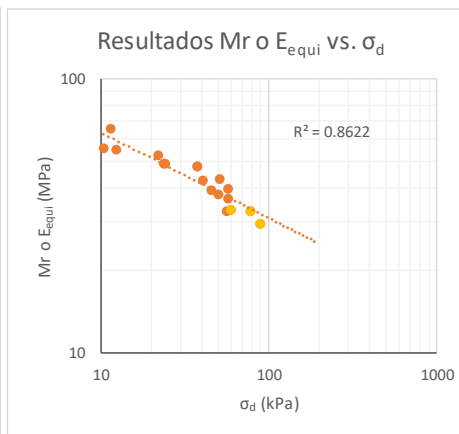
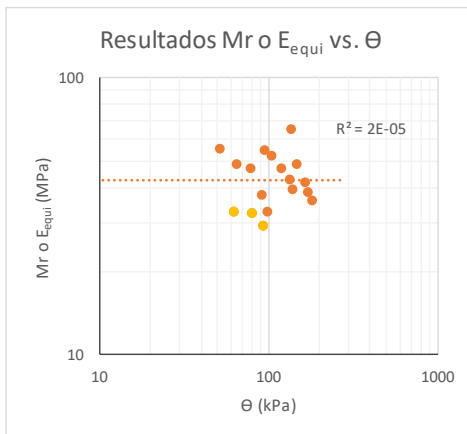
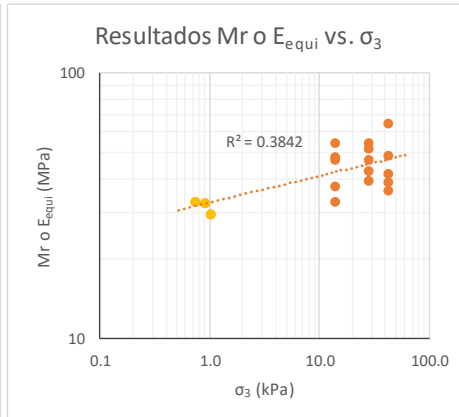
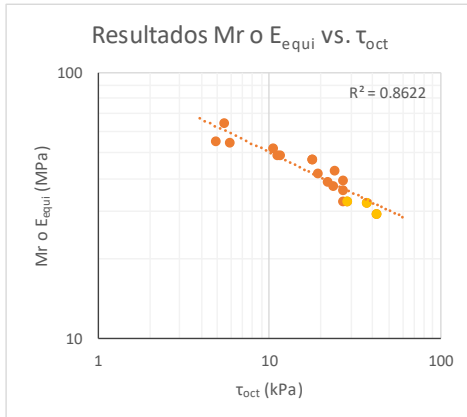


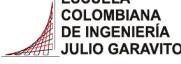

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)
<p style="text-align: center;">Carga (kg) vs Deformación (mm) for 0.060 MPa</p>	<p style="text-align: center;">Deformaciones vs Ciclo for 0.060 MPa</p>
<p style="text-align: center;">Carga (kg) vs Deformación (mm) for 0.078 MPa</p>	<p style="text-align: center;">Deformaciones vs Ciclo for 0.078 MPa</p>
<p style="text-align: center;">Carga (kg) vs Deformación (mm) for 0.090 MPa</p>	<p style="text-align: center;">Deformaciones vs Ciclo for 0.090 MPa</p>

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEO TÉCNICOS</p>
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con tonalidades amarillas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, costado norte casa Oki Doki		
Fecha exploración:	Julio 26 de 2019	Fecha ensayos:	Julio 27 a 31 de 2019
		Profundidad (m):	1.00 - 1.20

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E _{equi} (MPa)
Mr	1	12.54	11.57	41.40	5.45	135.77	0.00018	64.88
	2	26.52	24.35	41.40	11.48	148.55	0.00050	48.89
	3	44.60	40.98	41.40	19.32	165.18	0.00098	42.00
	4	50.87	46.04	41.40	21.71	170.24	0.00119	38.76
	5	63.40	57.13	41.40	26.93	181.33	0.00158	36.05
	6	13.50	12.54	27.60	5.91	95.34	0.00023	54.78
	7	24.11	22.18	27.60	10.45	104.98	0.00043	51.90
	8	41.70	37.85	27.60	17.84	120.65	0.00080	47.26
	9	55.69	50.87	27.60	23.98	133.67	0.00119	42.82
	10	64.12	57.62	27.60	27.16	140.42	0.00146	39.45
	11	11.33	10.37	13.80	4.89	51.77	0.00019	55.01
	12	26.04	23.62	13.80	11.14	65.02	0.00048	48.75
	13	41.46	37.85	13.80	17.84	79.25	0.00080	47.26
	14	55.20	50.38	13.80	23.75	91.78	0.00134	37.62
	15	63.16	56.89	13.80	26.82	98.29	0.00174	32.70
cCBR	16	72.07	60.06	0.72	28.31	62.22	-	32.84
	17	90.08	78.07	0.90	36.80	80.77	-	32.46
	18	102.10	90.08	1.02	42.47	93.15	-	29.32



	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):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019	Profundidad (m):	0.80 - 1.00



1. Determinación del contenido de humedad

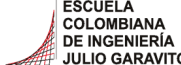

Masa del recipiente (g)	119.6
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	303.9
Masa recipiente + suelo seco (g)	232.48
Contenido de humedad (%)	63.3

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	235
Masa de la muestra parafinada (g)	246.4
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	85.9
Temperatura del agua (°)	16.4
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99888
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	148.42

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	235
Volumen de la muestra (cm ³)	148.42
Densidad de la muestra (gr/cm ³)	1.58
Peso unitario de la muestra (kN/m³)	15.53

	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 color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019	Profundidad (m):	0.80 - 1.00

4. Calibración del picnómetro

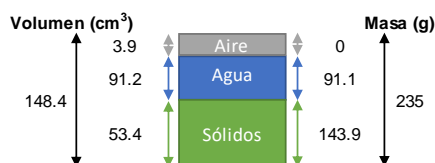
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	174.11	672.21	23.4	0.99745	499.37
2	174.12	672.32	21.4	0.99791	499.24
3	174.11	672.89	16.6	0.99885	499.35
4	174.11	672.84	16.4	0.99888	499.29
5	174.11	672.87	16.8	0.99881	499.35
Prom	174.11	672.63			499.32
Desv.	0.00	0.33			0.05

*Calibración realizada en agosto de 2018

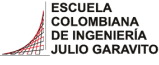

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.76
Temperatura de ensayo (°C)	16.6
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99885
Masa picnómetro vacío (g)	174.11
Volumen picnómetro (cm ³)	499.32
Masa picnómetro con agua (g)	672.86
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	704.17
Gravedad específica sin corregir	2.70
Factor de corrección	1.00064
Gravedad específica corregida	2.70

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	1.78
η (%)	64.02
S (%)	95.94

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123</p>	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	17.1
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	32.4
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	32.3
Masa del agua (g)	0.1
Masa material seco (g)	15.2
Humedad higroscópica (%)	0.7
Factor corrección Ch	0.9935

3. Análisis por hidrometría

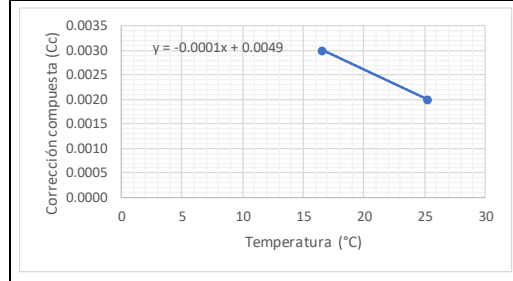
Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	49.7
Gravedad específica del suelo - G _s	2.70
Gravedad específica del agua - G ₁	1.000
$Constante A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_s}{G_s - g_1} \right]$	
A	3197

Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	8:30
--	------

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H
----------------------	------

Rango de temperaturas (°C)	16.6	25.2
Lectura en solución de hexametáfosfato	1.0030	1.0020
Corrección compuesta (Cc)	0.0030	0.0020

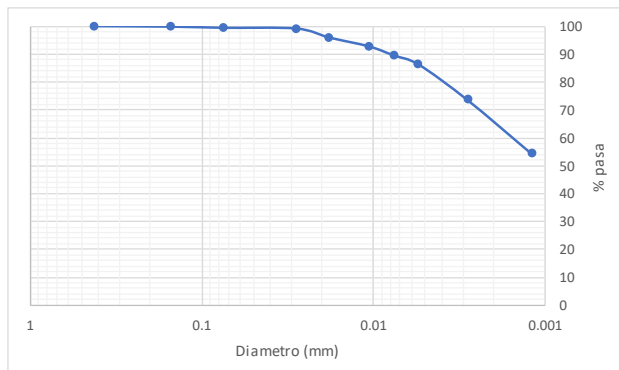


Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
8:32	2	1.034	17.1	0.0029	1.031	99.12	0.01394	8.1	0.0281
8:35	5	1.033	17.1	0.0029	1.030	95.92	0.01394	8.4	0.0181
8:45	15	1.032	17.1	0.0029	1.029	92.72	0.01394	8.6	0.0106
9:00	30	1.031	17.1	0.0029	1.028	89.53	0.01394	8.9	0.0076
9:30	60	1.030	17.4	0.0029	1.027	86.33	0.01394	9.2	0.0055
12:47	250	1.026	17.6	0.0029	1.023	73.54	0.01394	10.2	0.0028
9:30	1500	1.020	20.0	0.0026	1.017	54.36	0.01344	11.8	0.0012

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

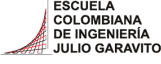

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	49.7
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	0.3
% Retenido en tamiz No 200	0.6
% Pasa el tamiz No 200	99.4

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	W _{RETENIDO} (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.0	0.0	100.0	0.0
2.000	No 10	0.0	0.0	100.0	0.0
0.850	No 20	0.0	0.0	100.0	0.0
0.425	No 40	0.0	0.0	100.0	0.0
0.150	No 100	0.1	0.2	99.8	0.2
0.075	No 200	0.2	0.4	99.4	0.6



Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	0
Fina	0.425 - 0.075	1
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	99

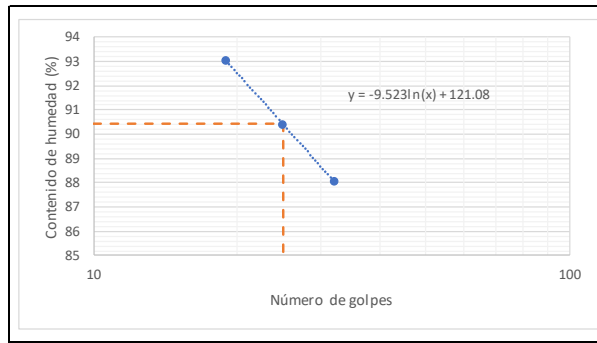
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	1
Finos	< 0.075	99

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019	Profundidad (m):	0.80 - 1.00

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	12	66	64
Masa del recipiente (g)	9.5334	11.1328	10.9701
No. Golpes	32	25	19
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	18.2485	21.1376	22.7652
Masa recipiente + suelo seco (g)	14.1668	16.3877	17.0798
Contenido de humedad (%)	88	90	93



LL (%)	90
---------------	-----------

2. Determinación límite plástico

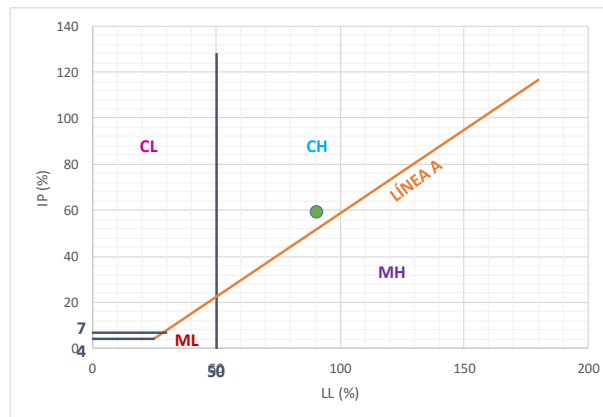
Ensayo	1	2
Número recipiente	67	62
Masa del recipiente (g)	11.3	10.938
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	16.9829	16.2464
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.683	14.9553
Contenido de humedad (%)	30	32

LP (%)	31
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	60
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	CH
---------------------------	-----------

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

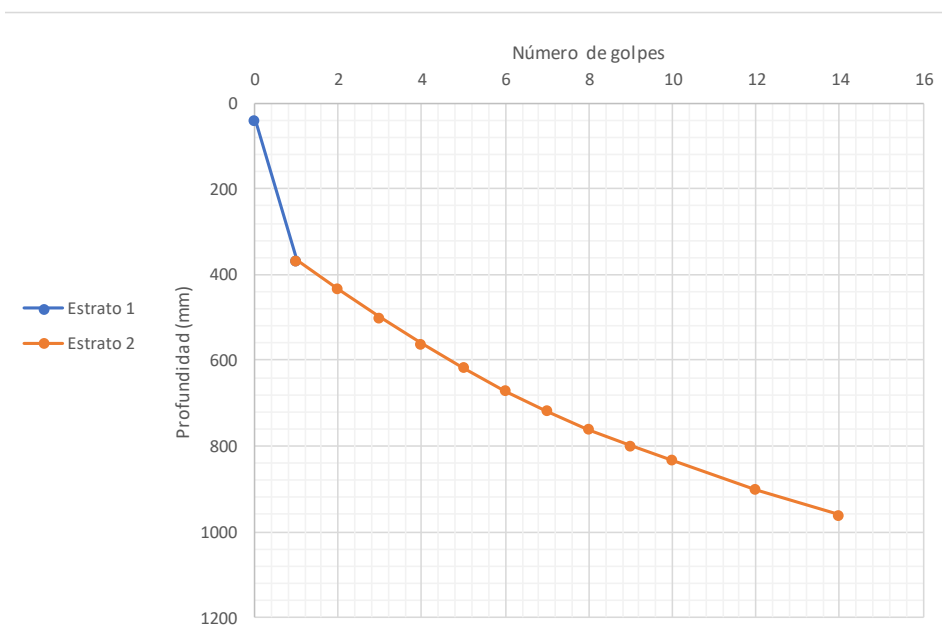
Procedencia:	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes
Fecha de exploración:	Agosto 09 de 2019

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	40	-	-	-	-
1	367	327	327	1	327
1	433	66	66	1	66
1	500	67	67	1	67
1	561	61	61	1	61
1	618	57	57	1	57
1	672	54	54	1	54
1	718	46	46	1	46
1	762	44	44	1	44
1	800	38	38	1	38
1	834	34	34	1	34
2	901	67	34	1	34
2	962	61	31	1	31

*El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestras

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	327	327
2	44	635



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	327
--	------------



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

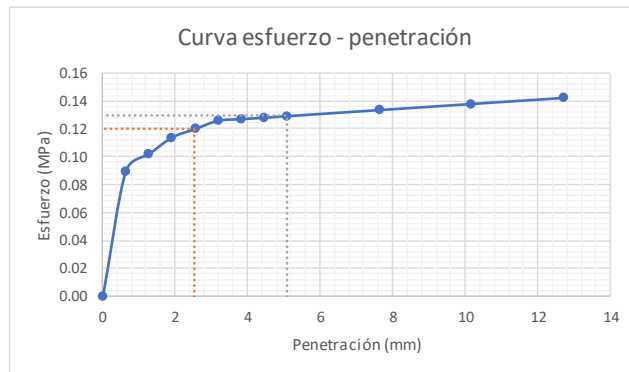
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

Humedad natural	
# recipiente	15
Masa recipiente (g)	106.61
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	483.01
Masa recipiente + muestra seca (g)	337.88
Contenido de humedad (%)	62.8

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	17.77	0.09
0.050	1.270	20.14	0.10
0.075	1.905	22.51	0.11
0.100	2.540	23.70	0.12
0.125	3.175	24.88	0.13
0.150	3.810	25.10	0.13
0.175	4.445	25.31	0.13
0.200	5.080	25.53	0.13
0.300	7.620	26.39	0.13
0.400	10.160	27.25	0.14
0.500	12.700	28.11	0.14

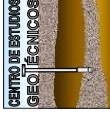
Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.12
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.13
CBR _{2,54} (%)	1.74
CBR _{5,08} (%)	1.25
CBR sin inmersión (%)	1.7



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00


Dato	Datos de la muestra antes del ensayo			
	1	2	3	4
Altura (mm)	145.91	145.58	145.68	145.81
Diámetro (mm)	72.95	72.59	73.47	73.37
				Prom (mm)
				145.75
				73.10

Área (mm ²)	4196.29
Volumen (cm ³)	611.59
Masa húmeda muestra (g)	957.6
Densidad húmeda aprox. (g/cm ³)	1.57


Ciclo	Presión de cámara (kPa)	Norma				Ensayo										Módulo resiliente (MPa)		
		S ₃	S _{cíclico}	S _{máx}	S _{cíclico}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{máx r}	Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico r}	Esfuerzo real (kPa)	S _{contacto r}	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	H ₂		Deformación resiliente promedio (mm)	H _{promedio}
0	41.4	24.8	107	98	25.50	23.35	2.14	2.14	2.14	0.070	0.073	0.072	0.00049	47.6				
1	41.4	12.4	54	49	12.87	11.68	1.19	1.19	1.19	0.034	0.036	0.035	0.00024	48.6				
2	41.4	24.8	104	94	24.78	22.40	2.38	2.38	2.38	0.072	0.075	0.074	0.00050	44.4				
3	41.4	37.3	159	144	37.89	34.32	3.57	3.57	3.57	0.135	0.141	0.138	0.00095	36.2				
4	41.4	49.7	218	197	51.95	46.95	5.00	5.00	5.00	0.201	0.208	0.205	0.00140	33.5				
5	41.4	62	271	244	64.58	58.15	6.43	6.43	6.43	0.277	0.284	0.281	0.00192	30.2				
6	27.6	12.4	40	35	9.53	8.34	1.19	1.19	1.19	0.024	0.026	0.025	0.00017	48.6				
7	27.6	24.8	103	93	24.55	22.16	2.38	2.38	2.38	0.083	0.086	0.085	0.00058	38.2				
8	27.6	37.3	156	141	37.18	33.60	3.57	3.57	3.57	0.145	0.151	0.148	0.00102	33.1				
9	27.6	49.7	232	211	55.29	50.28	5.00	5.00	5.00	0.239	0.247	0.243	0.00167	30.2				
10	27.6	62	275	249	65.53	59.34	6.20	6.20	6.20	0.277	0.286	0.282	0.00193	30.7				
11	13.8	12.4	39	36	9.29	8.58	0.71	0.71	0.71	0.028	0.029	0.029	0.00020	43.9				
12	13.8	24.8	108	98	25.74	23.35	2.38	2.38	2.38	0.083	0.087	0.085	0.00058	40.0				
13	13.8	37.3	167	151	39.80	35.98	3.81	3.81	3.81	0.140	0.145	0.143	0.00098	36.8				
14	13.8	49.7	214	193	51.00	45.99	5.00	5.00	5.00	0.202	0.210	0.206	0.00141	32.5				
15	13.8	62	260	233	61.96	55.53	6.43	6.43	6.43	0.285	0.295	0.290	0.00199	27.9				

Datos de humedad al inicio del ensayo	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	106.82
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1064.42
Masa recipiente + muestra seca (g)	694.46
Masa del agua (g)	369.96
Masa material seco (g)	587.64
Masa material húmedo (g)	957.6
Humedad (%)	62.96

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	10
Masa recipiente (g)	106.82
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1063.03
Masa recipiente + muestra seca (g)	694.46
Masa del agua (g)	368.57
Masa material seco (g)	587.64
Masa material húmedo (g)	956.21
Humedad (%)	62.72



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



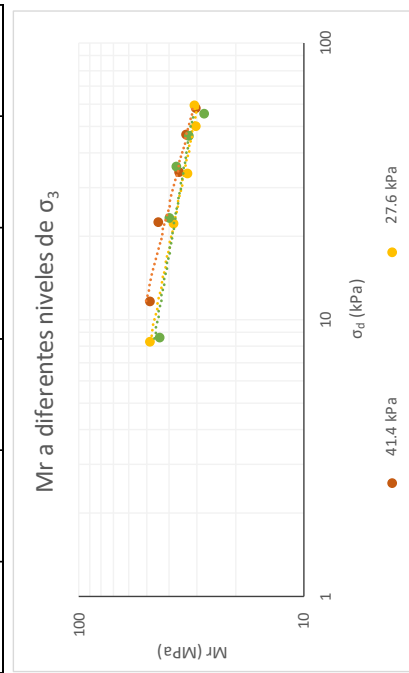
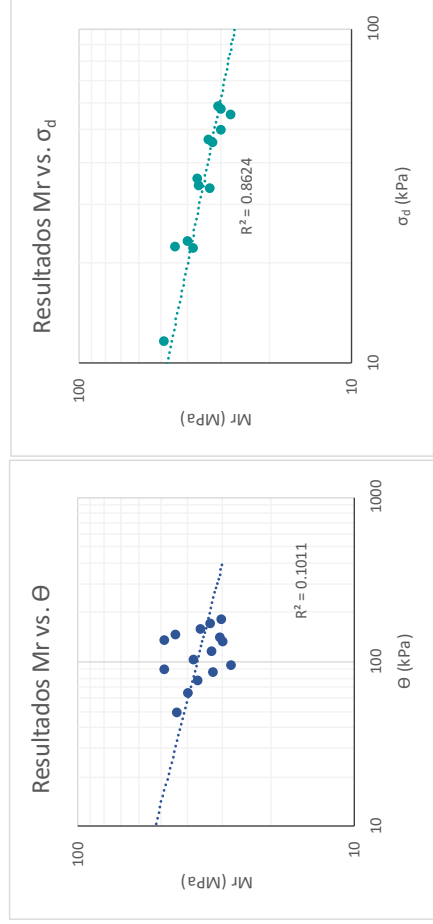
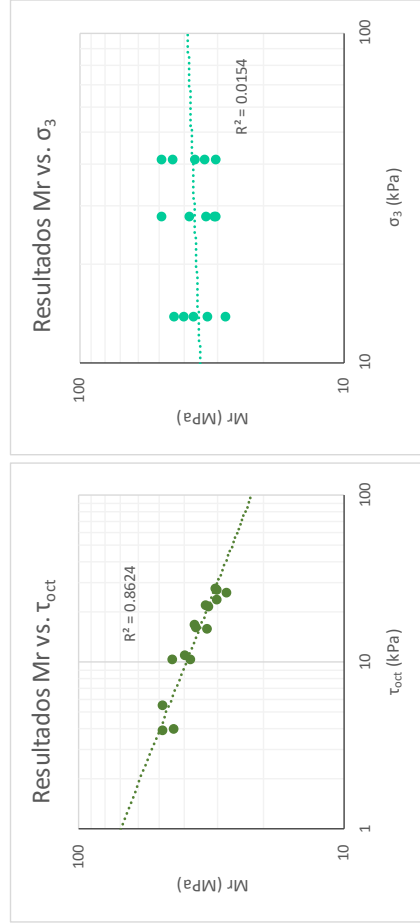
CENTRO DE ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK-45 No.205-59 (Autopista Norte), ECL, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

Ecuaciones

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \quad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.68	41.40	5.5046	135.877	48.6
2	22.40	41.40	10.5598	146.601	44.4
3	34.32	41.40	16.1767	158.516	36.2
4	46.95	41.40	22.1307	171.146	33.5
5	58.15	41.40	27.4106	182.347	30.2
6	8.34	27.60	3.9318	91.141	48.6
7	22.16	27.60	10.4475	104.962	38.2
8	33.60	27.60	15.8397	116.401	33.1
9	50.28	27.60	23.7034	133.083	30.2
10	59.34	27.60	27.9723	142.138	30.7
11	8.58	13.80	4.0442	49.979	43.9
12	23.35	13.80	11.0092	64.754	40.0
13	35.98	13.80	16.9631	77.384	36.8
14	45.99	13.80	21.6813	87.393	32.5
15	55.53	13.80	26.1749	96.925	27.9

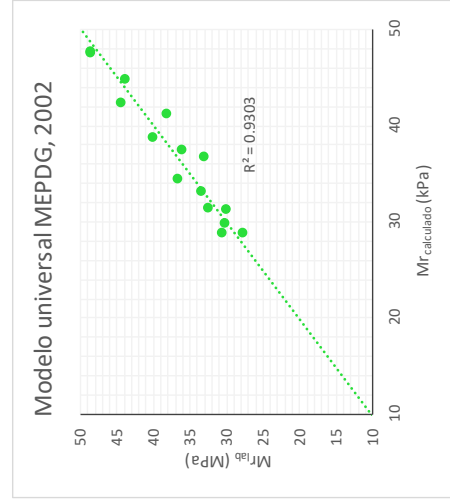
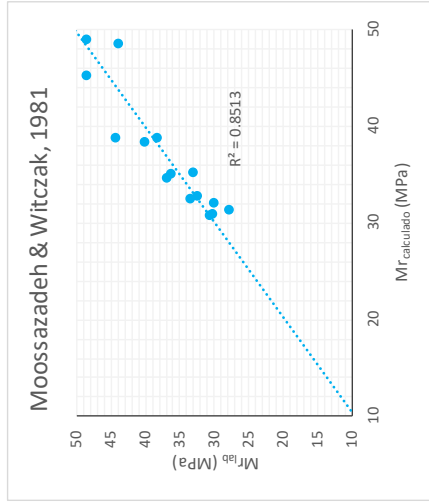




ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019
Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019
Profundidad (m):	0.80 - 1.00




Ciclo	Moossazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	$M_{r_{lab}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)	$M_{r_{lab}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)
1	48.6	45.266	3.4	11.3	48.6	47.621	1.0	1.0
2	44.4	38.836	5.6	31.2	44.4	42.436	2.0	3.9
3	36.2	35.130	1.1	1.2	36.2	37.548	-1.3	1.7
4	33.5	32.634	0.8	0.7	33.5	33.178	0.3	0.1
5	30.2	31.033	-0.8	0.7	30.2	29.870	0.3	0.1
6	48.6	48.993	-0.4	0.1	48.6	47.674	1.0	0.9
7	38.2	38.934	-0.7	0.5	38.2	41.211	-3.0	8.9
8	33.1	35.304	-2.2	4.9	33.1	36.734	-3.6	13.3
9	30.2	32.111	-2.0	3.8	30.2	31.320	-1.2	1.3
10	30.7	30.885	-0.2	0.0	30.7	28.832	1.9	3.6
11	43.9	48.669	-4.8	23.0	43.9	44.885	-1.0	1.0
12	40.0	38.457	1.6	2.5	40.0	38.832	1.2	1.5
13	36.8	34.740	2.1	4.3	36.8	34.445	2.4	5.6
14	32.5	32.792	-0.3	0.1	32.5	31.415	1.1	1.3
15	27.9	31.371	-3.5	12.0	27.9	28.847	-0.9	0.9
			Σ	96.3			Σ	45.1


$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_3} \left(\frac{T_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

k_1	27.191
k_2	-0.235
P_a (kPa)	102

k_1	0.523
k_2	0.096
k_3	-2.667
P_a (kPa)	102

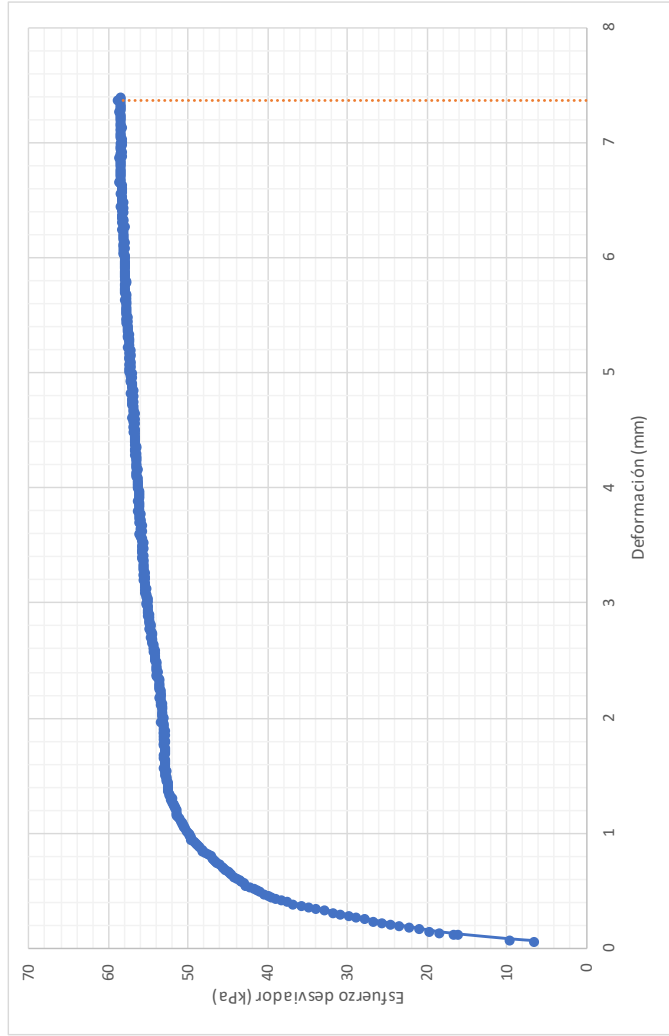


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

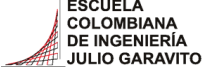



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces
Procedencia (Localización):	AK-45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019
Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019
Profundidad (m):	0.80 - 1.00

Prueba rápida de corte



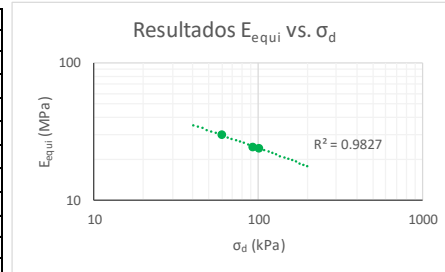
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.146
Máximo esfuerzo (kPa)	58.83
Máxima deformación (mm)	7.374
Máxima deformación (%)	4.982

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

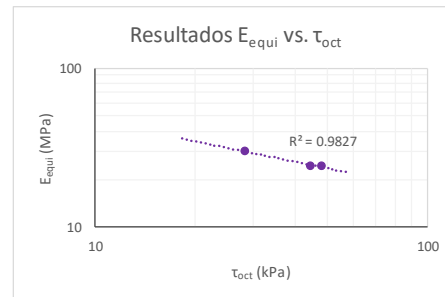
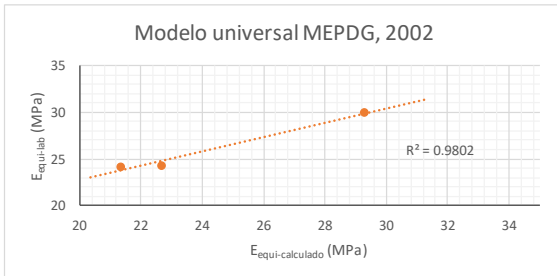
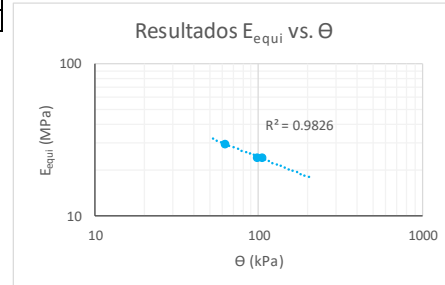
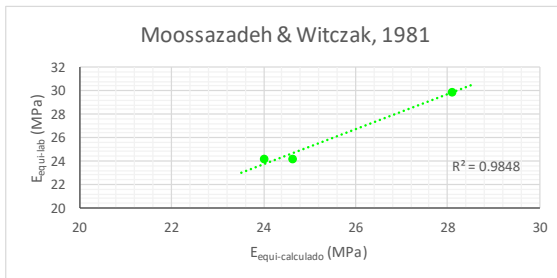
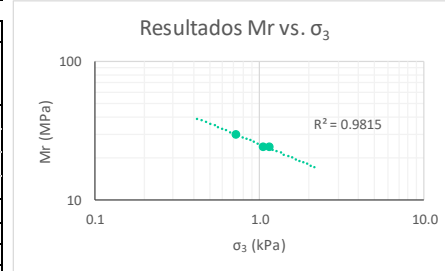
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019
		Profundidad (m):	0.80 - 1.00

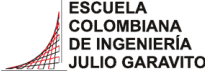

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	63
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.625	1.270	2.546
Carga máxima pistón (kg) P_{max}	14.218	20.881	22.511
Carga cíclica pistón (kg) P_{cíclico}	11.848	18.511	20.141
Carga de contacto pistón (kg) P_{contacto}	2.370	2.370	2.370
Esfuerzo máximo pistón (kPa) σ₁	0.072	0.106	0.114
Esfuerzo desviador pistón (MPa) σ_d	0.060	0.094	0.102
Esfuerzo confinamiento (MPa) σ₃	0.001	0.001	0.001
Cortante octaédrico (MPa) τ_{oct}	0.028	0.044	0.048
Invariante de esfuerzos (MPa) θ	0.062	0.097	0.106
Deformación elástica (mm) u	0.046	0.088	0.096
Módulo equivalente (MPa) E_{equi}	29.9	24.3	24.2

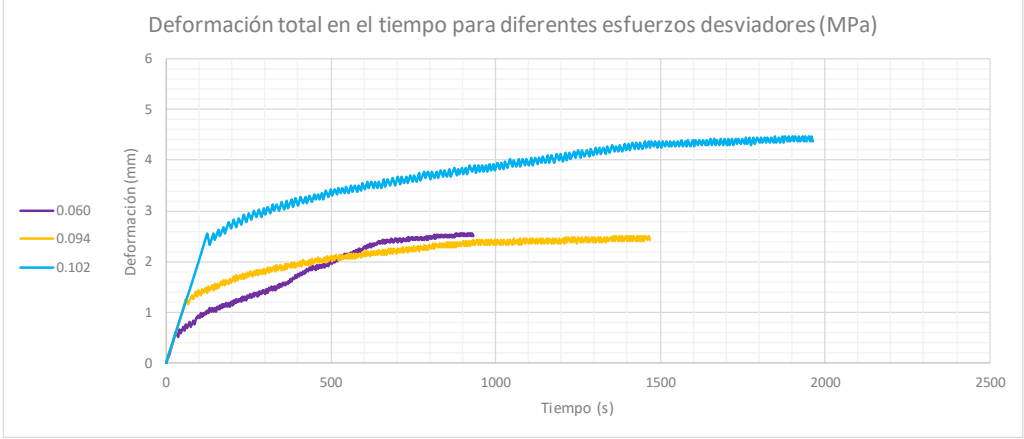


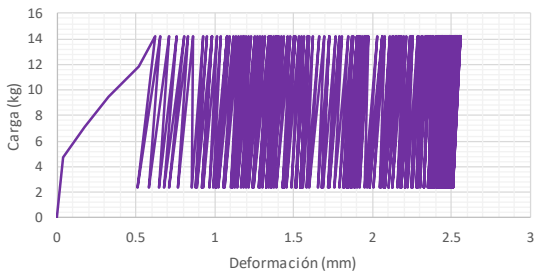
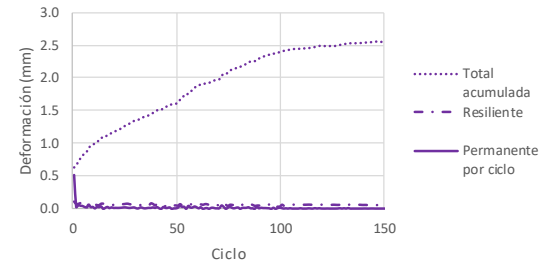
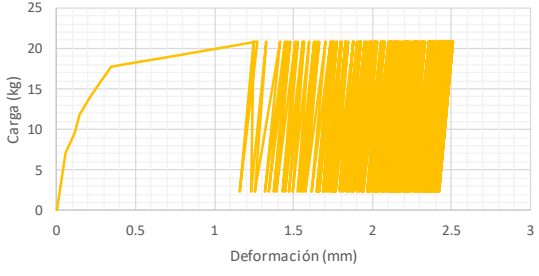
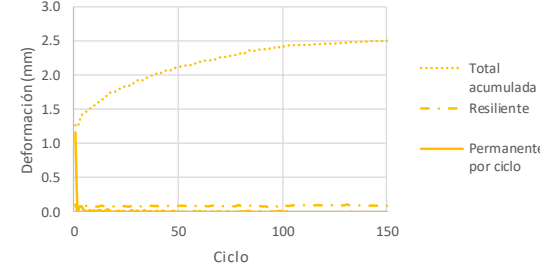
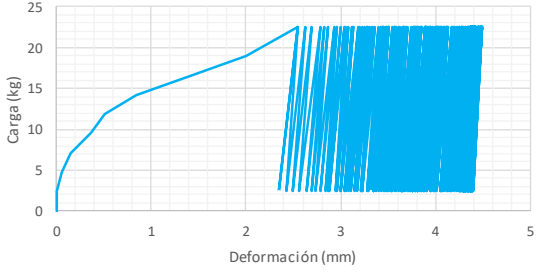
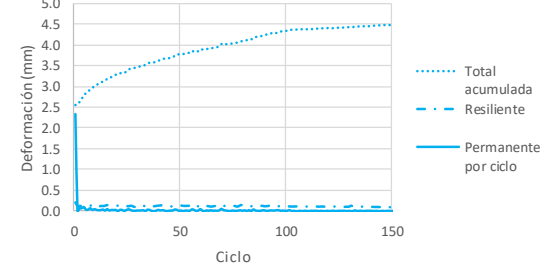
Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
k₁	24.027		k₁	0.573	
k₂	-0.295		k₂	0.102	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-2.615	
			P_a (MPa)	0.102	
Eeq_{lab} (MPa)	Eeq_{cal} (MPa)	Difer² (MPa)	Eeq_{lab} (MPa)	Eeq_{cal} (MPa)	Difer² (MPa)
29.9	28.09	3.4	29.9	29.29	0.4
24.3	24.63	0.1	24.3	22.67	2.5
24.2	24.02	0.0	24.2	21.35	8.0
	Σ	3.6		Σ	10.9

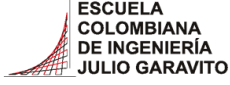



	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019	Profundidad (m):	0.80 - 1.00

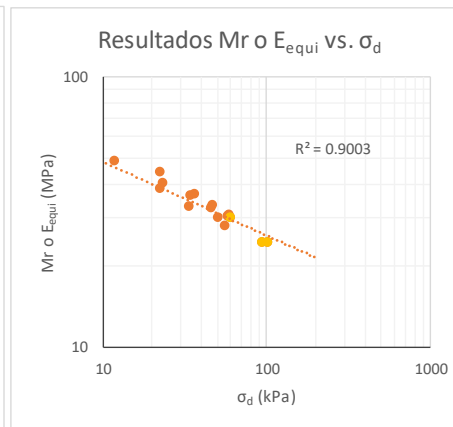
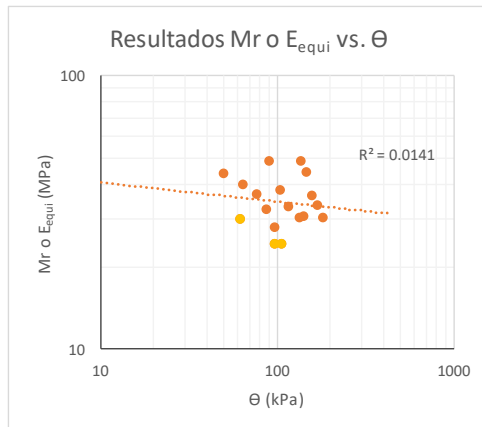
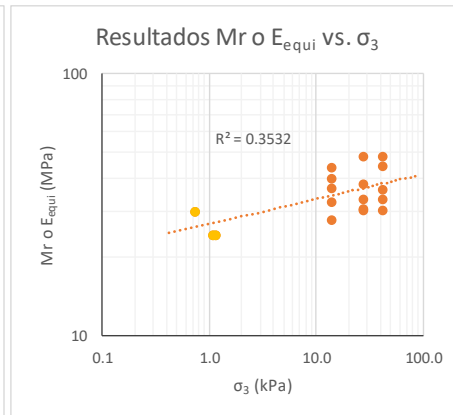
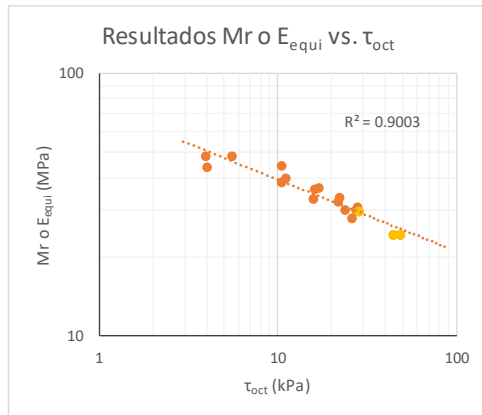


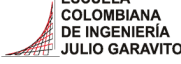

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)
	
	
	

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	--	--

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia blanda color gris con vetas de oxidación habanas y presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 10 a 16 de 2019	Profundidad (m):	0.80 - 1.00

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	12.87	11.68	41.40	5.50	135.88	0.00024	48.62
	2	24.78	22.40	41.40	10.56	146.60	0.00050	44.42
	3	37.89	34.32	41.40	16.18	158.52	0.00095	36.24
	4	51.95	46.95	41.40	22.13	171.15	0.00140	33.46
	5	64.58	58.15	41.40	27.41	182.35	0.00192	30.21
	6	9.53	8.34	27.60	3.93	91.14	0.00017	48.62
	7	24.55	22.16	27.60	10.45	104.96	0.00058	38.23
	8	37.18	33.60	27.60	15.84	116.40	0.00102	33.09
	9	55.29	50.28	27.60	23.70	133.08	0.00167	30.16
	10	65.53	59.34	27.60	27.97	142.14	0.00193	30.72
	11	9.29	8.58	13.80	4.04	49.98	0.00020	43.87
	12	25.74	23.35	13.80	11.01	64.75	0.00058	40.04
	13	39.80	35.98	13.80	16.96	77.38	0.00098	36.80
	14	51.00	45.99	13.80	21.68	87.39	0.00141	32.54
	15	61.96	55.53	13.80	26.17	96.93	0.00199	27.91
cCBR	16	72.07	60.06	0.72	28.31	62.22	-	29.94
	17	105.84	93.83	1.06	44.23	97.01	-	24.26
	18	114.11	102.09	1.14	48.13	105.52	-	24.17



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
--	--	---

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 del contenido de humedad

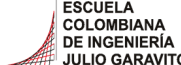

Masa del recipiente (g)	115.28
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	227.47
Masa recipiente + suelo seco (g)	170.7
Contenido de humedad (%)	102.4

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 (°)	15
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99910
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	53.16

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (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/m³)	12.68

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
--	--	---

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 (°C)	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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	
---	--	---

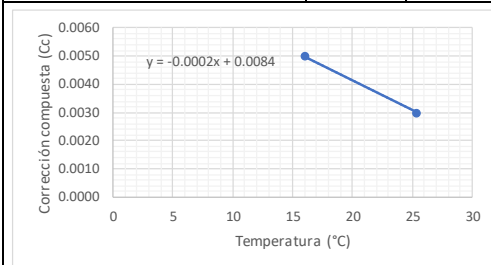
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90		
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 16 a 22 de 2019
		Profundidad (m):	0.50 - 0.80

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 (°C)	16	25.4
Lectura en solución de hexametáfosfato	1.0050	1.0030
Corrección compuesta (Cc)	0.0050	0.0030



3. Análisis por hidrometría

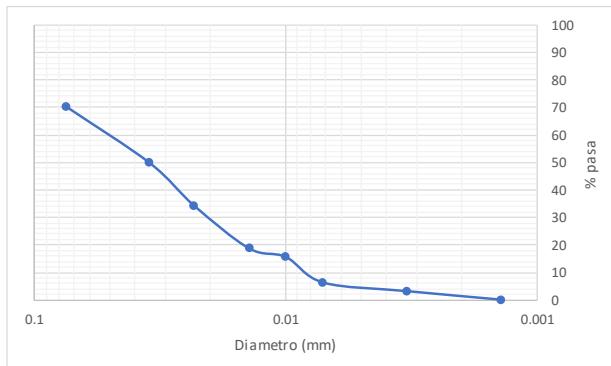
Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	51.2
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	51.2
Gravedad específica del suelo - G _s	2.69
Gravedad específica del agua - G ₁	1.000
$Constante A = \frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_s}{G_s - G_1}$	
A	3109
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	10:19

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	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)

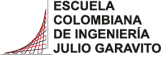

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	51.2
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	15.2
% Retenido en tamiz No 200	29.7
% Pasa el tamiz No 200	70.3

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)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	1
Fina	0.425 - 0.075	28
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	70

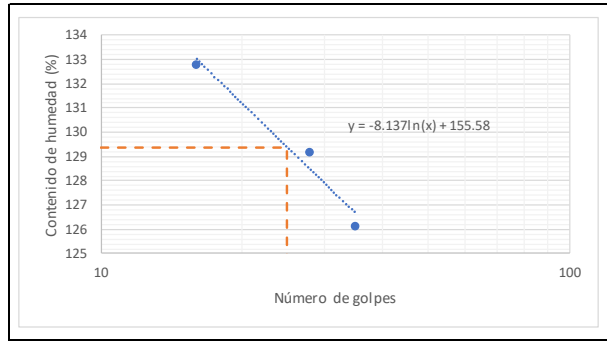
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	30
Finos	< 0.075	70

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS INV - E- 125/126/181	
---	---	---

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

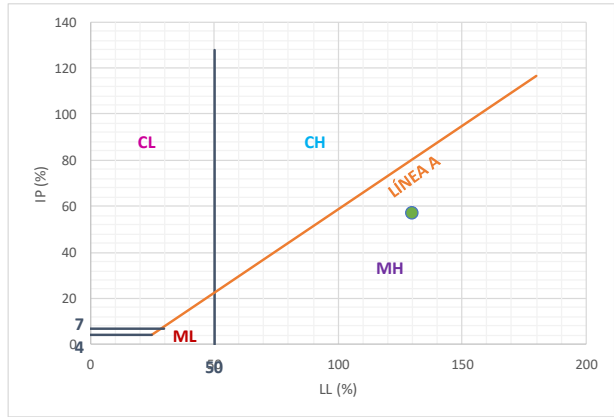
Ensayo	1	2
Número recipiente	56P	82
Masa del recipiente (g)	11.0618	6.7643
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	17.6066	13.5536
Masa recipiente + suelo seco (g)	14.8772	10.6995
Contenido de humedad (%)	72	73

LP (%)	72
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	57
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH
---------------------------	-----------

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

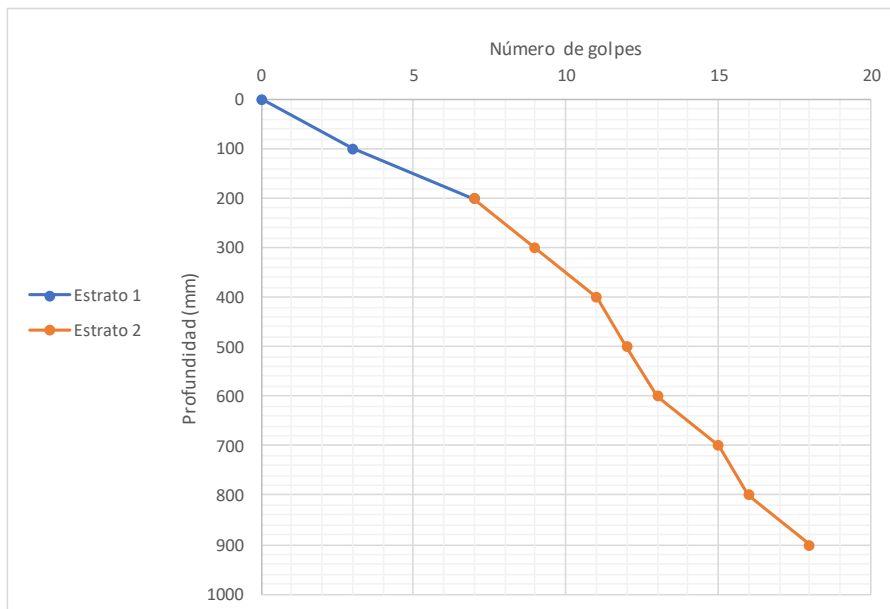
Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Agosto 09 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

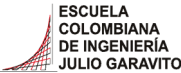

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
3	100	100	33	1	33
4	200	100	25	1	25
2	300	100	50	1	50
2	400	100	50	1	50
1	500	100	100	1	100
1	600	100	100	1	100
2	700	100	50	1	50
1	800	100	100	1	100
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 del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	69
--	-----------

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

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

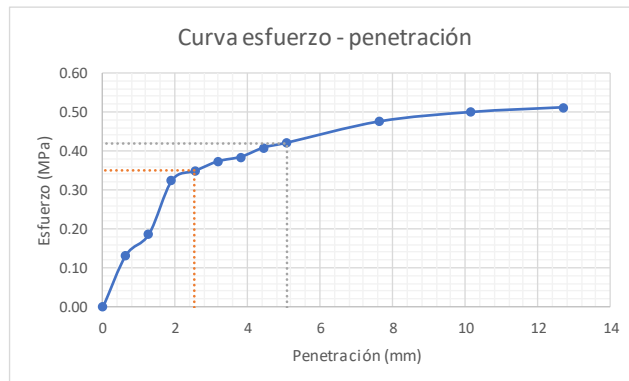
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

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 inmersión (%)	5.1

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	---	---

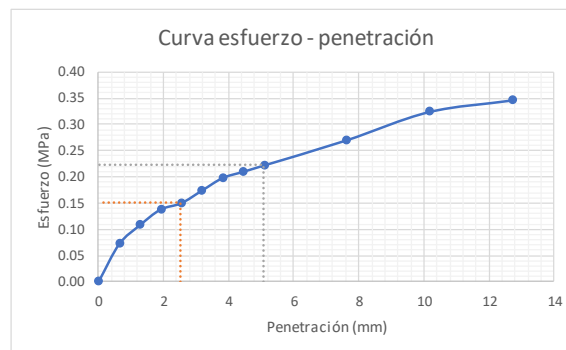
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 16 a 22 de 2019	Profundidad (m):	0.50 - 0.80

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 (%)	2.2

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
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
Altura (mm)	128.75	128.63	128.59	128.98
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	Presión de cámara (kPa)	Ensayo										Módulo resiliente (MPa)							
		S ₃	S _{cíclico}	S _{max}	P _{max}	Carga máxima real (N)	P _{cíclico}	Carga cíclica real (N)	P _{contacto}	Carga de contacto real (N)	S _{max r}		S _{cíclico r}	S _{contacto r}	Esfuerzo real (kPa)	Esfuerzo cíclico real (kPa)	Esfuerzo máximo real (kPa)	H ₁	H ₂
0	41.4	24.8	64	57	7	20.56	18.31	2.25	0.093	0.092	0.093	0.093	0.0072	25.5					
1	41.4	12.4	26	23	3	8.35	7.39	0.96	0.033	0.032	0.033	0.0025	29.3						
2	41.4	24.8	78	71	7	25.06	22.81	2.25	0.108	0.108	0.108	0.0084	27.2						
3	41.4	37.3	85	75	10	27.30	24.09	3.21	0.118	0.119	0.119	0.0092	26.2						
4	41.4	49.7	147	132	15	47.22	42.40	4.82	0.245	0.246	0.246	0.0091	22.2						
5	41.4	62	194	175	19	62.32	56.22	6.10	0.392	0.392	0.392	0.00304	18.5						
6	27.6	12.4	31	29	2	9.96	9.32	0.64	0.044	0.043	0.044	0.00034	27.6						
7	27.6	24.8	65	59	6	20.88	18.95	1.93	0.101	0.101	0.101	0.00078	24.2						
8	27.6	37.3	121	109	12	38.87	35.01	3.85	0.196	0.196	0.196	0.00152	23.0						
9	27.6	49.7	160	143	17	51.40	45.94	5.46	0.264	0.265	0.265	0.00205	22.4						
10	27.6	62	229	209	20	73.56	67.14	6.42	0.445	0.445	0.445	0.00346	19.4						
11	13.8	12.4	33	33	0	10.60	10.60	0.00	0.050	0.050	0.050	0.00039	27.3						
12	13.8	24.8	67	61	6	21.52	19.59	1.93	0.100	0.099	0.100	0.00077	25.4						
13	13.8	37.3	113	103	10	36.30	33.09	3.21	0.169	0.169	0.169	0.00131	25.2						
14	13.8	49.7	145	131	14	46.58	42.08	4.50	0.228	0.229	0.229	0.00177	23.7						
15	13.8	62	185	166	19	59.43	53.32	6.10	0.321	0.319	0.320	0.00249	21.5						

Datos de humedad al inicio 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
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

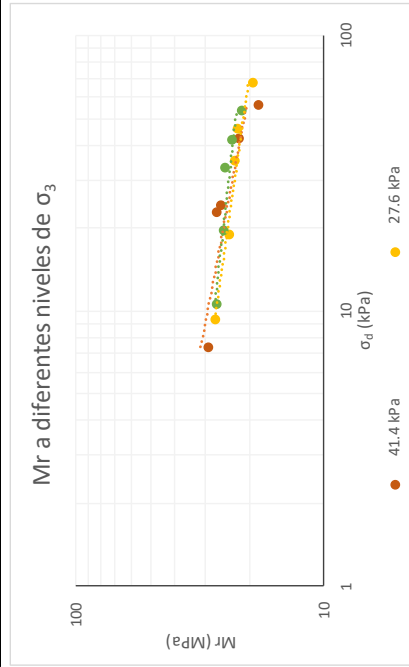
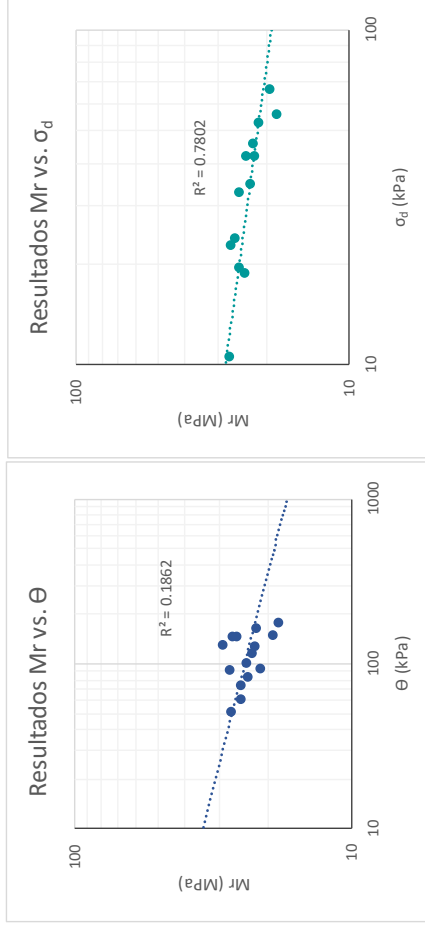
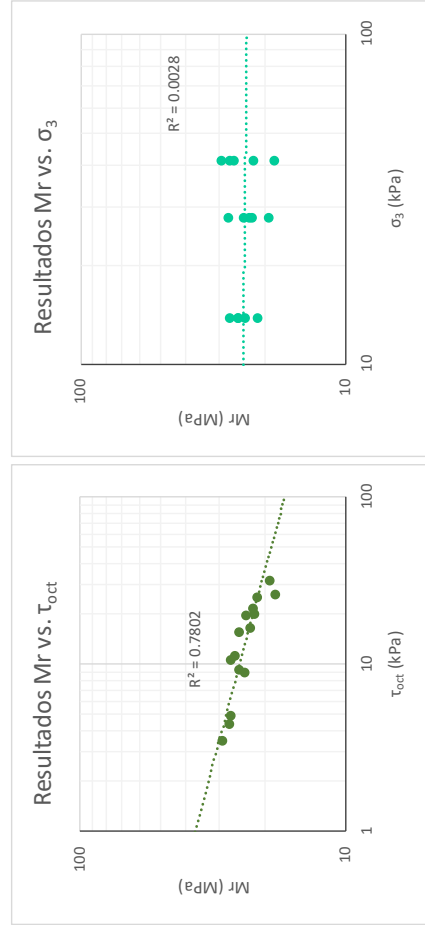


Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019
Fecha ensayos:	Agosto 16 a 22 de 2019
Profundidad (m):	0.50 - 0.80

Ecuaciones

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \quad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

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



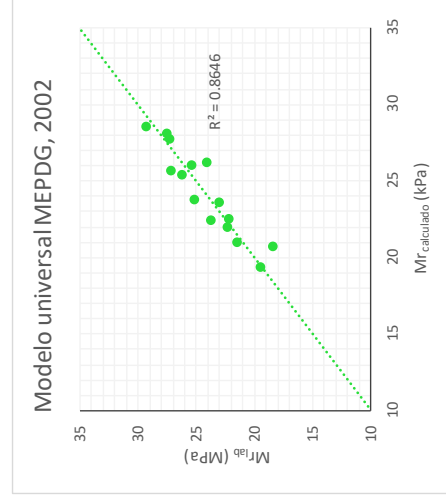
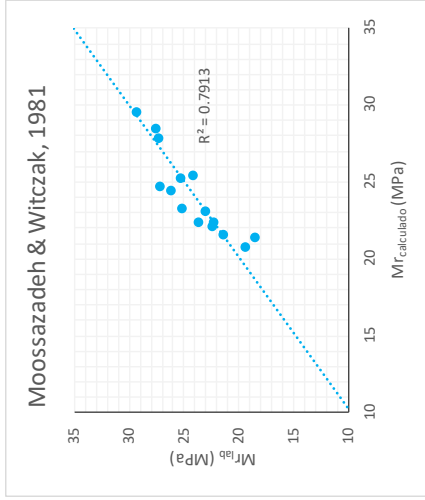



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13




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

Ciclo	Moosazadeh & Witzak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	$M_{r_{lab}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (Mpa)	$M_{r_{lab}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (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



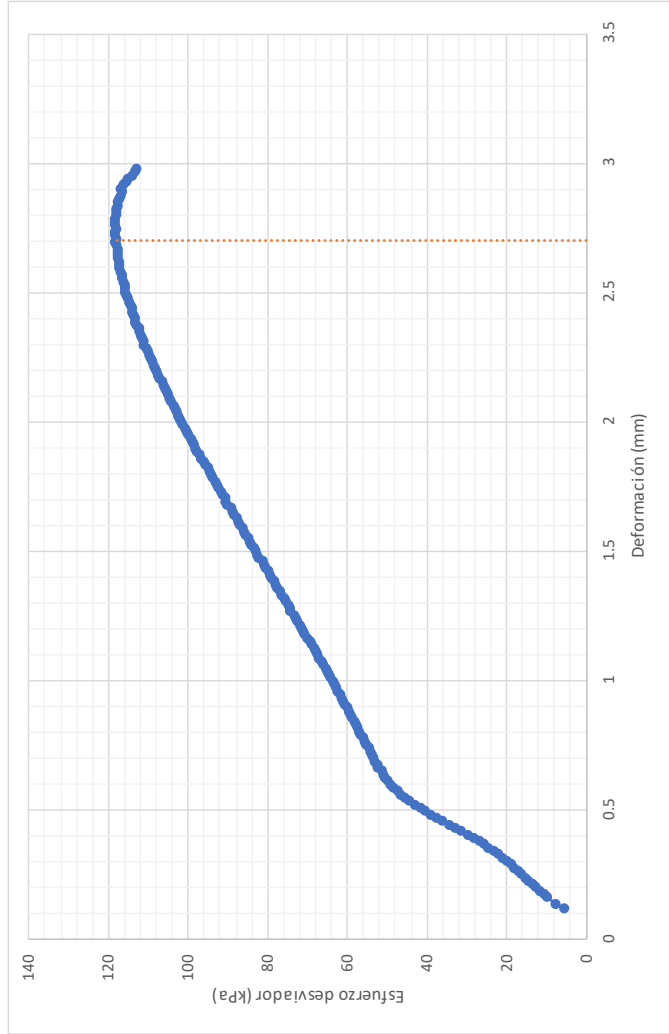


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

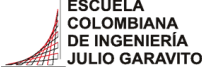



Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena
Procedencia (Localización):	Cra 72 No. 181-90
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019
Fecha ensayos:	Agosto 16 a 22 de 2019
Profundidad (m):	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



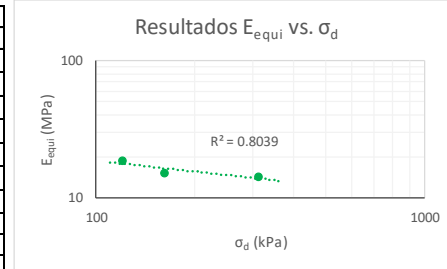
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.129
Máximo esfuerzo (kPa)	118.46
Máxima deformación (mm)	2.698
Máxima deformación (%)	2.096

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)	
---	--	---

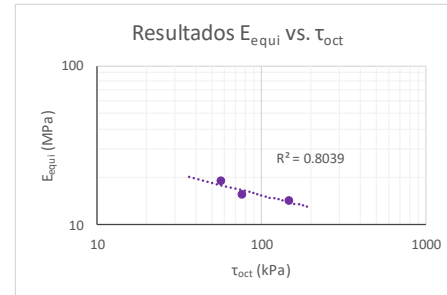
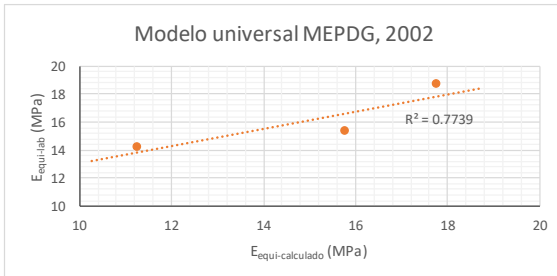
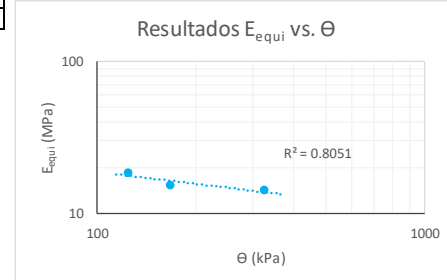
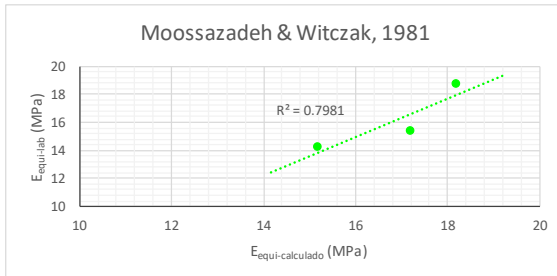
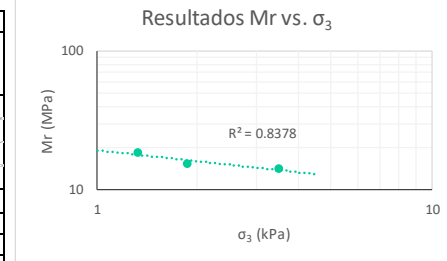
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90		
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 16 a 22 de 2019
		Profundidad (m):	0.50 - 0.80

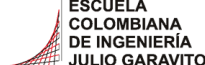

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	102
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo		1	2	3
Penetración objetivo (mm)		0.657	1.281	2.546
Carga máxima pistón (kg)	P_{max}	26.066	36.729	68.718
Carga cíclica pistón (kg)	P_{cíclico}	23.696	31.99	61.609
Carga de contacto pistón (kg)	P_{contacto}	2.370	4.739	7.109
Esfuerzo máximo pistón (kPa)	σ₁	0.132	0.186	0.348
Esfuerzo desviador pistón (MPa)	σ_d	0.120	0.162	0.312
Esfuerzo confinamiento (MPa)	σ₃	0.001	0.002	0.003
Cortante octaédrico (MPa)	τ_{oct}	0.057	0.076	0.147
Invariante de esfuerzos (MPa)	θ	0.124	0.168	0.323
Deformación elástica (mm)	u	0.145	0.236	0.488
Módulo equivalente (MPa)	E_{equi}	18.7	15.4	14.2

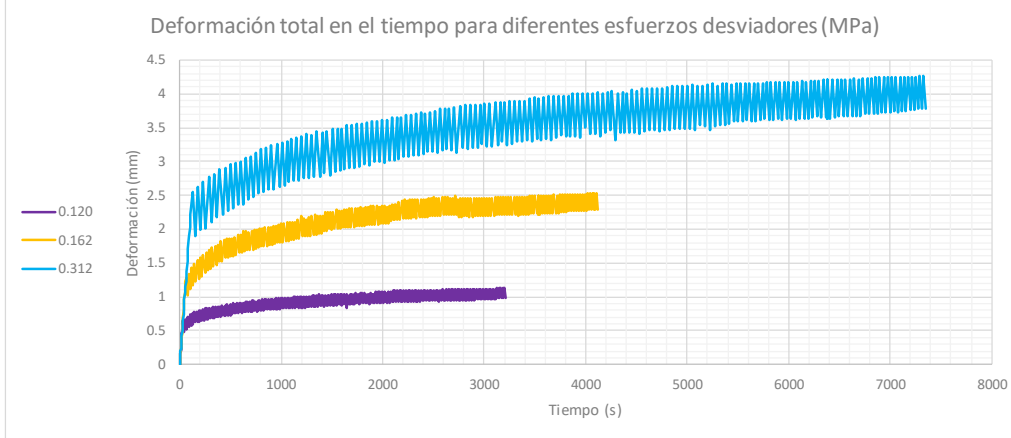


Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
	k₁	18.766		k₁	0.270
	k₂	-0.191		k₂	-0.010
	P_a (MPa)	0.102		k₃	-0.989
				P_a (MPa)	0.102
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
18.7	18.19	0.3	18.7	17.76	0.9
15.4	17.18	3.3	15.4	15.76	0.2
14.2	15.15	0.9	14.2	11.25	8.8
	Σ	4.5		Σ	9.8

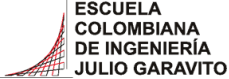



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

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

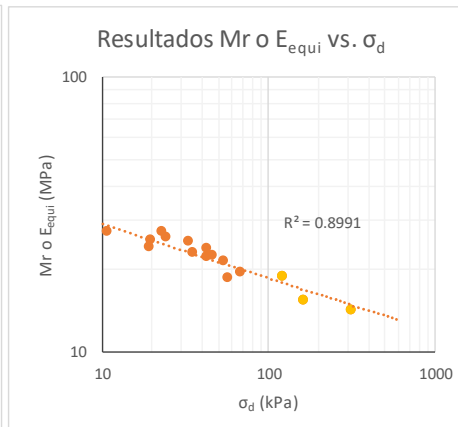
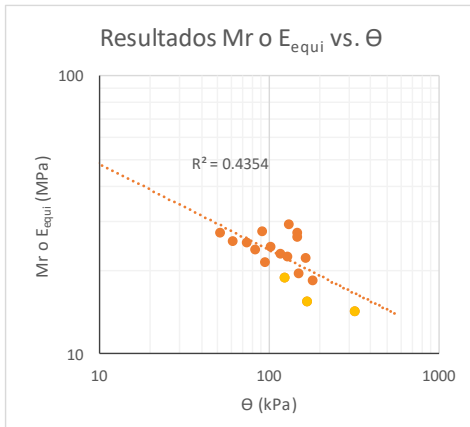
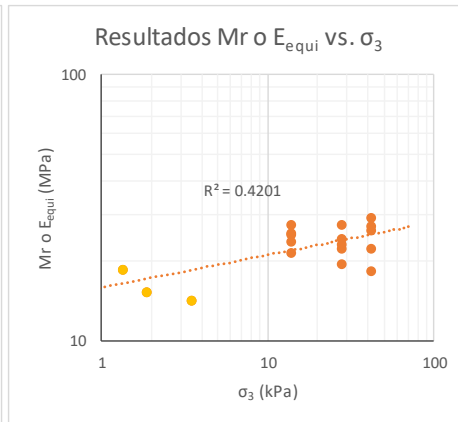
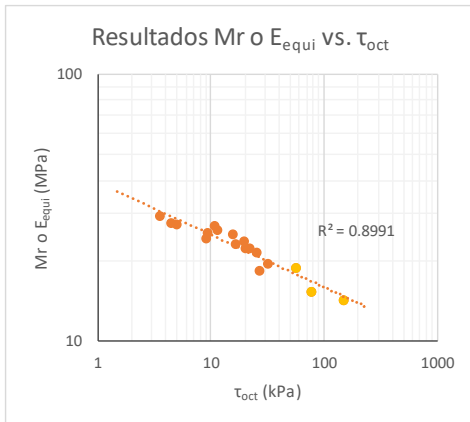


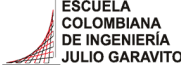

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	---	---

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

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E _{equi} (MPa)
Mr	1	8.35	7.39	41.40	3.48	131.59	0.00025	29.27
	2	25.06	22.81	41.40	10.75	147.01	0.00084	27.19
	3	27.30	24.09	41.40	11.36	148.29	0.00092	26.17
	4	47.22	42.40	41.40	19.99	166.60	0.00191	22.24
	5	62.32	56.22	41.40	26.50	180.42	0.00304	18.46
	6	9.96	9.32	27.60	4.39	92.12	0.00034	27.57
	7	20.88	18.95	27.60	8.93	101.75	0.00078	24.16
	8	38.87	35.01	27.60	16.51	117.81	0.00152	23.00
	9	51.40	45.94	27.60	21.65	128.74	0.00205	22.36
	10	73.56	67.14	27.60	31.65	149.94	0.00346	19.42
	11	10.60	10.60	13.80	5.00	52.00	0.00039	27.29
	12	21.52	19.59	13.80	9.24	60.99	0.00077	25.35
	13	36.30	33.09	13.80	15.60	74.49	0.00131	25.20
	14	46.58	42.08	13.80	19.84	83.48	0.00177	23.71
	15	59.43	53.32	13.80	25.14	94.72	0.00249	21.45
cCBR	16	132.13	120.11	1.32	56.62	124.08	-	18.70
	17	186.18	162.15	1.86	76.44	167.74	-	15.35
	18	348.33	312.29	3.48	147.22	322.74	-	14.21



	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	---	---

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 del contenido de humedad

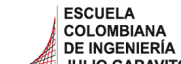

Masa del recipiente (g)	119.76
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	296.29
Masa recipiente + suelo seco (g)	216.9
Contenido de humedad (%)	81.7

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 (°)	15.8
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99898
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	112.39

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (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/m³)	13.45

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	---	---

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

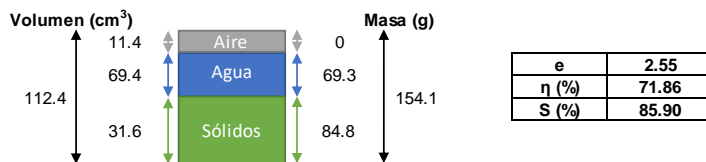
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	174.11	672.21	23.4	0.99745	499.37
2	174.12	672.32	21.4	0.99791	499.24
3	174.11	672.89	16.6	0.99885	499.35
4	174.11	672.84	16.4	0.99888	499.29
5	174.11	672.87	16.8	0.99881	499.35
Prom	174.11	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 (°C)	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



	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	

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

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 - G _s	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

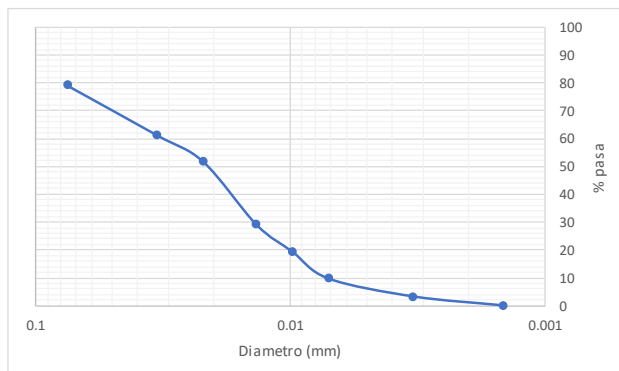
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	10:04
--	-------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	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)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	1
Fina	0.425 - 0.075	20
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	79

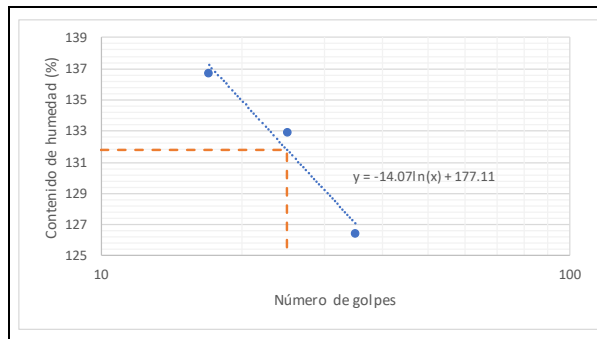
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	21
Finos	< 0.075	79

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

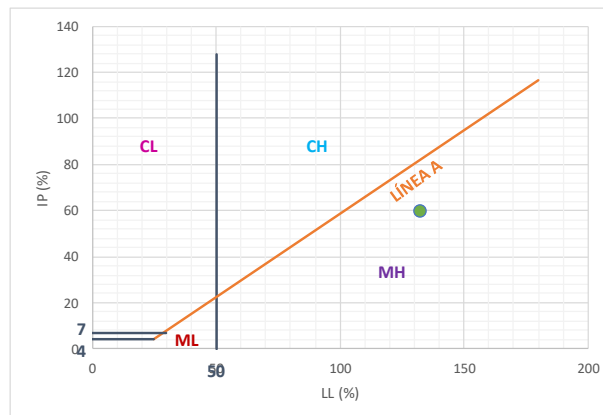
Ensayo	1	2
Número recipiente	82	56V
Masa del recipiente (g)	6.759	11.048
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	12.981	17.427
Masa recipiente + suelo seco (g)	10.386	14.761
Contenido de humedad (%)	72	72

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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13	
--	---

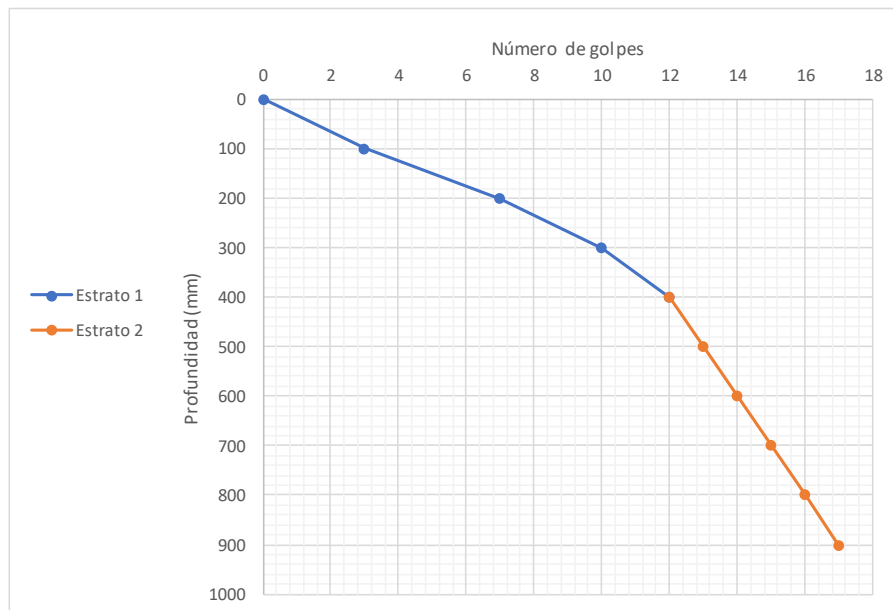
Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Agosto 09 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

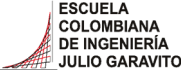

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
3	100	100	33	1	33
4	200	100	25	1	25
3	300	100	33	1	33
2	400	100	50	1	50
1	500	100	100	1	100
1	600	100	100	1	100
1	700	100	100	1	100
1	800	100	100	1	100
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 del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	100
--	------------

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13</p>	
---	--	---

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

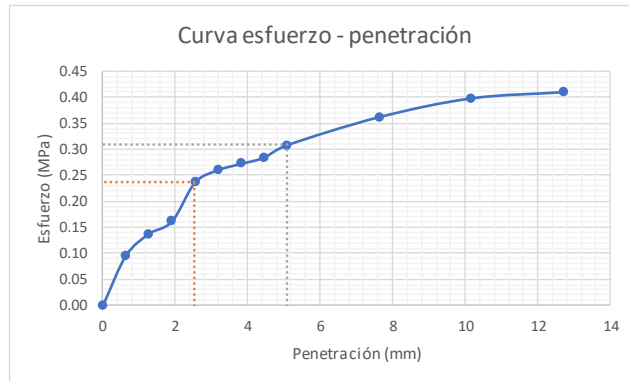
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

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 inmersión (%)	3.4

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	---	---

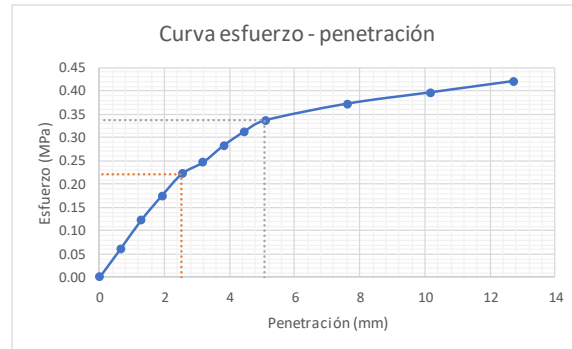
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 23 a 29 de 2019	Profundidad (m):	0.50 - 0.80

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	66.35	0.34
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)	0.34
CBR _{2,54} (%)	3.23
CBR _{5,08} (%)	3.25
CBR con inmersión (%)	3.3

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



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
Altura (mm)	132.08	132.75	132.26	132.2
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										Módulo resiliente (MPa)											
	Presión de cámara (kPa)	S ₃	Esfuerzo cíclico (kPa)	Carga máxima real (N)	P _{max}	Carga cíclica real (N)	P _{cíclico}	Carga de contacto real (N)	P _{contacto}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{max r}	Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico r}	Esfuerzo de contacto real (kPa)	S _{contacto r}	Deformación resiliante LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliante LVDT2 (mm)	H ₂	Deformación resiliante promedio (mm)	H _{promedio}	Deformación resiliante unitaria	E _r	M _r
0	41.4	41.4	24.8	71	64	64	64	7	23.73	21.39	21.39	21.39	2.34	0.129	0.128	0.129	0.00097	0.00097	0.00097	0.00097	0.00097	0.00097	0.00097	22.0
1	41.4	41.4	12.4	21	19	19	19	2	7.02	6.35	6.35	6.35	0.67	0.028	0.028	0.028	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	0.00021	30.0
2	41.4	41.4	24.8	62	55	55	55	7	20.73	18.39	18.39	18.39	2.34	0.083	0.084	0.084	0.00063	0.00063	0.00063	0.00063	0.00063	0.00063	0.00063	29.1
3	41.4	41.4	37.3	107	97	97	97	10	35.77	32.43	32.43	32.43	3.34	0.167	0.167	0.167	0.00126	0.00126	0.00126	0.00126	0.00126	0.00126	0.00126	25.7
4	41.4	41.4	49.7	154	139	139	139	15	51.48	46.47	46.47	46.47	5.01	0.262	0.261	0.262	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198	23.5
5	41.4	41.4	62	190	171	171	171	19	63.52	57.16	57.16	57.16	6.35	0.390	0.390	0.390	0.00295	0.00295	0.00295	0.00295	0.00295	0.00295	0.00295	19.4
6	27.6	27.6	12.4	29	27	27	27	2	9.69	9.03	9.03	9.03	0.67	0.040	0.041	0.041	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	0.00031	29.5
7	27.6	27.6	24.8	55	48	48	48	7	18.39	16.05	16.05	16.05	2.34	0.079	0.079	0.079	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060	26.9
8	27.6	27.6	37.3	114	103	103	103	11	38.11	34.43	34.43	34.43	3.68	0.181	0.180	0.181	0.00136	0.00136	0.00136	0.00136	0.00136	0.00136	0.00136	25.2
9	27.6	27.6	49.7	123	108	108	108	15	41.12	36.10	36.10	36.10	5.01	0.250	0.250	0.250	0.00189	0.00189	0.00189	0.00189	0.00189	0.00189	0.00189	19.1
10	27.6	27.6	62	179	160	160	160	19	59.84	53.49	53.49	53.49	6.35	0.417	0.418	0.418	0.00316	0.00316	0.00316	0.00316	0.00316	0.00316	0.00316	17.0
11	13.8	13.8	12.4	35	31	31	31	4	11.70	10.36	10.36	10.36	1.34	0.046	0.047	0.047	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035	29.5
12	13.8	13.8	24.8	68	62	62	62	6	22.73	20.73	20.73	20.73	2.01	0.106	0.105	0.106	0.00080	0.00080	0.00080	0.00080	0.00080	0.00080	0.00080	26.0
13	13.8	13.8	37.3	73	63	63	63	10	24.40	21.06	21.06	21.06	3.34	0.123	0.123	0.123	0.00093	0.00093	0.00093	0.00093	0.00093	0.00093	0.00093	22.7
14	13.8	13.8	49.7	110	95	95	95	15	36.77	31.76	31.76	31.76	5.01	0.211	0.211	0.211	0.00159	0.00159	0.00159	0.00159	0.00159	0.00159	0.00159	19.9
15	13.8	13.8	62	171	152	152	152	19	57.16	50.81	50.81	50.81	6.35	0.443	0.444	0.444	0.00335	0.00335	0.00335	0.00335	0.00335	0.00335	0.00335	15.2

Datos de humedad al inicio 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
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13

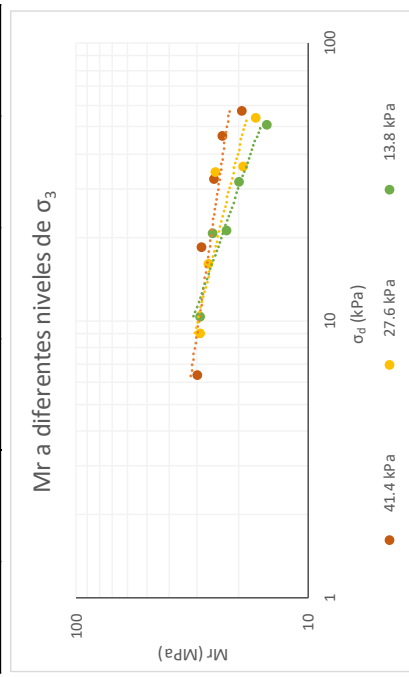
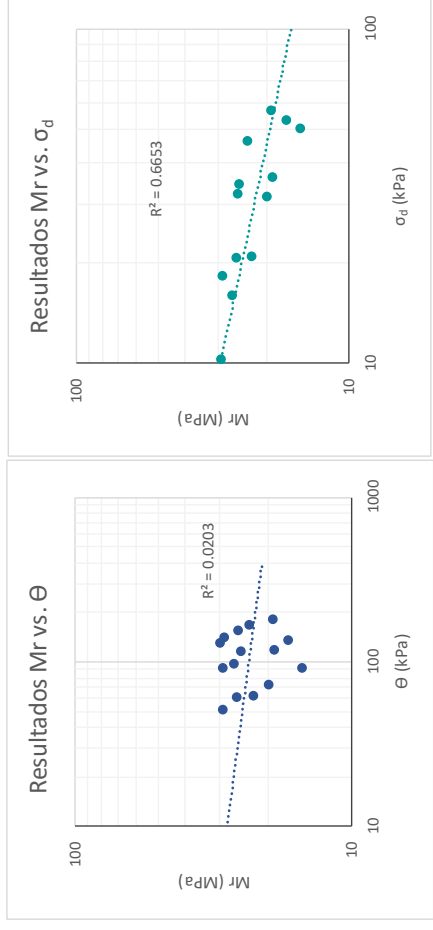
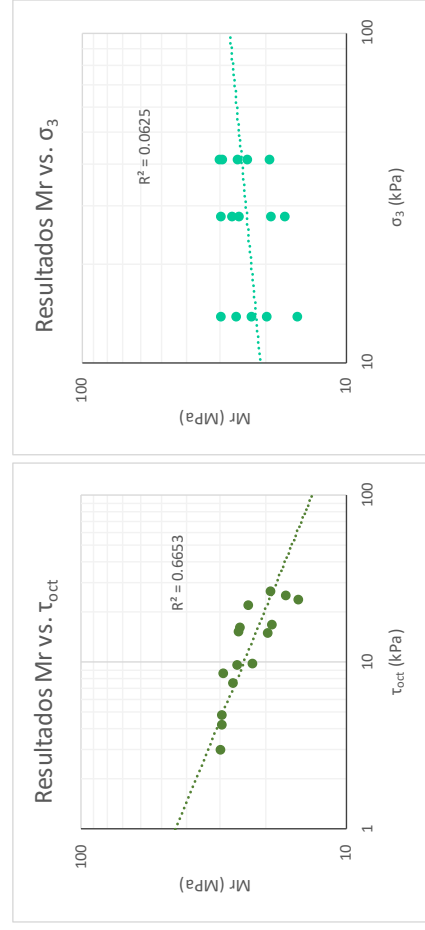


CENTRO DE ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS

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

$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d$ $\theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$

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	142.386	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

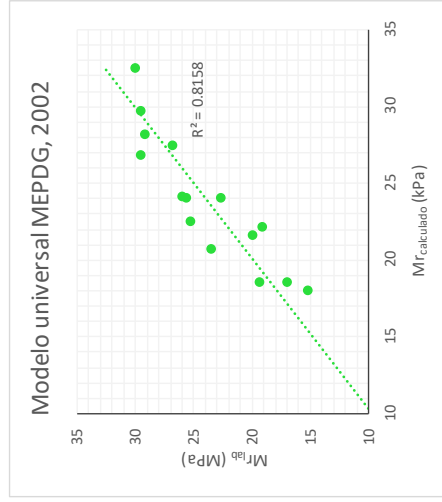
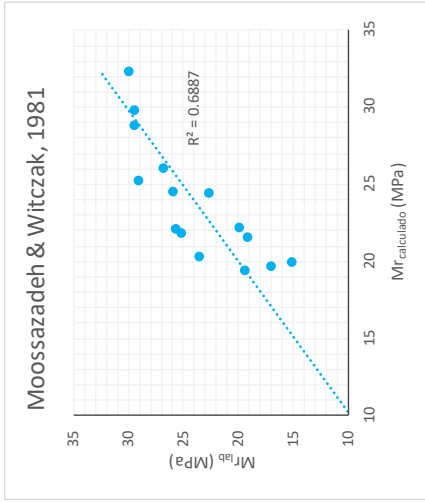




ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13



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



Ciclo	Moosazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	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

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_3} \left(\frac{T_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

k ₁	16.985
k ₂	-0.232
P _a (kPa)	102
k ₁	0.334
k ₂	0.150
k ₃	-2.957
P _a (kPa)	102

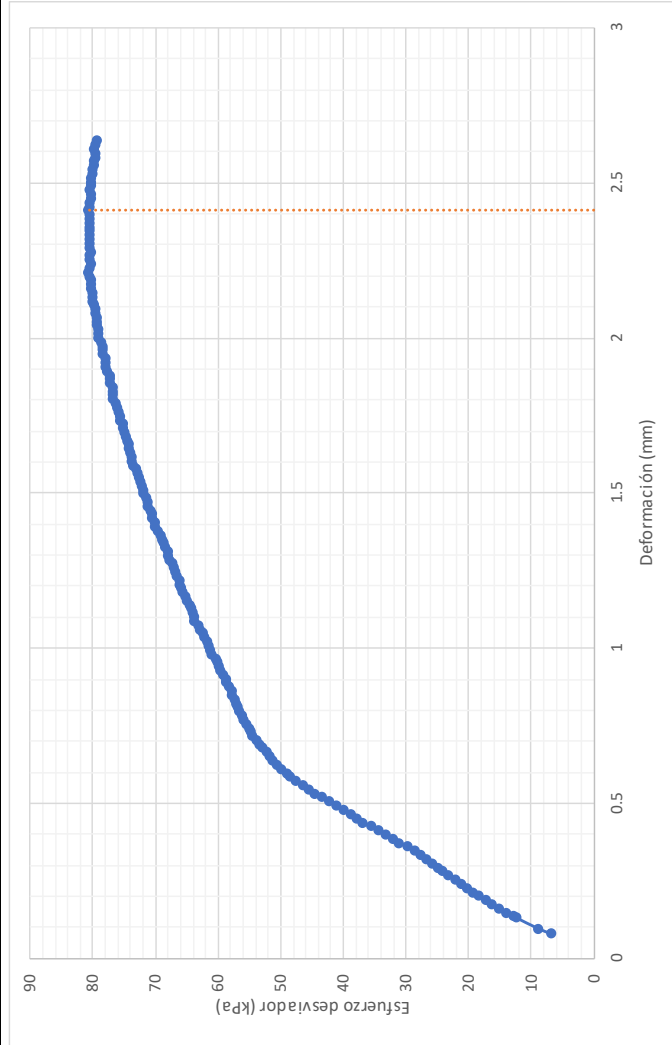


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

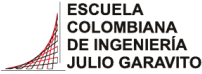



Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena
Procedencia (Localización):	Cra 72 No. 181-90
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019
Fecha ensayos:	Agosto 23 a 29 de 2019
Profundidad (m):	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



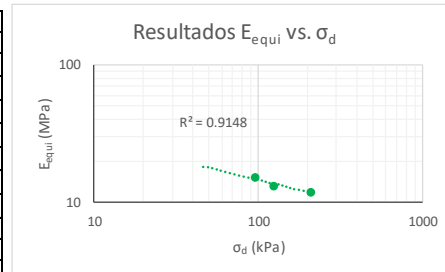
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.132
Máximo esfuerzo (kPa)	80.81
Máxima deformación (mm)	2.413
Máxima deformación (%)	1.823

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

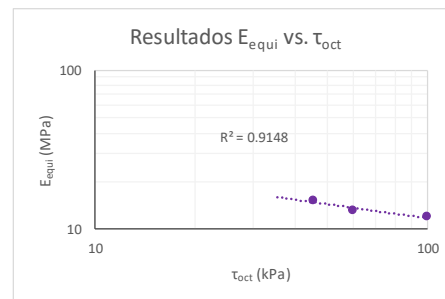
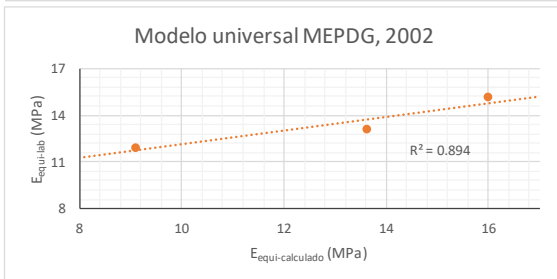
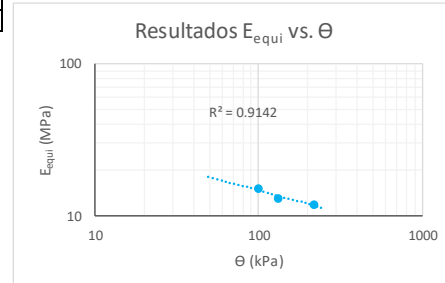
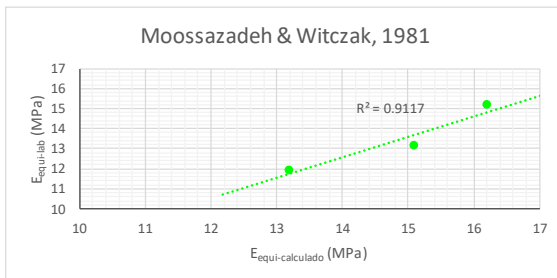
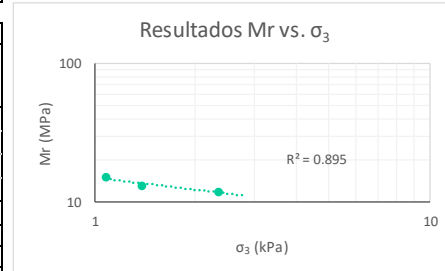
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia importante de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90		
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Agosto 23 a 29 de 2019
		Profundidad (m):	0.50 - 0.80

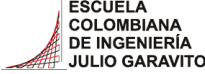

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	82
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.654	1.273	2.539
Carga máxima pistón (kg)	P_{max} 21.326	27.250	46.207
Carga cíclica pistón (kg)	P_{cíclico} 18.956	24.88	41.468
Carga de contacto pistón (kg)	P_{contacto} 2.370	2.370	4.739
Esfuerzo máximo pistón (kPa)	σ₁ 0.108	0.138	0.234
Esfuerzo desviador pistón (MPa)	σ_d 0.096	0.126	0.210
Esfuerzo confinamiento (MPa)	σ₃ 0.001	0.001	0.002
Cortante octaédrico (MPa)	τ_{oct} 0.045	0.059	0.099
Invariante de esfuerzos (MPa)	θ 0.099	0.130	0.217
Deformación elástica (mm)	u 0.143	0.215	0.392
Módulo equivalente (MPa)	E_{equi} 15.2	13.1	11.9

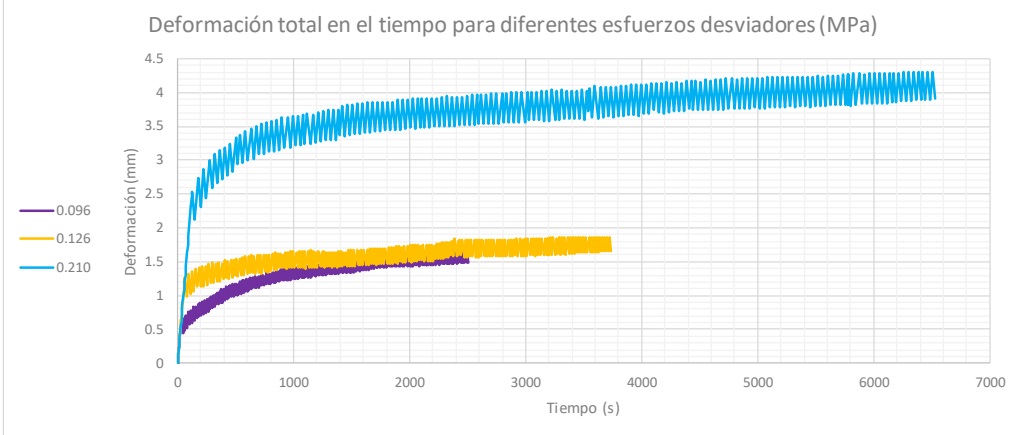


Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$		
k₁	15.948		k₁	0.348	
k₂	-0.264		k₂	0.138	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-2.161	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
15.2	16.20	1.1	15.2	15.99	0.7
13.1	15.08	3.8	13.1	13.61	0.2
11.9	13.18	1.5	11.9	9.09	8.1
	Σ	6.4		Σ	9.0

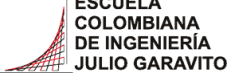



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

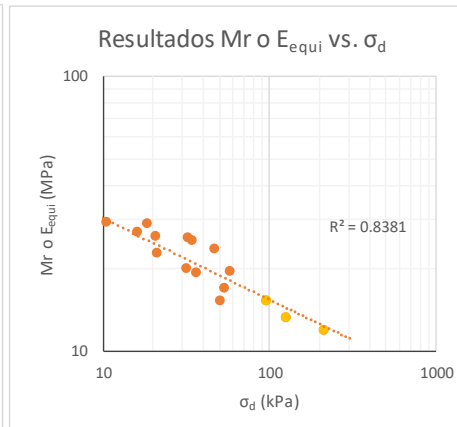
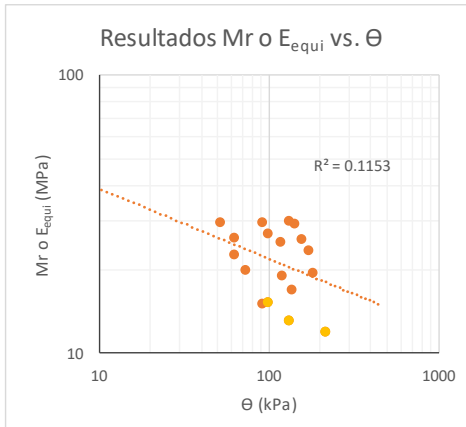
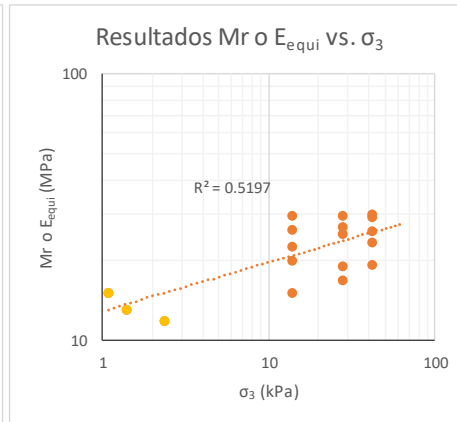
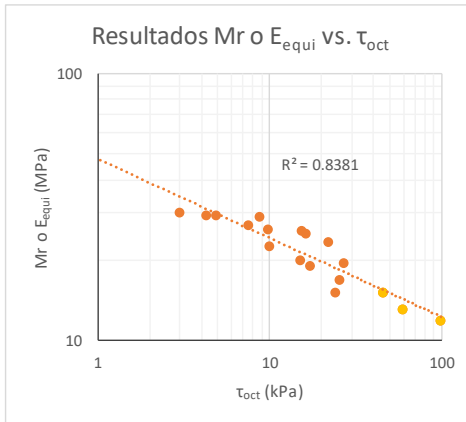




Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	--	--

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

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	7.02	6.35	41.40	2.99	130.55	0.00021	30.02
	2	20.73	18.39	41.40	8.67	142.59	0.00063	29.14
	3	35.77	32.43	41.40	15.29	156.63	0.00126	25.69
	4	51.48	46.47	41.40	21.90	170.67	0.00198	23.51
	5	63.52	57.16	41.40	26.95	181.36	0.00295	19.40
	6	9.69	9.03	27.60	4.25	91.83	0.00031	29.49
	7	18.39	16.05	27.60	7.56	98.85	0.00060	26.88
	8	38.11	34.43	27.60	16.23	117.23	0.00136	25.24
	9	41.12	36.10	27.60	17.02	118.90	0.00189	19.11
	10	59.84	53.49	27.60	25.21	136.29	0.00316	16.95
	11	11.70	10.36	13.80	4.89	51.76	0.00035	29.49
	12	22.73	20.73	13.80	9.77	62.13	0.00080	26.00
	13	24.40	21.06	13.80	9.93	62.46	0.00093	22.66
	14	36.77	31.76	13.80	14.97	73.16	0.00159	19.92
	15	57.16	50.81	13.80	23.95	92.21	0.00335	15.16
cCBR	16	108.10	96.09	1.08	45.30	99.33	-	15.17
	17	138.13	126.11	1.38	59.45	130.26	-	13.12
	18	234.22	210.20	2.34	99.09	217.22	-	11.94



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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 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 (°C)	15
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99910
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	87.25

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (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/m³)	13.32

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

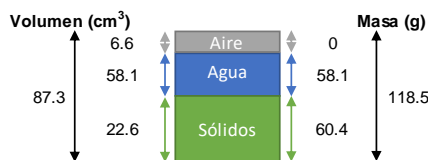
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	147.42	646.47	16.4	0.99888	499.61
2	147.41	646.47	16.4	0.99888	499.62
3	147.41	646.45	16.4	0.99888	499.60
4	147.42	646.49	16.4	0.99888	499.63
5	147.42	646.47	16.8	0.99881	499.64
Prom	147.42	646.47			499.62
Desv.	0.01	0.01			0.02

*Calibración realizada en agosto de 2018

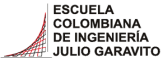

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	50.1
Temperatura de ensayo (°C)	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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	
---	--	---

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

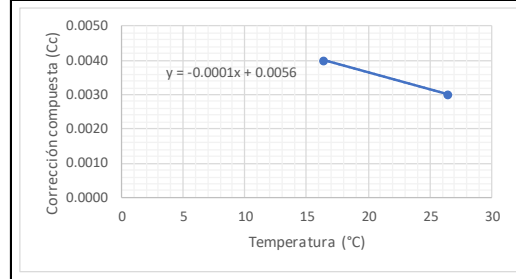
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

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 (°C)	16.4	26.4
Lectura en solución de hexametáfosfato	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 - G _s	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

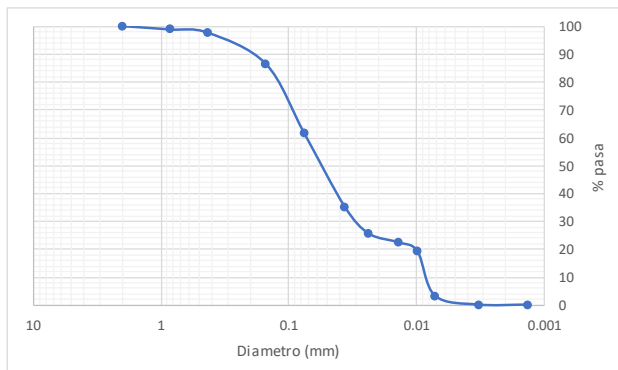
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	11:35
--	-------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	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)

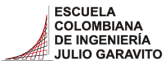

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	50.0
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	19.3
% Retenido en tamiz No 200	38.6
% Pasa el tamiz No 200	61.4

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)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	2
Fina	0.425 - 0.075	36
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	61

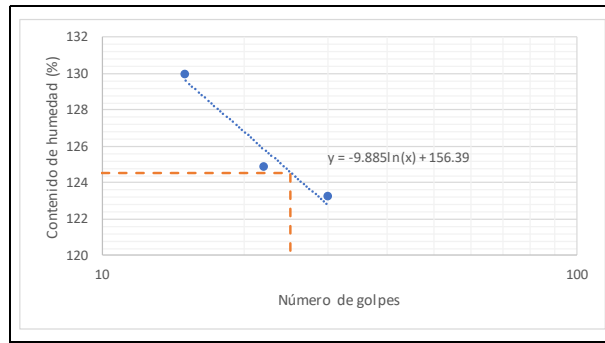
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	39
Finos	< 0.075	61

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

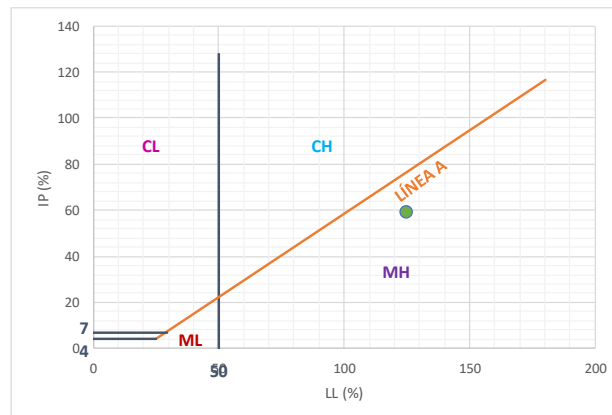
Ensayo	1	2
Número recipiente	59	57
Masa del recipiente (g)	11.303	11.081
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	18.531	17.945
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.672	15.239
Contenido de humedad (%)	65	65

LP (%)	65
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	59
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH
---------------------------	-----------

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

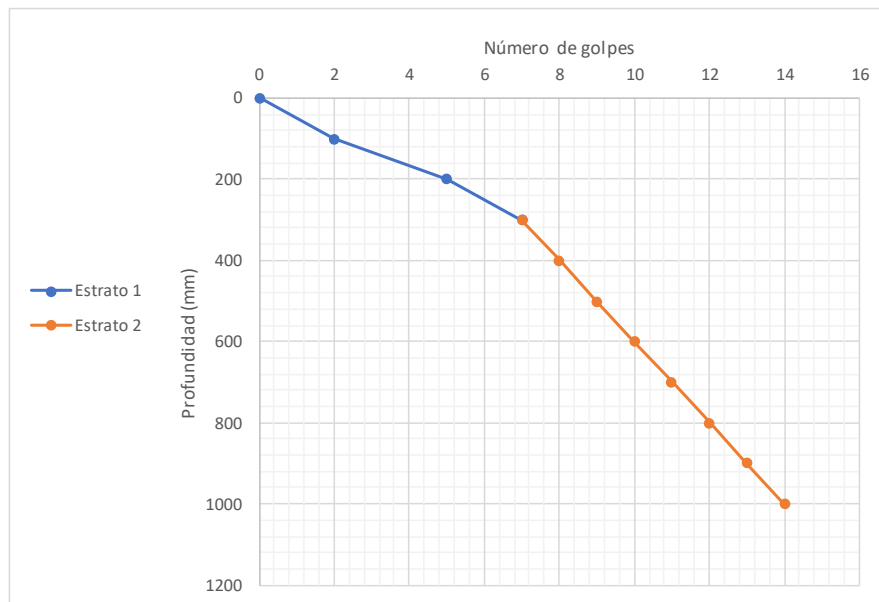
Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Agosto 09 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

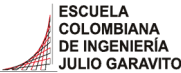

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
2	100	100	50	1	50
3	200	100	33	1	33
2	300	100	50	1	50
1	400	100	100	1	100
1	500	100	100	1	100
1	600	100	100	1	100
1	700	100	100	1	100
1	800	100	100	1	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 del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	100
--	------------

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

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

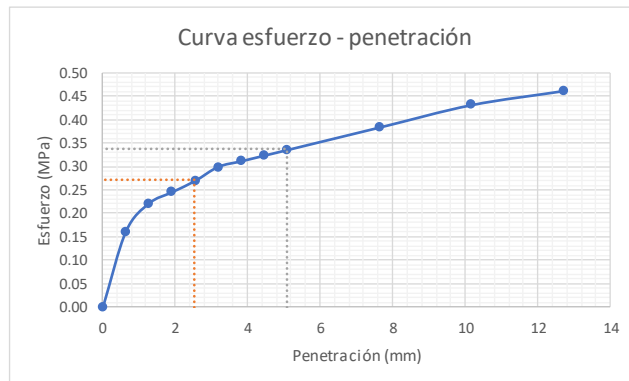
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

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 inmersión (%)	3.9

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

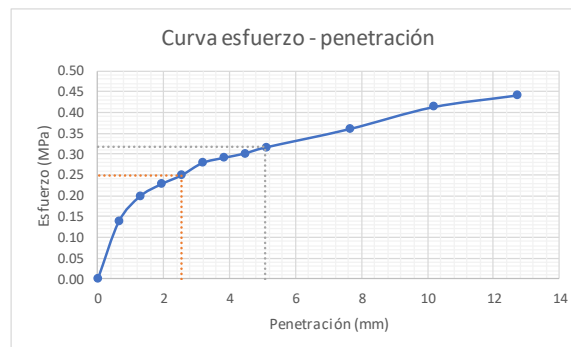
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Septiembre 02 a 06 de 2019	Profundidad (m):	0.50 - 0.80

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 (%)	3.6

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
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color caté 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

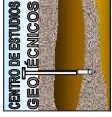
Area (mm²)	3110.07
Volumen (cm³)	406.46
Masa húmeda muestra (g)	531.42
Densidad húmeda aprox. (g/cm³)	1.31

Datos de la muestra antes del ensayo				
Dato	1	2	3	4
Altura (mm)	130.76	130.53	130.59	130.88
Diámetro (mm)	62.93	63.03	62.95	62.8
Prom (mm)				

Ciclo	Norma				Ensayo										Módulo resiliente (MPa)
	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 H ₂	Deformación resiliente H _{promedio}	Deformación resiliente unitaria ε _r	
0	41.4	24.8	79	73	6	25.40	23.47	1.93	0.066	0.068	0.067	0.067	0.00051	45.8	
1	41.4	12.4	38	36	2	12.22	11.58	0.64	0.034	0.035	0.035	0.035	0.00026	43.8	
2	41.4	24.8	74	67	7	23.79	21.54	2.25	0.070	0.072	0.071	0.071	0.00054	39.7	
3	41.4	37.3	116	105	11	37.30	33.76	3.54	0.115	0.115	0.115	0.115	0.00088	38.4	
4	41.4	49.7	159	145	14	51.12	46.62	4.50	0.177	0.178	0.178	0.178	0.00136	34.3	
5	41.4	62	198	178	20	63.66	57.23	6.43	0.249	0.249	0.249	0.249	0.00191	30.0	
6	27.6	12.4	31	29	2	9.97	9.32	0.64	0.030	0.030	0.030	0.030	0.00023	40.6	
7	27.6	24.8	65	59	6	20.90	18.97	1.93	0.069	0.070	0.070	0.070	0.00053	35.7	
8	27.6	37.3	109	99	10	35.05	31.83	3.22	0.124	0.124	0.124	0.124	0.00095	33.5	
9	27.6	49.7	154	140	14	49.52	45.01	4.50	0.197	0.197	0.197	0.197	0.00151	29.9	
10	27.6	62	200	181	19	64.31	58.20	6.11	0.287	0.286	0.287	0.287	0.00219	26.5	
11	13.8	12.4	26	23	3	8.36	7.40	0.96	0.026	0.026	0.026	0.026	0.00020	37.2	
12	13.8	24.8	81	74	7	26.04	23.79	2.25	0.095	0.094	0.095	0.095	0.00072	32.9	
13	13.8	37.3	111	100	11	35.69	32.15	3.54	0.135	0.135	0.135	0.135	0.00103	31.1	
14	13.8	49.7	164	149	15	52.73	47.91	4.82	0.202	0.200	0.201	0.201	0.00154	31.2	
15	13.8	62	203	184	19	65.27	59.16	6.11	0.265	0.265	0.265	0.265	0.00203	29.2	

Datos de humedad al inicio 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
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

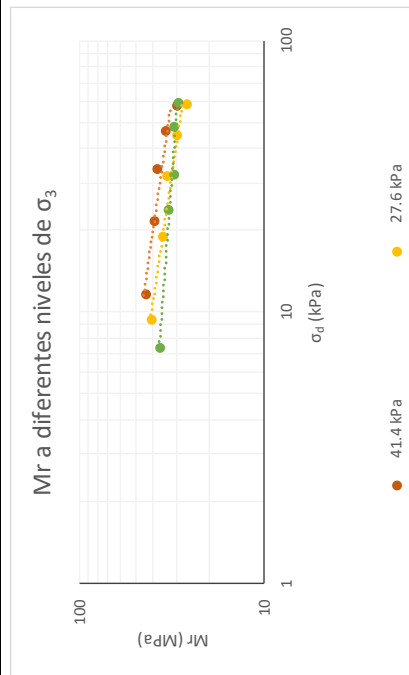
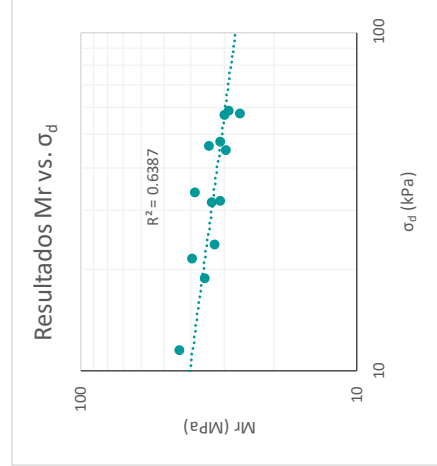
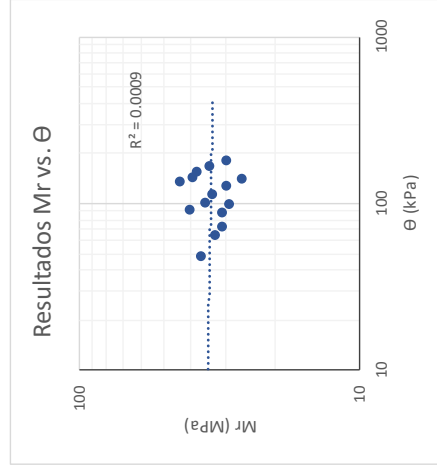
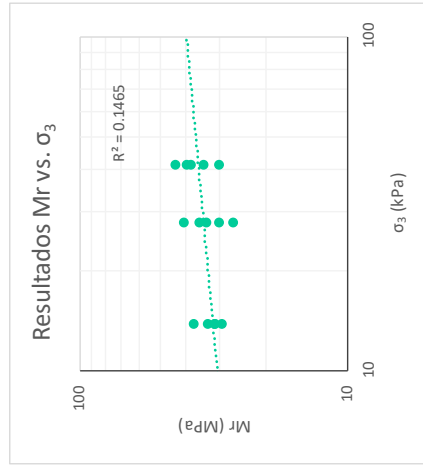
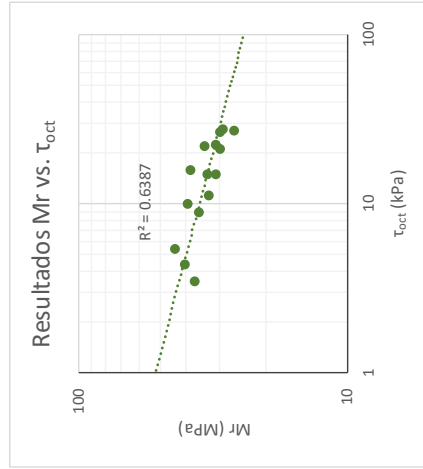



Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90		
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Septiembre 02 a 06 de 2019
Profundidad (m):	0.50 - 0.80		

Ecuaciones


$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \quad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.58	41.40	5.45666	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



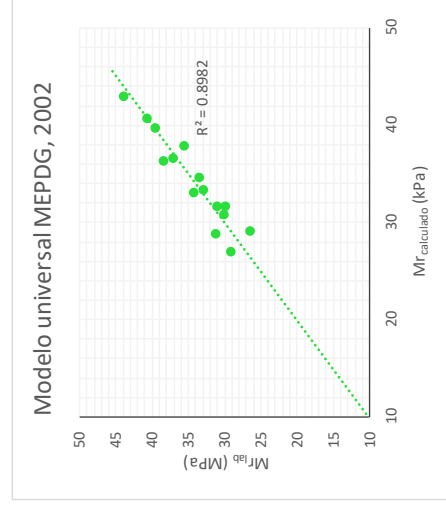
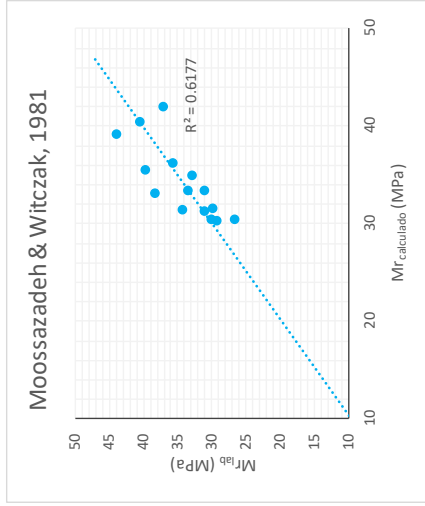


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



CENTRO DE ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con velas 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



Ciclo	Moossazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	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

$$M_r = k_1 \cdot P_a^{k_2} \cdot \left(\frac{\sigma_v}{P_a}\right)^{k_3} \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{T_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$$

k₁	27.859
k₂	-0.156
P_a (kPa)	102

k₁	0.444
k₂	0.193
k₃	-2.128
P_a (kPa)	102

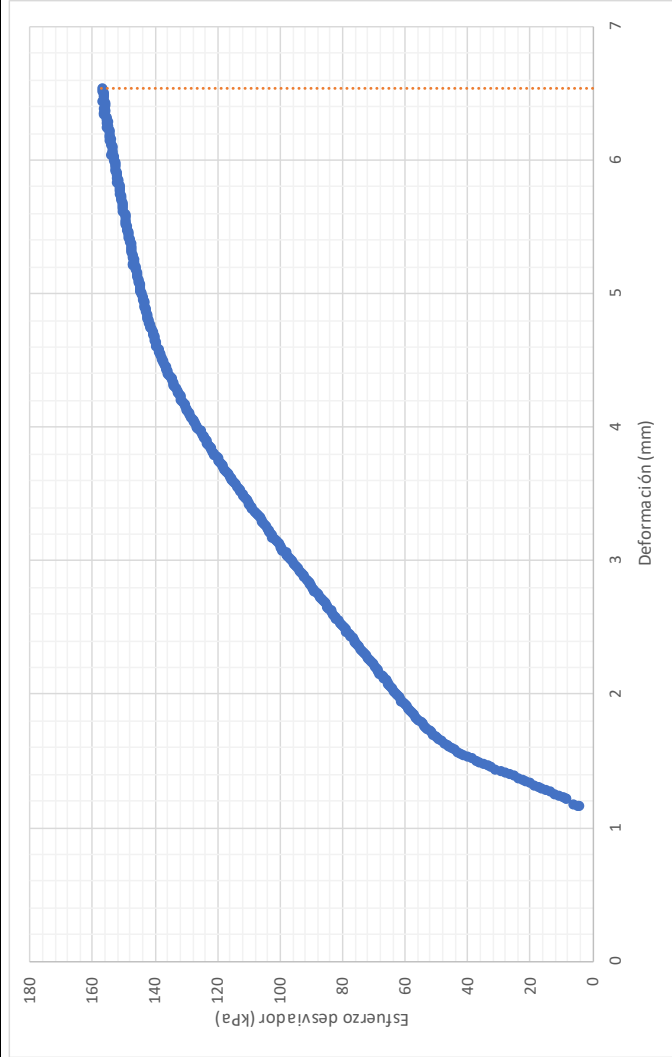


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

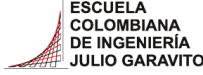



Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019
Fecha ensayos:	Septiembre 02 a 06 de 2019
Profundidad (m):	0.50 - 0.80

Prueba rápida de corte



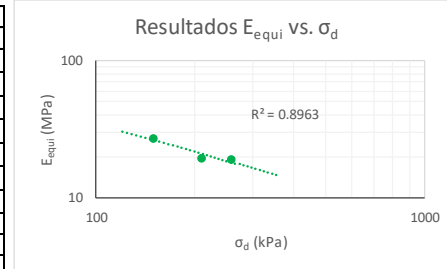
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.131
Máximo esfuerzo (kPa)	157.10
Máxima deformación (mm)	6.54
Máxima deformación (%)	5.005

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

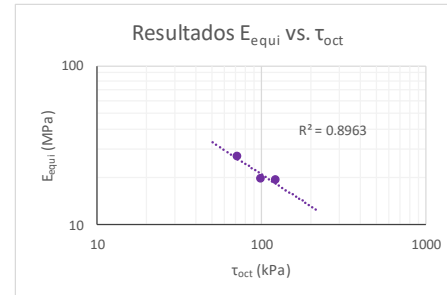
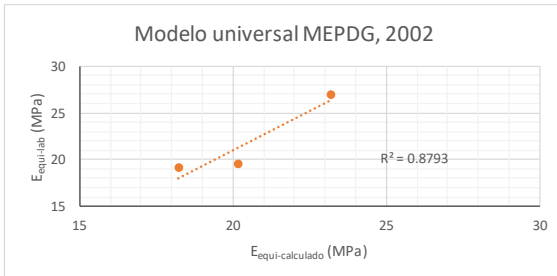
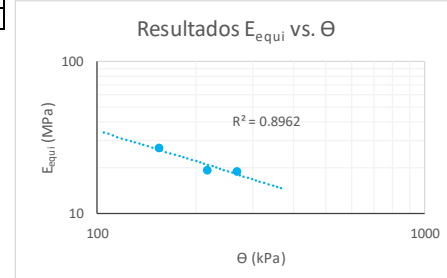
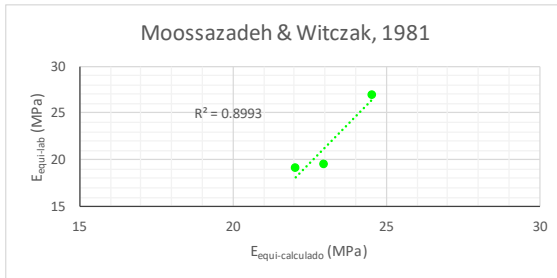
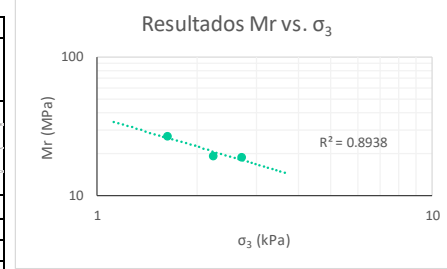
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90		
Fecha exploración:	Agosto 09 de 2019	Fecha ensayos:	Septiembre 02 a 06 de 2019
		Profundidad (m):	0.50 - 0.80

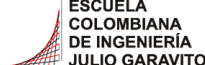

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	96
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo		1	2	3
Penetración objetivo (mm)		0.639	1.273	2.546
Carga máxima pistón (kg)	P_{max}	31.991	43.841	53.321
Carga cíclica pistón (kg)	P_{cíclico}	29.621	41.471	50.951
Carga de contacto pistón (kg)	P_{contacto}	2.370	2.370	2.370
Esfuerzo máximo pistón (kPa)	σ₁	0.162	0.222	0.270
Esfuerzo desviador pistón (MPa)	σ_d	0.150	0.210	0.258
Esfuerzo confinamiento (MPa)	σ₃	0.002	0.002	0.003
Cortante octaédrico (MPa)	τ_{oct}	0.071	0.099	0.122
Invariante de esfuerzos (MPa)	θ	0.155	0.217	0.266
Deformación elástica (mm)	u	0.126	0.241	0.302
Módulo equivalente (MPa)	E_{equi}	27.0	19.5	19.1

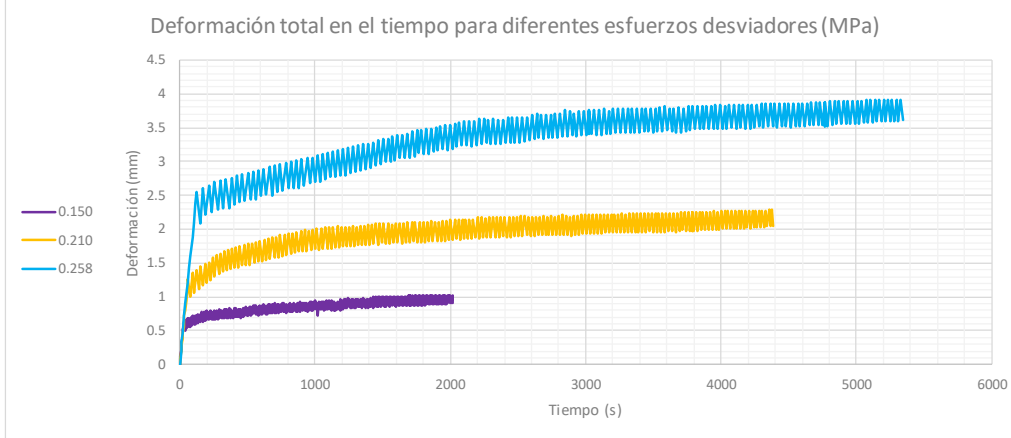


Moosazadeh & Witzcak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
	k₁	26.448		k₁	0.412
	k₂	-0.196		k₂	0.154
	P_a (MPa)	0.102		k₃	-1.251
				P_a (MPa)	0.102
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
27.0	24.52	6.0	27.0	23.18	14.3
19.5	22.95	11.9	19.5	20.19	0.5
19.1	22.05	8.8	19.1	18.24	0.7
	Σ	26.7		Σ	15.5

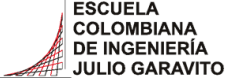



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (c-CBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	--	--

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

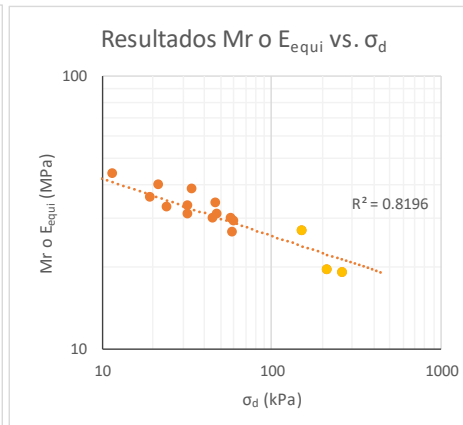
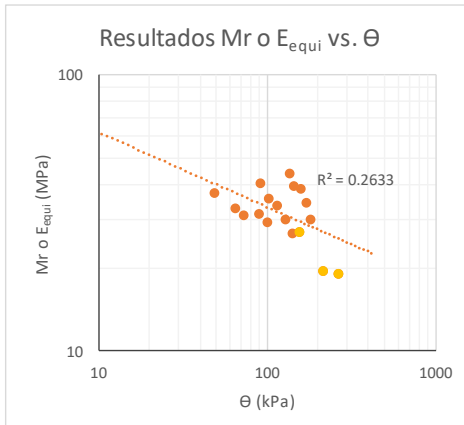
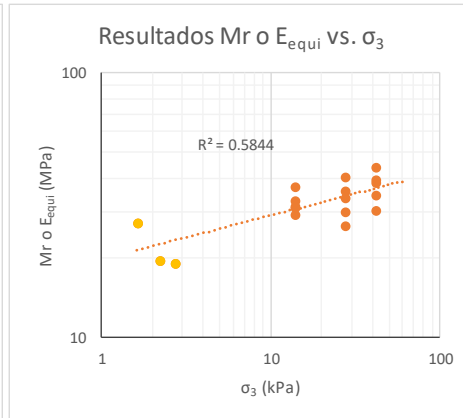
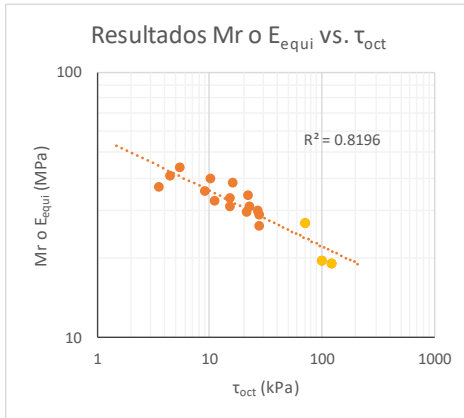


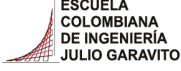

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	
---	--	---

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

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	12.22	11.58	41.40	5.46	135.78	0.00026	43.85
	2	23.79	21.54	41.40	10.16	145.74	0.00054	39.65
	3	37.30	33.76	41.40	15.92	157.96	0.00088	38.37
	4	51.12	46.62	41.40	21.98	170.82	0.00136	34.33
	5	63.66	57.23	41.40	26.98	181.43	0.00191	30.04
	6	9.97	9.32	27.60	4.40	92.12	0.00023	40.62
	7	20.90	18.97	27.60	8.94	101.77	0.00053	35.67
	8	35.05	31.83	27.60	15.01	114.63	0.00095	33.55
	9	49.52	45.01	27.60	21.22	127.81	0.00151	29.86
	10	64.31	58.20	27.60	27.43	141.00	0.00219	26.55
	11	8.36	7.40	13.80	3.49	48.80	0.00020	37.17
	12	26.04	23.79	13.80	11.22	65.19	0.00072	32.91
	13	35.69	32.15	13.80	15.16	73.55	0.00103	31.13
	14	52.73	47.91	13.80	22.58	89.31	0.00154	31.15
	15	65.27	59.16	13.80	27.89	100.56	0.00203	29.18
cCBR	16	162.16	150.15	1.62	70.78	155.01	-	26.96
	17	222.23	210.21	2.22	99.10	216.88	-	19.50
	18	270.28	258.27	2.70	121.75	266.38	-	19.07



	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	--	---

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 del contenido de humedad

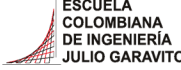

Masa del recipiente (g)	17.64
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	63.16
Masa recipiente + suelo seco (g)	41.03
Contenido de humedad (%)	94.6

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 (°)	19
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99841
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	66.59

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (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/m³)	13.77

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	--	---

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

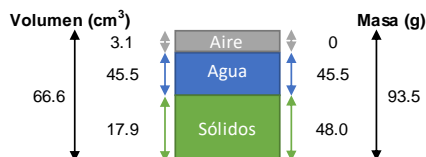
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	143.24	641.99			499.56
Desv.	0.00	0.34			0.02

*Calibración realizada en agosto de 2018

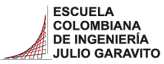

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.2
Temperatura de ensayo (°C)	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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	

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

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 - G _s	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

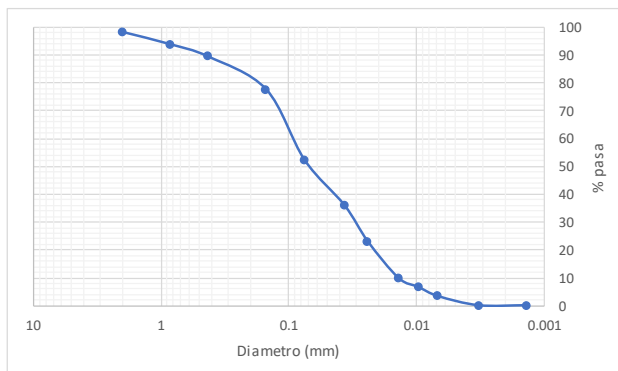
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	11:35
--	-------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	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

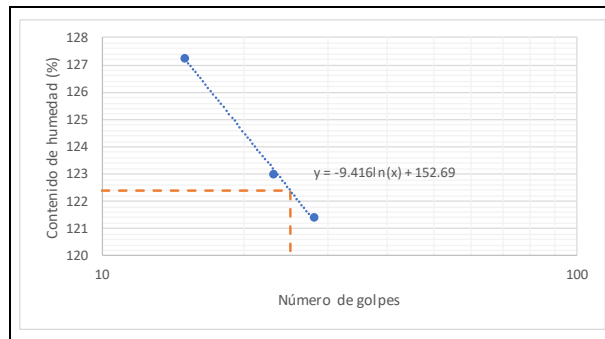
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	48
Finos	< 0.075	52

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	---	---

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

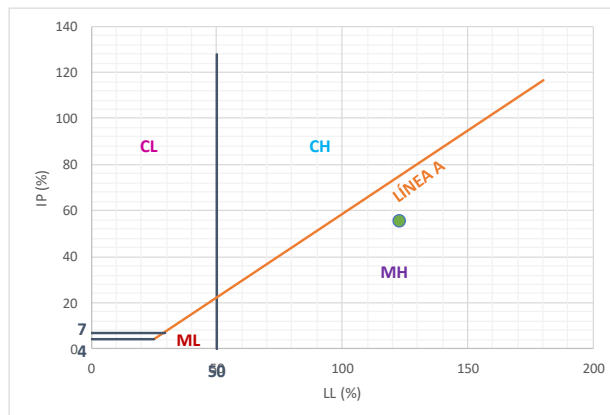
Ensayo	1	2
Número recipiente	62	71
Masa del recipiente (g)	10.934	11.472
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	17.728	17.803
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.009	15.27
Contenido de humedad (%)	67	67

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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13	
---	--	---

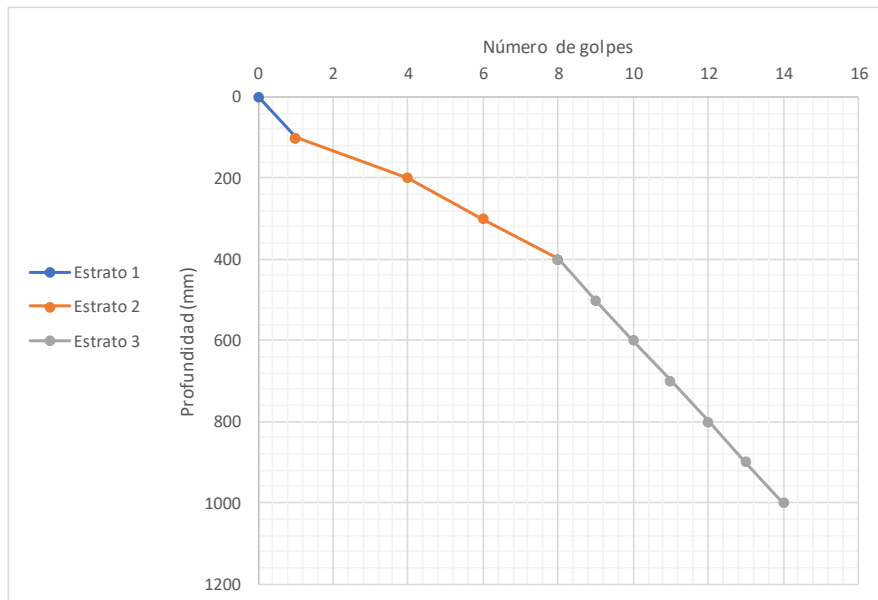
Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Septiembre 06 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

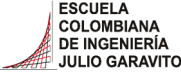

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
3	200	100	33	1	33
2	300	100	50	1	50
2	400	100	50	1	50
1	500	100	100	1	100
1	600	100	100	1	100
1	700	100	100	1	100
1	800	100	100	1	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 del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	100
--	------------

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13</p>	
---	---	---

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

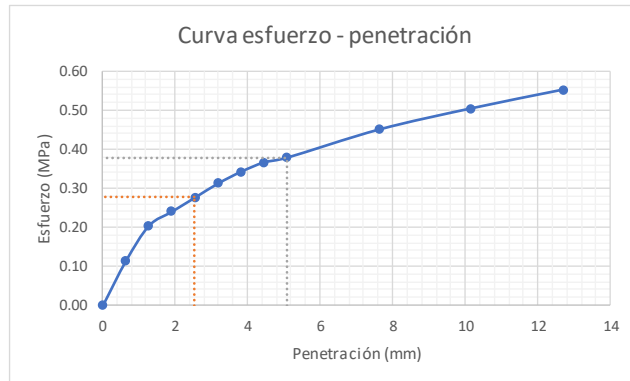
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

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 inmersión (%)	4.0

 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
---	---	--

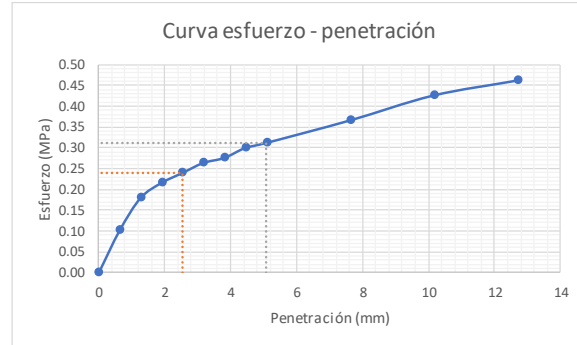
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90		
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos:	Septiembre 13 a 19 de 2019
		Profundidad (m):	0.50 - 0.70

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 (%)	3.5

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 INGENIERIA DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13



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
Altura (mm)	121.22	121.02	120.68	121.02
Diámetro (mm)	60.64	61.55	61.26	61.24
				Prom (mm)
				120.99
				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)	S ₃	Esfuerzo cíclico (kPa)	S _{cíclico}	Carga máxima real (N)	P _{max}	Carga cíclica real (N)	P _{cíclico}	Carga de contacto real (N)	F _{contacto}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{max r}	Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico r}	Esfuerzo real (kPa)	S _{contacto r}	Esfuerzo de contacto real (kPa)	S _{contacto r}	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	H ₂	Deformación resiliente promedio (mm)	H _{promedio}	Deformación resiliente unitaria	ε _r	Módulo resiliente (MPa)
0	41.4	41.4	24.8	77	71	6	26.20	24.16	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.00058	41.8	41.8	
1	41.4	41.4	12.4	28	26	2	9.53	8.85	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.00015	59.5	59.5	
2	41.4	41.4	24.8	69	63	6	23.48	21.44	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.00040	53.5	53.5	
3	41.4	41.4	37.3	116	106	10	39.47	36.07	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	0.087	0.087	0.088	0.088	0.088	0.088	0.00072	49.9	49.9	
4	41.4	41.4	49.7	135	120	15	45.93	40.83	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	0.124	0.124	0.125	0.125	0.125	0.125	0.00103	39.7	39.7	
5	41.4	41.4	62	183	164	19	62.27	55.80	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	0.177	0.177	0.178	0.178	0.178	0.178	0.00147	38.0	38.0	
6	27.6	27.6	12.4	29	27	2	9.87	9.19	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.00018	50.5	50.5	
7	27.6	27.6	24.8	75	70	5	25.52	23.82	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.00064	37.4	37.4	
8	27.6	27.6	37.3	118	108	10	36.75	36.75	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.00108	33.9	33.9	
9	27.6	27.6	49.7	138	124	14	46.95	42.19	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	0.152	0.152	0.153	0.153	0.153	0.153	0.00126	33.5	33.5	
10	27.6	27.6	62	182	164	18	61.93	55.80	6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	0.179	0.179	0.180	0.180	0.180	0.180	0.00148	37.6	37.6	
11	13.8	13.8	12.4	18	15	3	6.12	5.10	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.00009	56.1	56.1	
12	13.8	13.8	24.8	97	91	6	33.00	30.96	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	0.092	0.092	0.093	0.093	0.093	0.093	0.00076	40.5	40.5	
13	13.8	13.8	37.3	123	113	10	41.85	38.45	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.00099	38.8	38.8	
14	13.8	13.8	49.7	143	128	15	48.66	43.55	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	0.149	0.149	0.150	0.150	0.150	0.150	0.00124	35.2	35.2	
15	13.8	13.8	62	181	163	18	61.59	55.46	6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	6.12	0.192	0.192	0.193	0.193	0.193	0.193	0.00159	34.9	34.9	

Datos de humedad al inicio 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
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



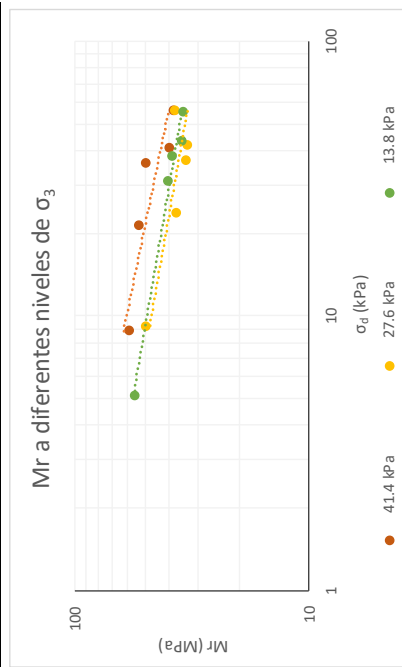
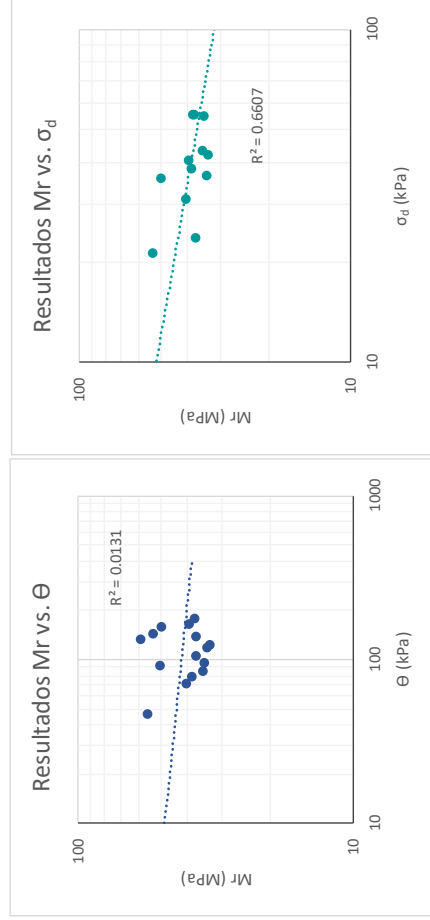
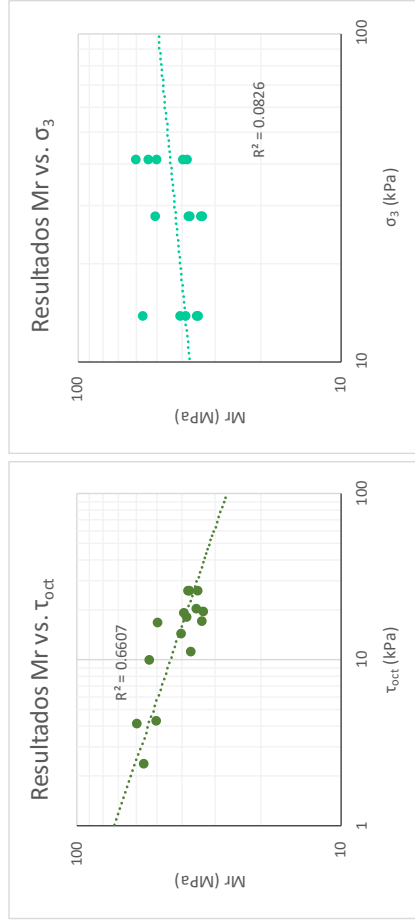
CENTRO DE ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS

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

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \quad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

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





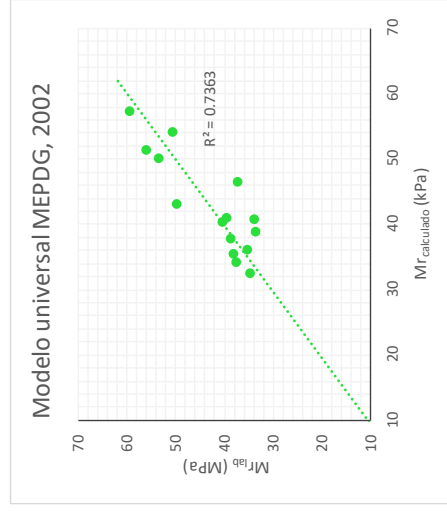
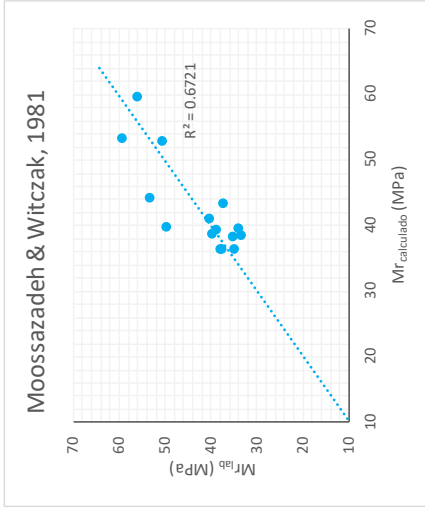
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13




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


Ciclo	Moossazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	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

$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$		$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	
k ₁	32.168	k ₁	0.604
k ₂	-0.207	k ₂	0.150
P _a (kPa)	102	k ₃	-2.777
		P _a (kPa)	102





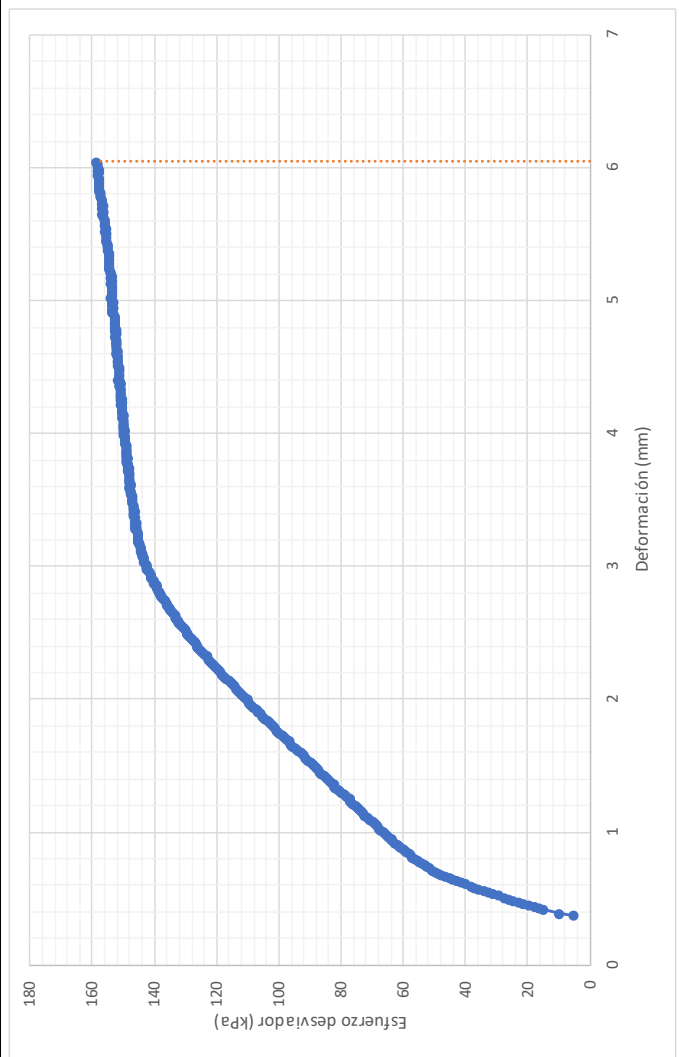
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



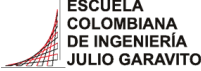

CENTRO DE ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS

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



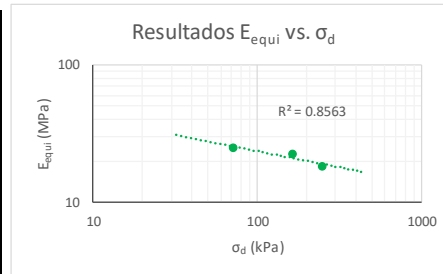
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.121
Máximo esfuerzo (kPa)	158.67
Máxima deformación (mm)	6.048
Máxima deformación (%)	4.999

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	
---	---	---

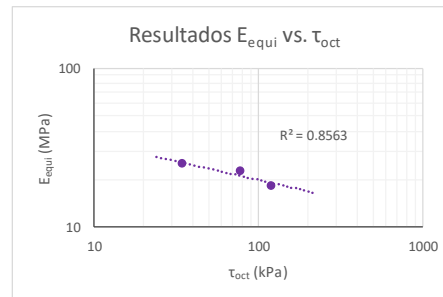
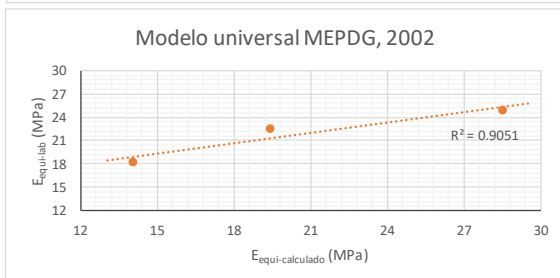
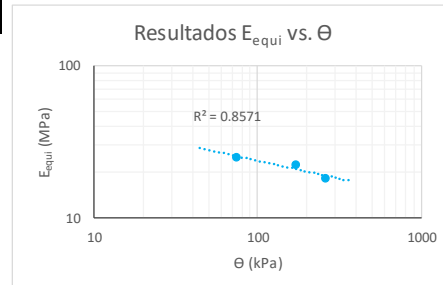
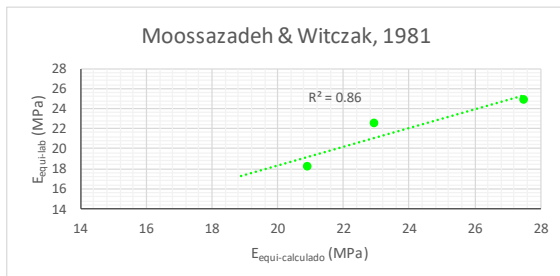
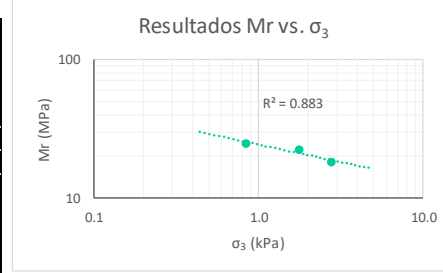
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90		
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos:	Septiembre 13 a 19 de 2019
		Profundidad (m):	0.50 - 0.70

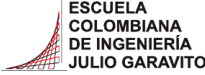

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	95
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Area del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.672	1.270	2.524
Carga máxima pistón (kg) P_{max}	16.587	34.881	54.501
Carga cíclica pistón (kg) P_{cíclico}	14.217	32.511	49.762
Carga de contacto pistón (kg) P_{contacto}	2.370	2.370	4.739
Esfuerzo máximo pistón (kPa) σ₁	0.084	0.177	0.276
Esfuerzo desviador pistón (MPa) σ_d	0.072	0.165	0.252
Esfuerzo confinamiento (MPa) σ₃	0.001	0.002	0.003
Cortante octaédrico (MPa) τ_{oct}	0.034	0.078	0.119
Invariante de esfuerzos (MPa) θ	0.075	0.170	0.261
Deformación elástica (mm) u	0.066	0.165	0.310
Módulo equivalente (MPa) E_{equi}	24.9	22.5	18.2

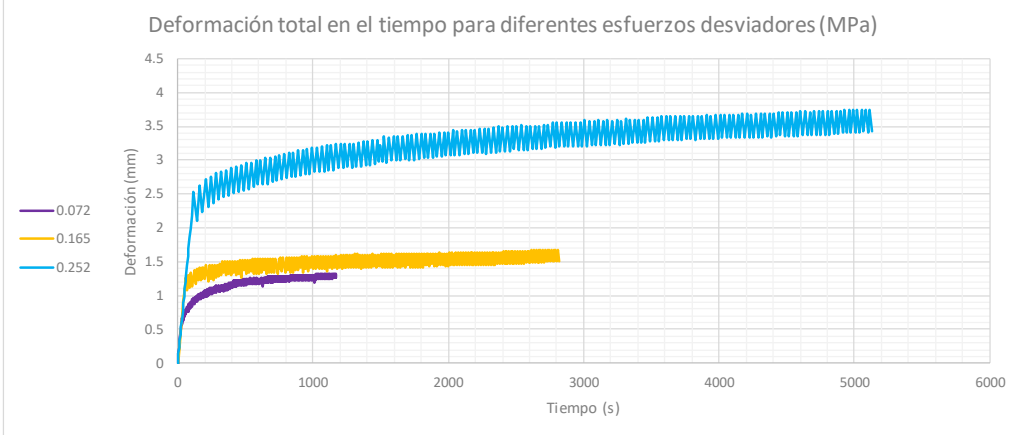


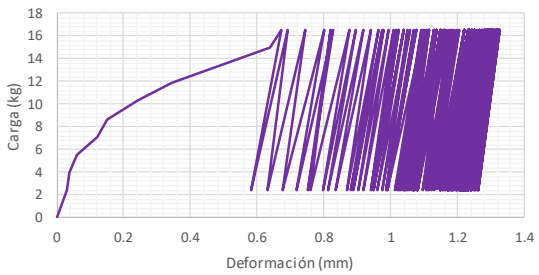
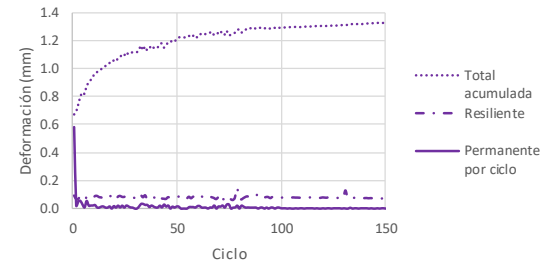
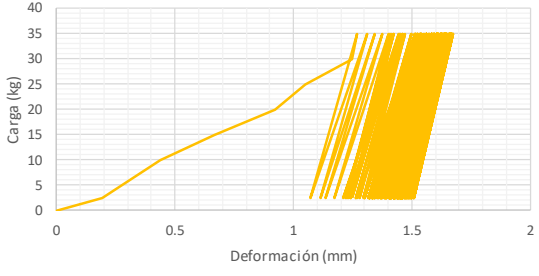
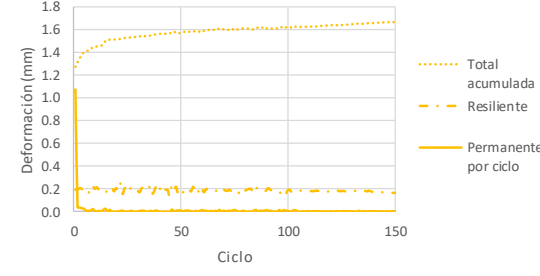
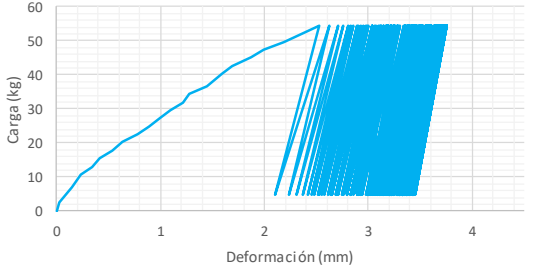
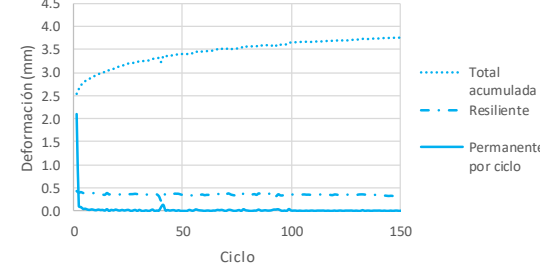
Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$		
k₁	25.458		k₁	0.536	
k₂	-0.219		k₂	0.220	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-2.025	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{ed}lab (MPa)	E_{eq}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{eq}lab (MPa)	E_{eq}cal (MPa)	Difer² (MPa)
24.9	27.47	6.6	24.9	28.51	13.1
22.5	22.92	0.2	22.5	19.44	9.4
18.2	20.88	7.4	18.2	14.05	16.8
	Σ	14.2		Σ	39.3

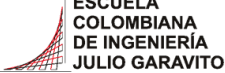



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

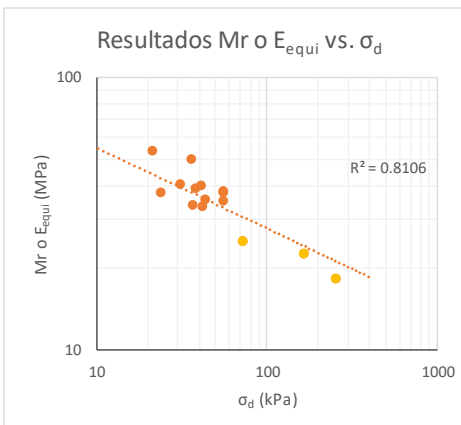
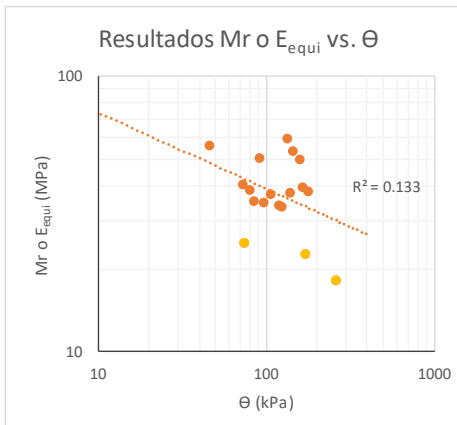
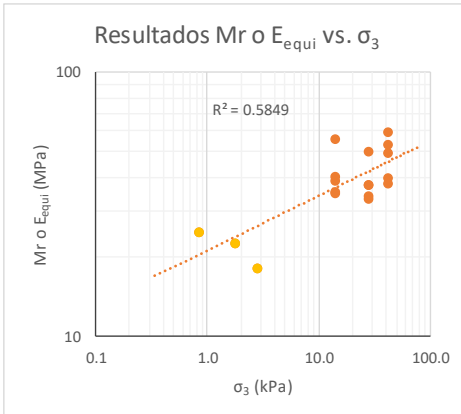
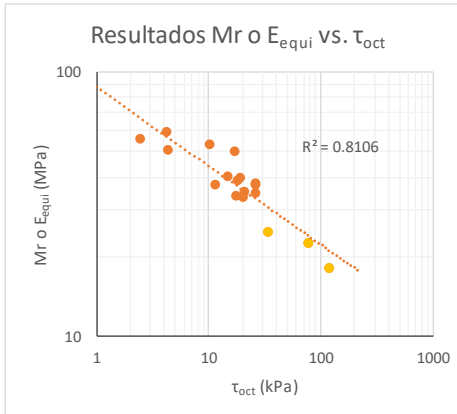




Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)
	
	
	

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	--	--

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

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	9.53	8.85	41.40	4.17	133.05	0.00015	59.46
	2	23.48	21.44	41.40	10.10	145.64	0.00040	53.47
	3	39.47	36.07	41.40	17.00	160.27	0.00072	49.87
	4	45.93	40.83	41.40	19.25	165.03	0.00103	39.68
	5	62.27	55.80	41.40	26.30	180.00	0.00147	38.03
	6	9.87	9.19	27.60	4.33	91.99	0.00018	50.52
	7	25.52	23.82	27.60	11.23	106.62	0.00064	37.42
	8	40.15	36.75	27.60	17.32	119.55	0.00108	33.94
	9	46.95	42.19	27.60	19.89	124.99	0.00126	33.47
	10	61.93	55.80	27.60	26.30	138.60	0.00148	37.61
	11	6.12	5.10	13.80	2.41	46.50	0.00009	56.13
	12	33.00	30.96	13.80	14.60	72.36	0.00076	40.50
	13	41.85	38.45	13.80	18.12	79.85	0.00099	38.76
	14	48.66	43.55	13.80	20.53	84.95	0.00124	35.25
	15	61.59	55.46	13.80	26.14	96.86	0.00159	34.86
cCBR	16	84.08	72.06	0.84	33.97	74.59	-	24.90
	17	176.81	164.80	1.77	77.69	170.10	-	22.51
	18	276.26	252.24	2.76	118.91	260.53	-	18.15



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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 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 (°C)	16
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99895
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	84.29

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (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/m³)	13.41

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

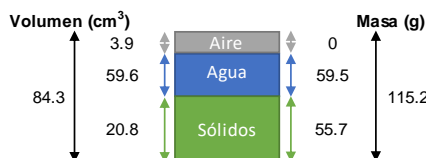
4. Calibración del picnómetro

Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°C)	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

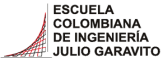

*Calibración realizada en agosto de 2018

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	48.42
Temperatura de ensayo (°C)	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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	
---	--	---

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

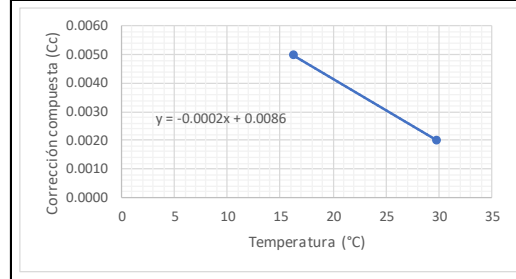
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

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 (°C)	16.2	29.8
Lectura en solución de hexametáfosfato	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 - G _s	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

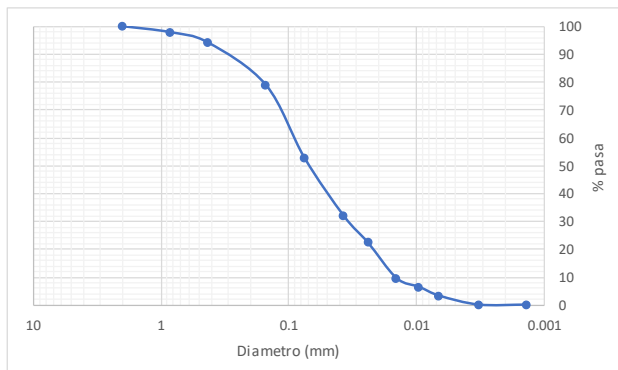
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	8:23
--	-------------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
8:25	2	1.015	16.6	0.0049	1.010	31.79	0.01412	13.7	0.0369
8:28	5	1.012	16.6	0.0049	1.007	22.25	0.01412	14.4	0.0240
8:38	15	1.008	16.8	0.0049	1.003	9.54	0.01412	15.5	0.0143
8:53	30	1.006	22.4	0.0036	1.002	6.36	0.01311	15.8	0.0095
9:23	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
8:23	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)

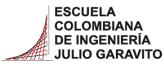

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	50.2
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	23.8
% Retenido en tamiz No 200	47.4
% Pasa el tamiz No 200	52.6

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)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	6
Fina	0.425 - 0.075	41
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	53

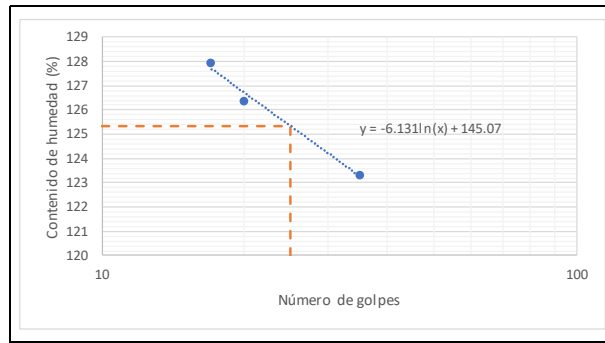
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	47
Finos	< 0.075	53

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

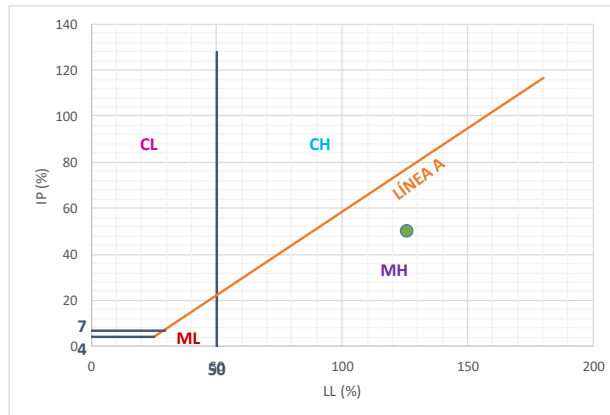
Ensayo	1	2
Número recipiente	12	64
Masa del recipiente (g)	9.653	10.999
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	15.6	17.248
Masa recipiente + suelo seco (g)	13.032	14.587
Contenido de humedad (%)	76	74

LP (%)	75
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	50
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH
---------------------------	-----------

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

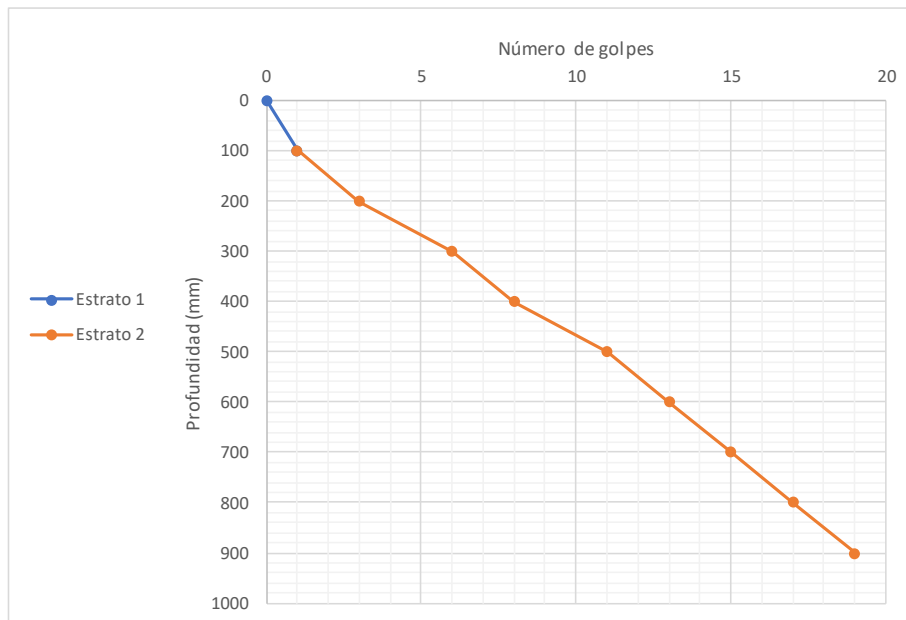
Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Septiembre 06 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

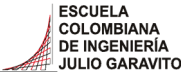

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
2	200	100	50	1	50
3	300	100	33	1	33
2	400	100	50	1	50
3	500	100	33	1	33
2	600	100	50	1	50
2	700	100	50	1	50
2	800	100	50	1	50
2	900	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 del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	44
--	-----------

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

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

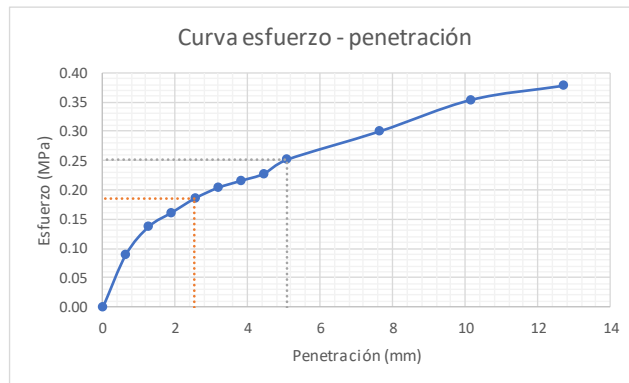
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

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 inmersión (%)	2.7

 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
---	---	--

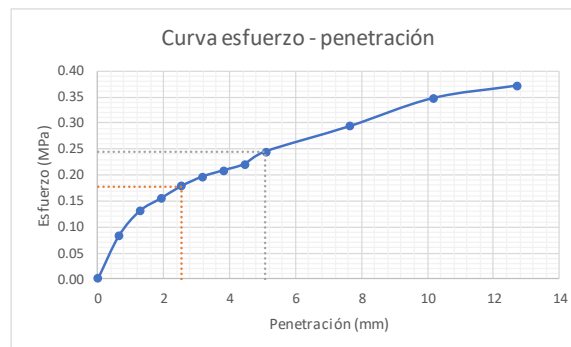
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos:	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	Profundidad (m):	0.60 - 0.80

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 (%)	2.6

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
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:	Sept. 27 a Oct. 03 de 2019
		Profundidad (m):	0.60 - 0.80


Datos de la muestra antes del ensayo				
Dato	1	2	3	4
Altura (mm)	127.46	127.08	127.44	127.98
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)	S _{cíclico}	Carga máxima real (N)	P _{cíclico} (N)	Carga cíclica real (N)	P _{contacto} real (N)	Carga de contacto real (N)	S _{máx r} real (kPa)	S _{cíclico r} real (kPa)	S _{cíclico r} real (kPa)	S _{contacto r} real (kPa)	Esfuerzo de contacto real (kPa)	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	H ₂	Deformación resiliente promedio (mm)	H _{promedio}	Deformación resiliente unitaria ϵ_r	Módulo resiliente (MPa)
0		41.4	24.8	80	73	73	7	26.61	24.28	2.33	0.072	2.33	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.00056	43.0	43.0
1		41.4	12.4	43	41	41	2	14.30	13.64	0.67	0.041	0.67	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.00032	42.4	42.4
2		41.4	24.8	70	63	63	7	23.28	20.96	2.33	0.072	2.33	0.072	0.071	0.071	0.071	0.072	0.072	0.00056	37.4	37.4
3		41.4	37.3	113	103	103	10	37.59	34.26	3.33	0.145	3.33	0.145	0.144	0.144	0.145	0.145	0.145	0.00113	30.2	30.2
4		41.4	49.7	142	127	127	15	47.23	42.24	4.99	0.184	4.99	0.184	0.182	0.182	0.183	0.183	0.183	0.00144	29.4	29.4
5		41.4	62	238	220	220	18	79.16	73.18	5.99	0.470	5.99	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470	0.00369	19.8	19.8
6		27.6	12.4	40	38	38	2	13.30	12.64	0.67	0.038	0.67	0.038	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.00030	41.9	41.9
7		27.6	24.8	77	71	71	6	25.61	23.62	2.00	0.084	2.00	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.00066	35.8	35.8
8		27.6	37.3	117	106	106	11	38.92	35.26	3.66	0.146	3.66	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.00115	30.8	30.8
9		27.6	49.7	167	152	152	15	55.55	50.56	4.99	0.226	4.99	0.226	0.226	0.226	0.226	0.226	0.226	0.00177	28.5	28.5
10		27.6	62	213	193	193	20	70.85	64.20	6.65	0.291	6.65	0.291	0.290	0.290	0.291	0.291	0.291	0.00228	28.2	28.2
11		13.8	12.4	40	38	38	2	13.30	12.64	0.67	0.038	0.67	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.00030	42.4	42.4
12		13.8	24.8	78	71	71	7	25.94	23.62	2.33	0.074	2.33	0.074	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.00058	40.4	40.4
13		13.8	37.3	119	109	109	10	39.58	36.26	3.33	0.145	3.33	0.145	0.145	0.145	0.145	0.145	0.145	0.00114	31.9	31.9
14		13.8	49.7	153	139	139	14	50.89	46.23	4.66	0.229	4.66	0.229	0.229	0.229	0.229	0.229	0.229	0.00180	25.7	25.7
15		13.8	62	182	163	163	19	60.54	54.22	6.32	0.287	6.32	0.287	0.286	0.286	0.287	0.287	0.287	0.00225	24.1	24.1

Datos de humedad al inicio 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 (%)	106.19



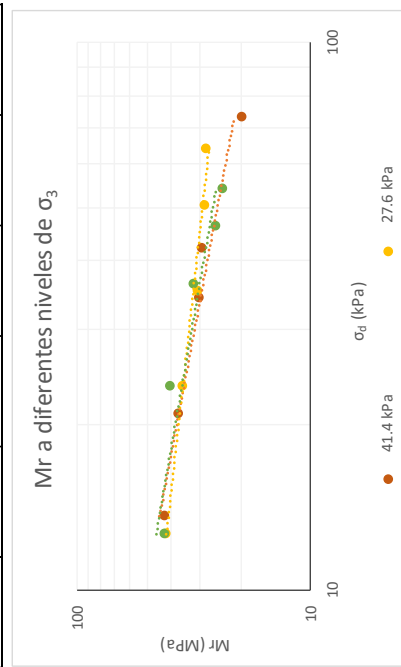
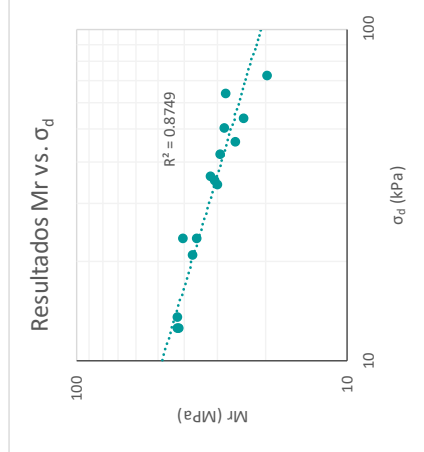
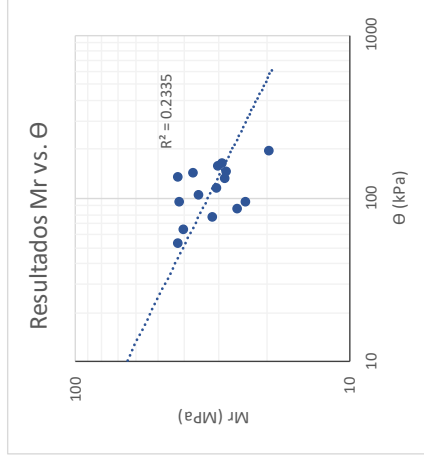
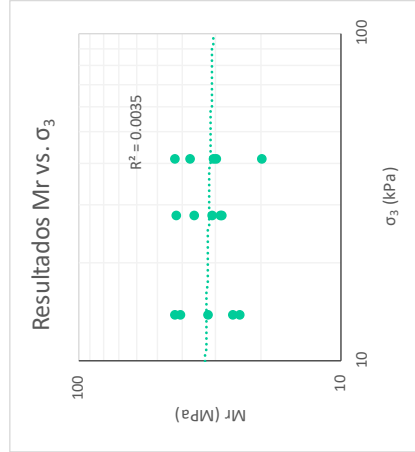
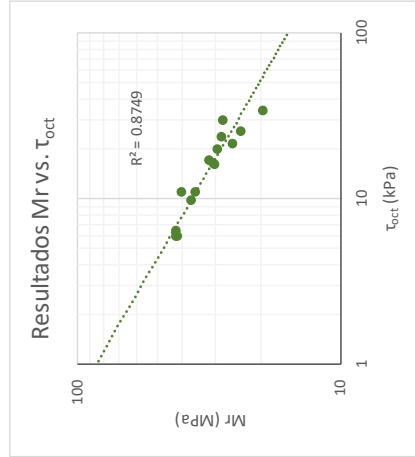
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

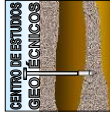
Identificación (Descripción): Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena	
Procedencia (Localización): Cra 72 No. 181-90	
Fecha exploración: Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos: Sep. 27 a Oct. 03 de 2019
	Profundidad (m): 0.60 - 0.80

Ecuaciones					
$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d$ $\theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$					
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
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



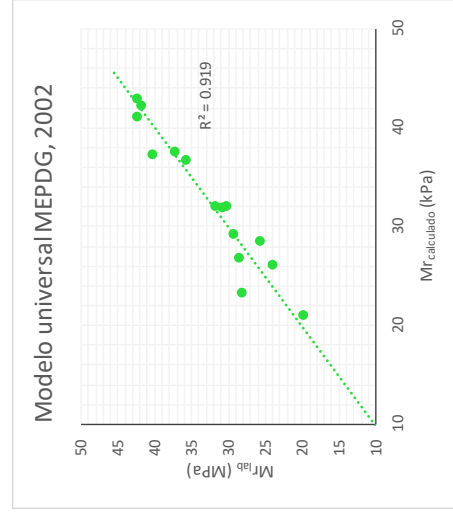
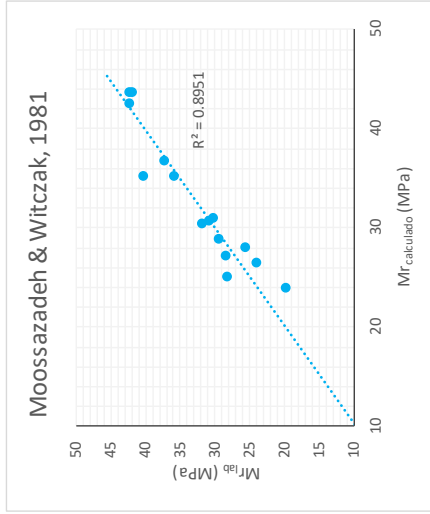
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena
Procedencia (Localización):	Cra 72 No. 181-90
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019
Fecha ensayos:	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019
Profundidad (m):	0.60 - 0.80


Ciclo	Moossazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	Mr _{tab} (MPa)	Mr _{cal} (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)	Mr _{tab} (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

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$$

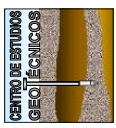
$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{T_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

k ₁	21.396	k ₁	0.485
k ₂	-0.342	k ₂	-0.031
P _a (kPa)	102	k ₃	-2.870
		P _a (kPa)	102





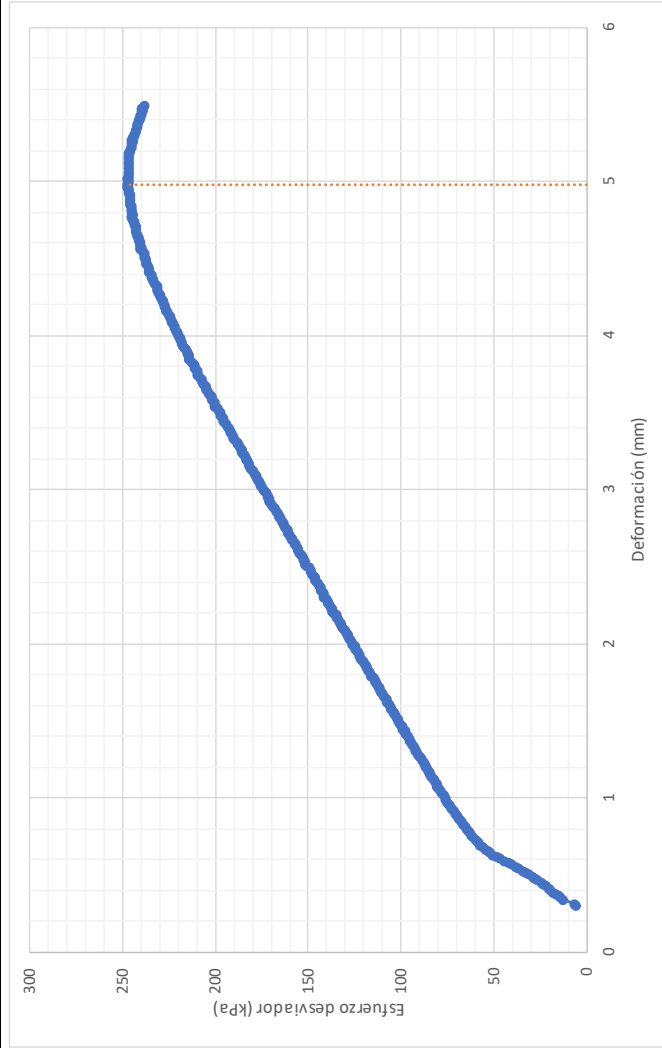
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



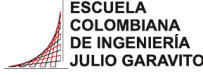

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

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



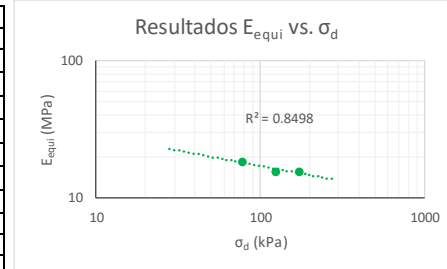
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.127
Máximo esfuerzo (kPa)	247.41
Máxima deformación (mm)	4.984
Máxima deformación (%)	3.907

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

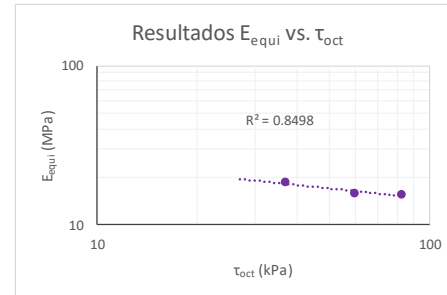
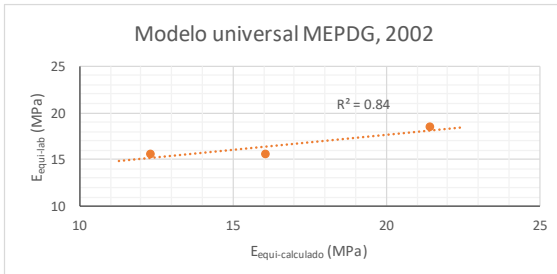
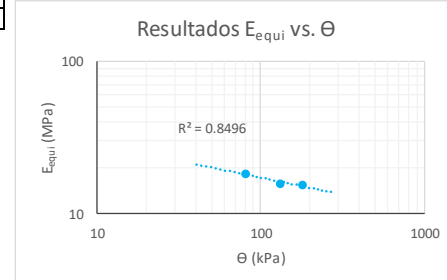
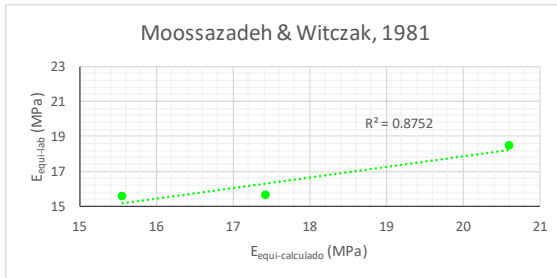
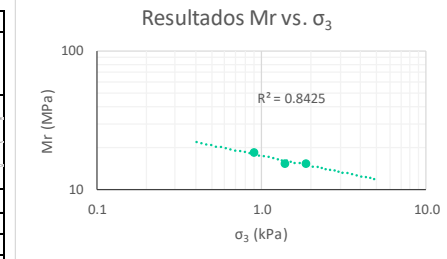
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Sep. 27 a Oct. 03 de 2019</td> <td style="width: 50%;">Profundidad (m): 0.60 - 0.80</td> </tr> </table>	Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	Profundidad (m): 0.60 - 0.80
Sep. 27 a Oct. 03 de 2019	Profundidad (m): 0.60 - 0.80				

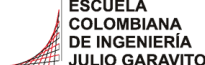

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	107
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.621	1.273	2.553
Carga máxima pistón (kg) P_{max}	17.772	27.250	36.730
Carga cíclica pistón (kg) P_{cíclico}	15.402	24.88	34.36
Carga de contacto pistón (kg) P_{contacto}	2.370	2.370	2.370
Esfuerzo máximo pistón (kPa) σ₁	0.090	0.138	0.186
Esfuerzo desviador pistón (MPa) σ_d	0.078	0.126	0.174
Esfuerzo confinamiento (MPa) σ₃	0.001	0.001	0.002
Cortante octaédrico (MPa) τ_{oct}	0.037	0.059	0.082
Invariante de esfuerzos (MPa) θ	0.081	0.130	0.180
Deformación elástica (mm) u	0.096	0.181	0.250
Módulo equivalente (MPa) E_{equi}	18.4	15.6	15.6

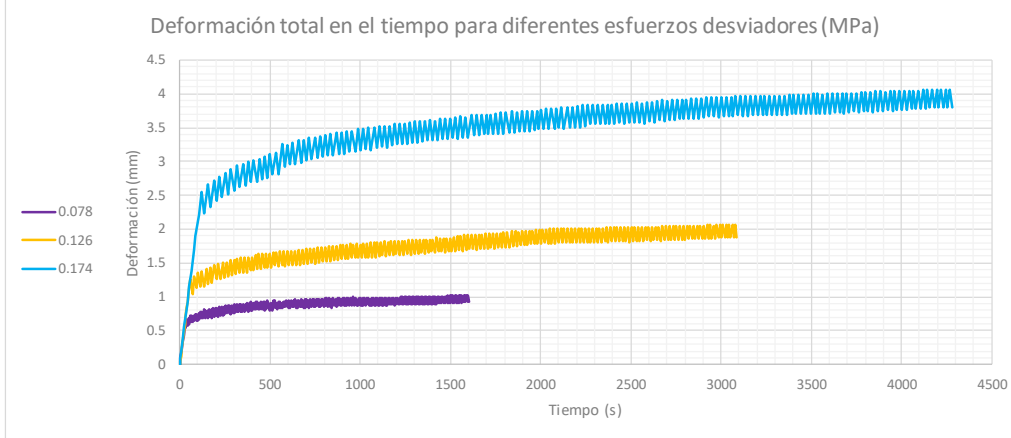


Moosazadeh & Witzcak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
k₁	18.760		k₁	0.475	
k₂	-0.350		k₂	0.190	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-2.505	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
18.4	20.60	4.7	18.4	21.42	8.9
15.6	17.42	3.3	15.6	16.06	0.2
15.6	15.56	0.0	15.6	12.29	10.8
	Σ	7.9		Σ	19.9

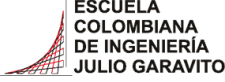



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

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

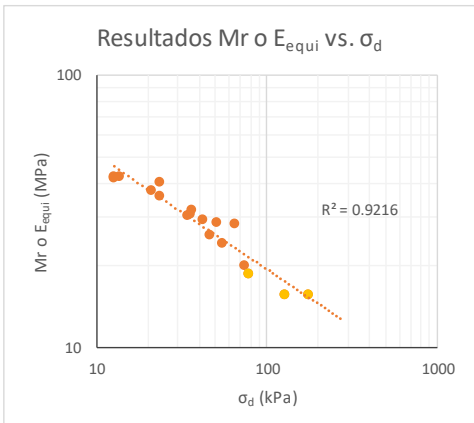
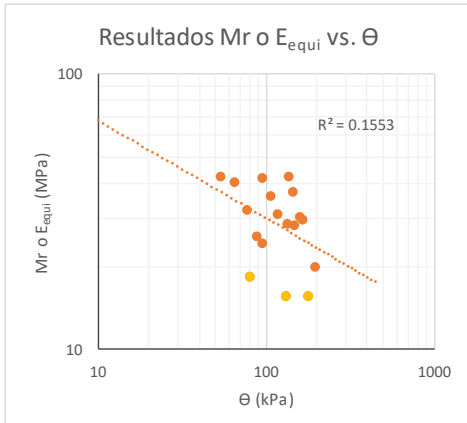
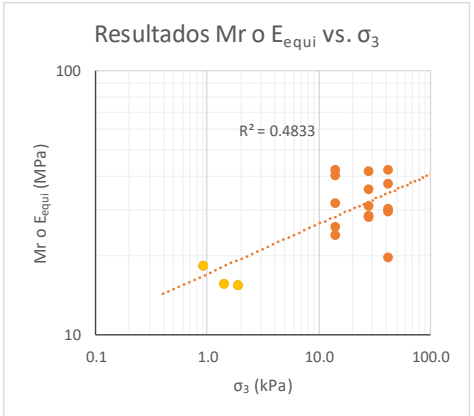
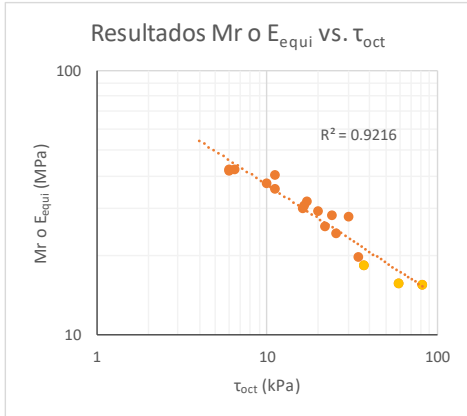


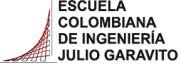

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	--	--

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

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	14.30	13.64	41.40	6.43	137.84	0.00032	42.41
	2	23.28	20.96	41.40	9.88	145.16	0.00056	37.36
	3	37.59	34.26	41.40	16.15	158.46	0.00113	30.23
	4	47.23	42.24	41.40	19.91	166.44	0.00144	29.43
	5	79.16	73.18	41.40	34.50	197.38	0.00369	19.85
	6	13.30	12.64	27.60	5.96	95.44	0.00030	41.86
	7	25.61	23.62	27.60	11.13	106.42	0.00066	35.84
	8	38.92	35.26	27.60	16.62	118.06	0.00115	30.79
	9	55.55	50.56	27.60	23.83	133.36	0.00177	28.52
	10	70.85	64.20	27.60	30.26	147.00	0.00228	28.17
	11	13.30	12.64	13.80	5.96	54.04	0.00030	42.41
	12	25.94	23.62	13.80	11.13	65.02	0.00058	40.41
	13	39.58	36.26	13.80	17.09	77.66	0.00114	31.88
	14	50.89	46.23	13.80	21.80	87.63	0.00180	25.74
	15	60.54	54.22	13.80	25.56	95.62	0.00225	24.13
cCBR	16	90.08	78.07	0.90	36.80	80.77	-	18.44
	17	138.13	126.11	1.38	59.45	130.26	-	15.61
	18	186.18	174.17	1.86	82.10	179.75	-	15.57



	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	--	---

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 del contenido de humedad

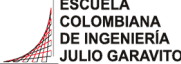

Masa del recipiente (g)	16.42
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	69.69
Masa recipiente + suelo seco (g)	42.61
Contenido de humedad (%)	103.4

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 (°C)	15.4
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99904
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	240.09

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (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/m³)	13.53

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	--	---

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

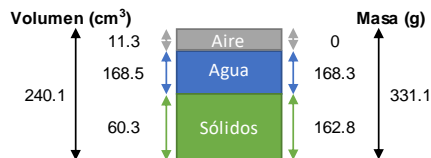
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	143.24	641.99			499.56
Desv.	0.00	0.34			0.02

*Calibración realizada en agosto de 2018

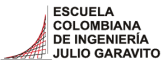

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	48
Temperatura de ensayo (°C)	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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	

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

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 - G _s	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

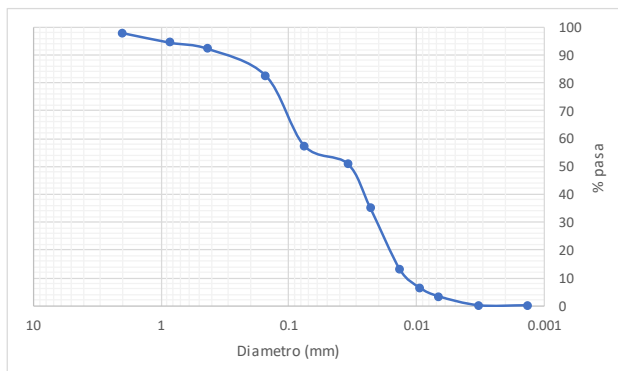
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	8:30
--	------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
8:32	2	1.020	17.1	0.0040	1.016	50.82	0.01394	12.1	0.0343
8:35	5	1.015	17.1	0.0040	1.011	34.94	0.01394	13.4	0.0228
8:45	15	1.007	21.2	0.0032	1.004	12.71	0.01326	15.2	0.0134
9:00	30	1.005	23.2	0.0029	1.002	6.35	0.01296	15.8	0.0094
9:30	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
8:30	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



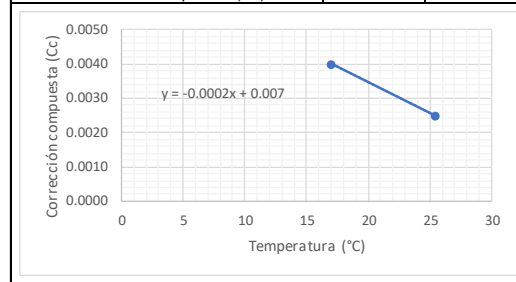
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas		
Gruesa	4.75 - 2	2
Media	2 - 0.425	6
Fina	0.425 - 0.075	35
Finos		
Arcilla - Limo	> 0.075	57



Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	43
Finos	< 0.075	57

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H
----------------------	------

Rango de temperaturas (°C)	17	25.4
Lectura en solución de hexametáfosfato	1.0040	1.0025
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0025

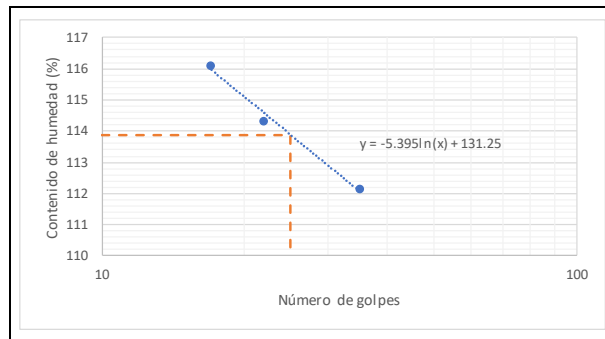


 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - CLASIFICACIÓN SUCS INV - E- 125/126/181</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

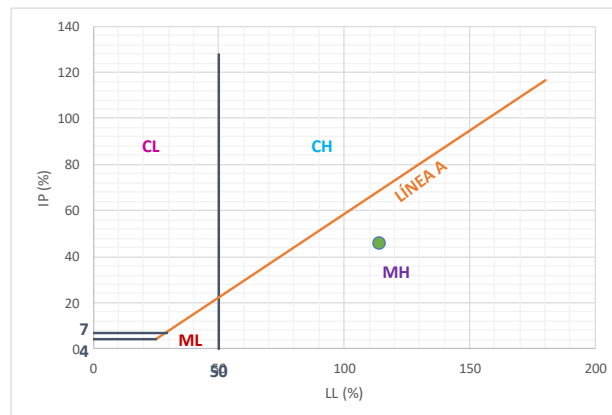
Ensayo	1	2
Número recipiente	64	133
Masa del recipiente (g)	10.999	7.168
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	18.351	13.982
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.378	11.236
Contenido de humedad (%)	68	68

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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13	
---	--	---

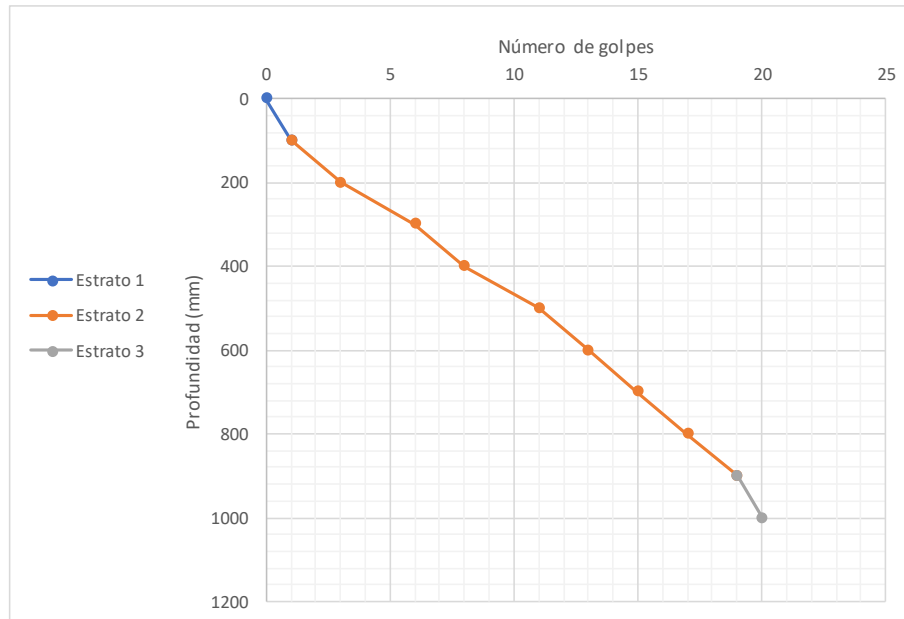
Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Septiembre 06 de 2019

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

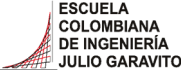

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
2	200	100	50	1	50
3	300	100	33	1	33
2	400	100	50	1	50
3	500	100	33	1	33
2	600	100	50	1	50
2	700	100	50	1	50
2	800	100	50	1	50
2	900	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	100	100
2	44	800
3	100	100



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	44
--	-----------

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13</p>	
---	--	---

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

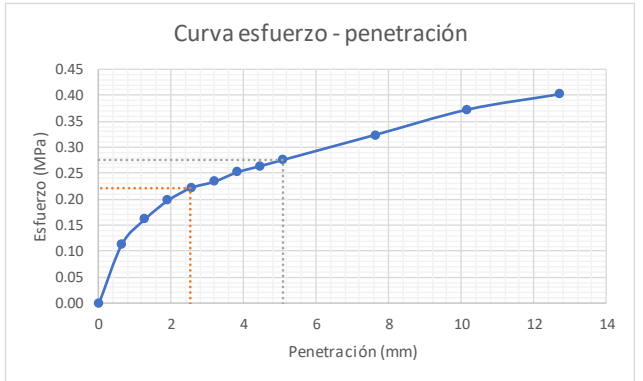
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL



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



 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
---	---	--

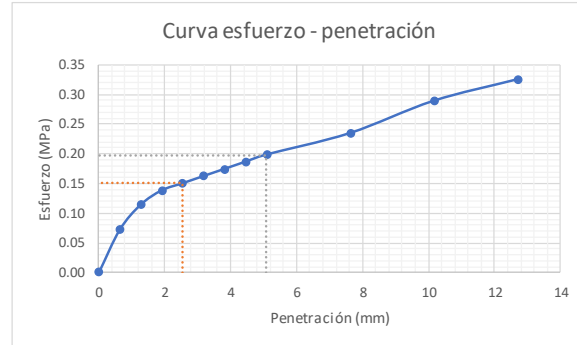
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena				
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90				
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos:	Octubre 04 a 10 de 2019	Profundidad (m):	0.40 - 0.60

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 (%)	2.2

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 INGENIERIA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



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
Altura (mm)	126.56	126.34	126.35	126.55
Diámetro (mm)	62.16	61.71	61.6	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)	S _{cíclico}	Carga máxima real (N)	P _{cíclico}	Carga cíclica real (N)	P _{contacto}	Carga de contacto real (N)	S _{max.r}	S _{max.r}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{cíclico.r}	Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico.r}	Esfuerzo real (kPa)	S _{contacto.r}	Esfuerzo de contacto real (kPa)	Deformación resiliante LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliante LVDT2 (mm)	H ₂	Deformación resiliante prom. (mm)	H _{promedio}	Deformación resiliante unitaria	E _r
0		41.4	24.8	73	67	6	24.34	22.34	2.00	0.082	0.079	0.081	0.00064	35.1											
1		41.4	12.4	39	38	1	13.00	12.67	0.33	0.044	0.044	0.044	0.00035	36.4											
2		41.4	24.8	63	57	6	21.01	19.01	2.00	0.070	0.069	0.070	0.00055	34.6											
3		41.4	37.3	109	99	10	36.34	33.01	3.33	0.136	0.136	0.136	0.00107	30.7											
4		41.4	49.7	140	125	15	46.68	41.68	5.00	0.178	0.178	0.178	0.00141	29.6											
5		41.4	62	167	147	20	55.68	49.01	6.67	0.220	0.221	0.221	0.00174	28.1											
6		27.6	12.4	30	28	2	10.00	9.34	0.67	0.037	0.037	0.037	0.00029	31.9											
7		27.6	24.8	76	69	7	25.34	23.01	2.33	0.099	0.099	0.099	0.00078	29.4											
8		27.6	37.3	111	102	9	37.01	34.01	3.00	0.151	0.152	0.152	0.00120	28.4											
9		27.6	49.7	142	128	14	47.35	42.68	4.67	0.181	0.181	0.181	0.00143	29.8											
10		27.6	62	184	165	19	61.35	55.02	6.34	0.260	0.260	0.260	0.00205	26.8											
11		13.8	12.4	41	39	2	13.67	13.00	0.67	0.053	0.052	0.053	0.00041	31.3											
12		13.8	24.8	76	70	6	25.34	23.34	2.00	0.103	0.103	0.103	0.00081	28.7											
13		13.8	37.3	120	109	11	40.01	36.34	3.67	0.166	0.167	0.167	0.00132	27.6											
14		13.8	49.7	152	137	15	50.68	45.68	5.00	0.193	0.193	0.193	0.00153	30.0											
15		13.8	62	174	156	18	58.02	52.01	6.00	0.249	0.248	0.249	0.00196	26.5											

Datos de humedad al inicio 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

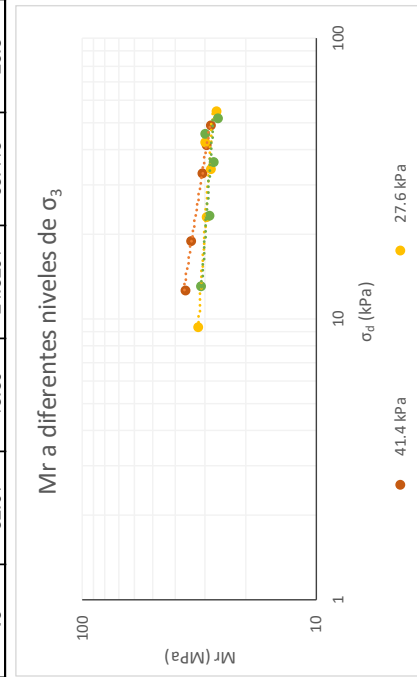
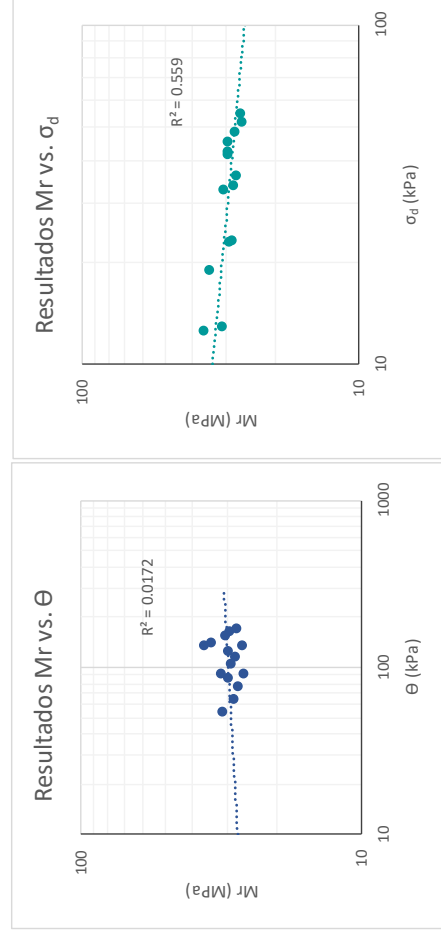
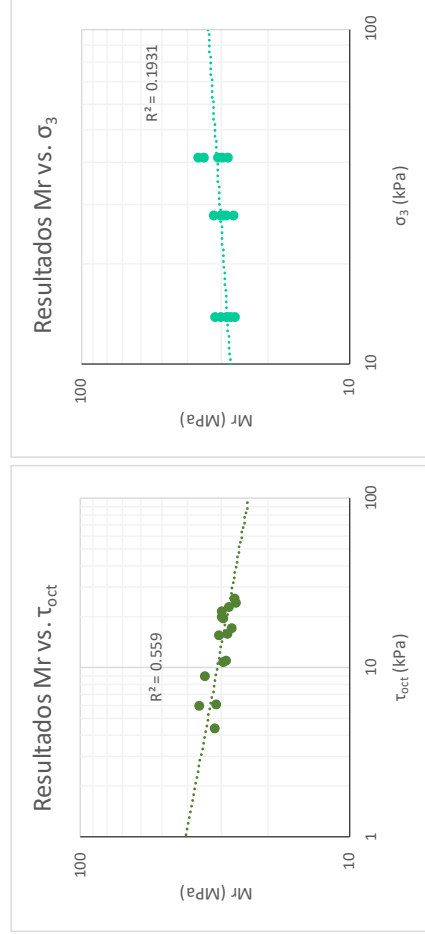


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13



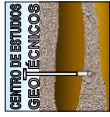
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No. 181-90		
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos:	Octubre 04 a 10 de 2019
Profundidad (m):	0.40 - 0.60		

Ciclo	$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d$			$\theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$		
	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Mr (MPa)
1	12.67	41.40	5.9728	136.870	36.4	36.4
2	19.01	41.40	8.9593	143.205	34.6	34.6
3	33.01	41.40	15.5608	157.209	30.7	30.7
4	41.68	41.40	19.6475	165.879	29.6	29.6
5	49.01	41.40	23.1055	173.214	28.1	28.1
6	9.34	27.60	4.4010	92.136	31.9	31.9
7	23.01	27.60	10.8454	105.807	29.4	29.4
8	34.01	27.60	16.0324	116.810	28.4	28.4
9	42.68	27.60	20.1190	125.479	29.8	29.8
10	55.02	27.60	25.9347	137.816	26.8	26.8
11	13.00	13.80	6.1300	54.404	31.3	31.3
12	23.34	13.80	11.0026	64.740	28.7	28.7
13	36.34	13.80	17.1326	77.744	27.6	27.6
14	45.68	13.80	21.5337	87.080	30.0	30.0
15	52.01	13.80	24.5201	93.415	26.5	26.5

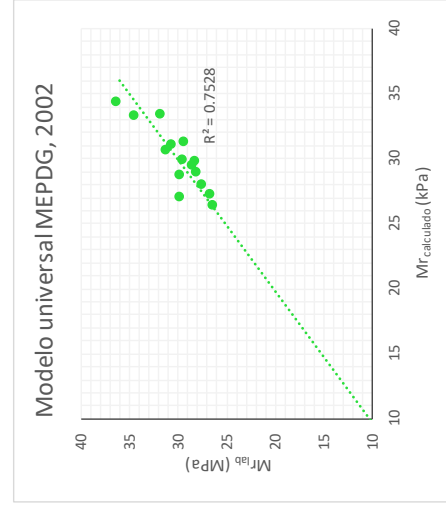
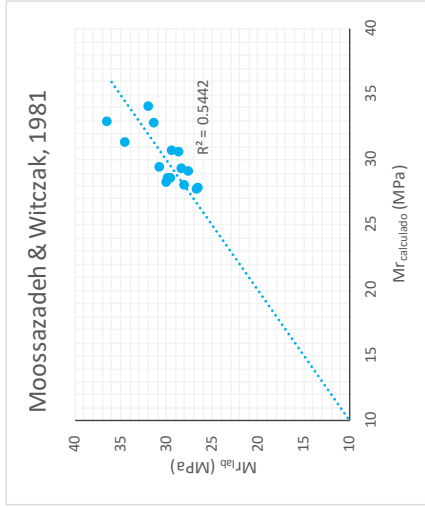




ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13



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




Ciclo	Moosazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	$M_{r_{obs}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (Mpa)	$M_{r_{obs}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (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

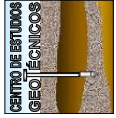
$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$$

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

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



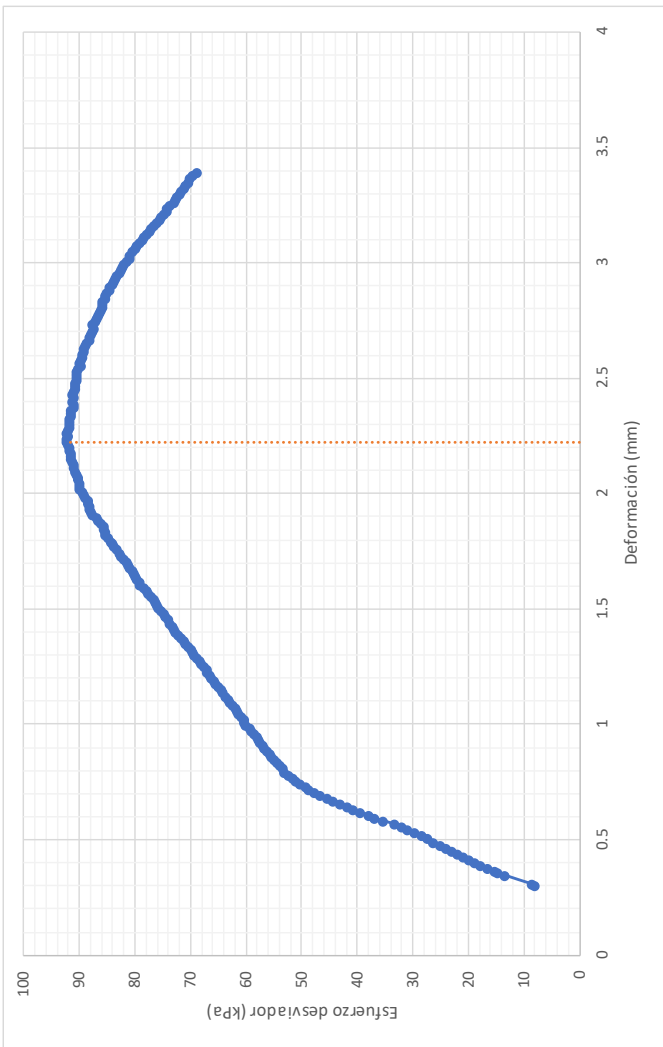
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



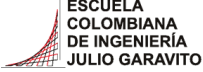

CENTRO DE ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS

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



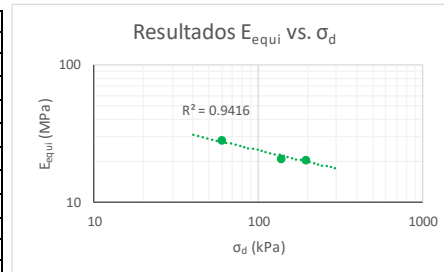
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.127
Máximo esfuerzo (kPa)	92.38
Máxima deformación (mm)	2.225
Máxima deformación (%)	1.758

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

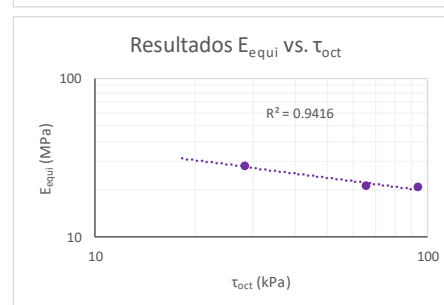
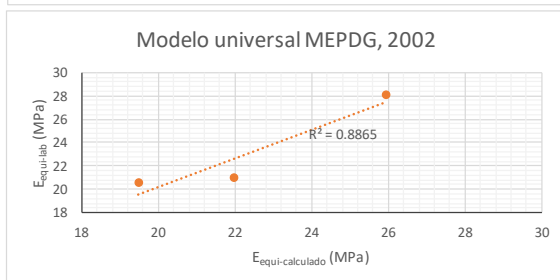
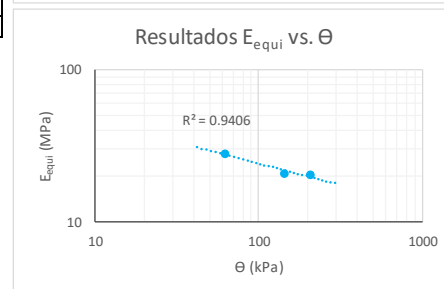
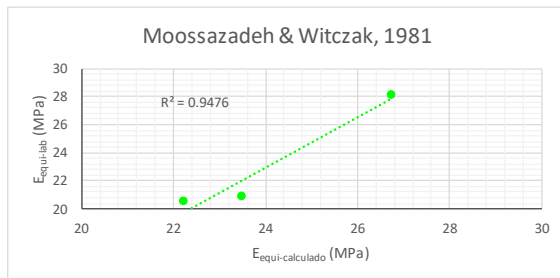
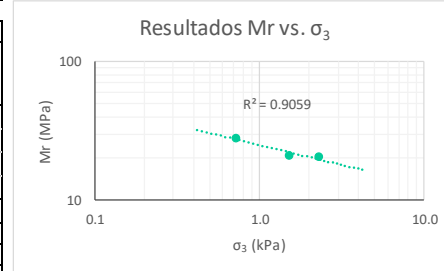
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con manchas negras y presencia importante de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90		
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos:	Octubre 04 a 10 de 2019
		Profundidad (m):	0.40 - 0.60

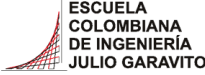

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	103
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.643	1.277	2.535
Carga máxima pistón (kg) P_{max}	14.218	29.620	45.022
Carga cíclica pistón (kg) P_{cíclico}	11.848	27.25	39.098
Carga de contacto pistón (kg) P_{contacto}	2.370	2.370	5.924
Esfuerzo máximo pistón (kPa) σ₁	0.072	0.150	0.228
Esfuerzo desviador pistón (MPa) σ_d	0.060	0.138	0.198
Esfuerzo confinamiento (MPa) σ₃	0.001	0.002	0.002
Cortante octaédrico (MPa) τ_{oct}	0.028	0.065	0.093
Invariante de esfuerzos (MPa) θ	0.062	0.143	0.205
Deformación elástica (mm) u	0.049	0.149	0.216
Módulo equivalente (MPa) E_{equi}	28.1	20.9	20.5

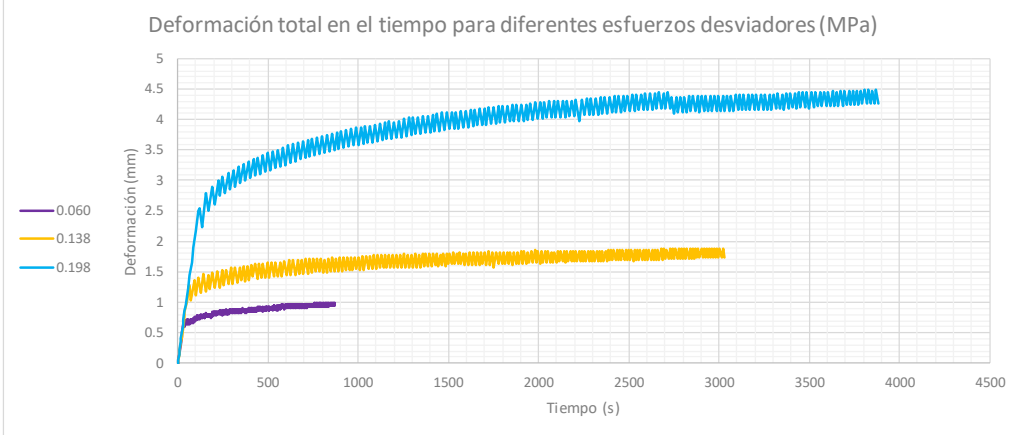


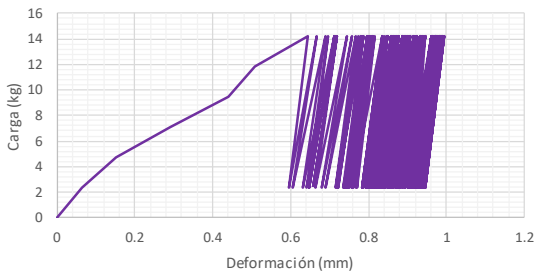
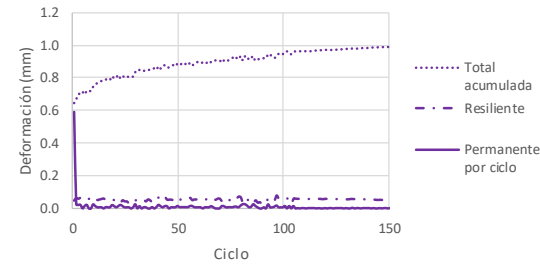
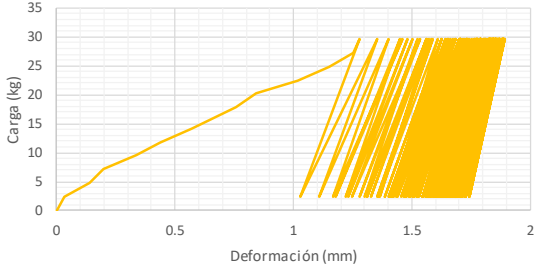
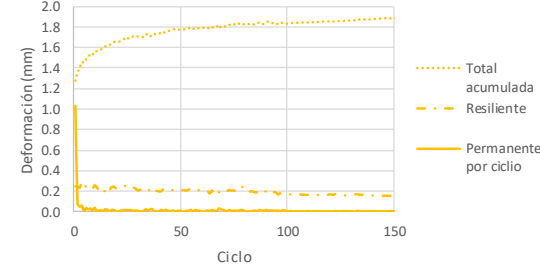
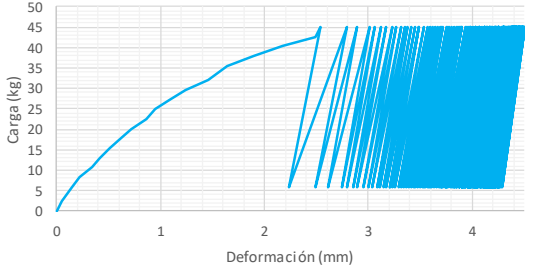
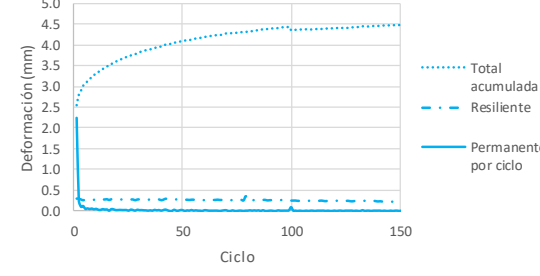
Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
k₁	24.613		k₁	0.340	
k₂	-0.155		k₂	0.096	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-0.990	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
28.1	26.72	1.8	28.1	25.95	4.5
20.9	23.48	6.6	20.9	21.97	1.1
20.5	22.21	2.8	20.5	19.48	1.1
	Σ	11.2		Σ	6.7

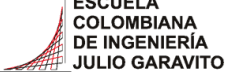



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

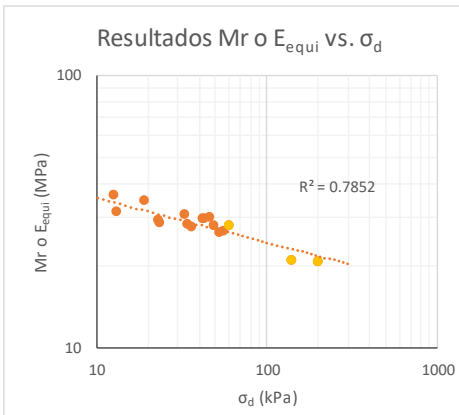
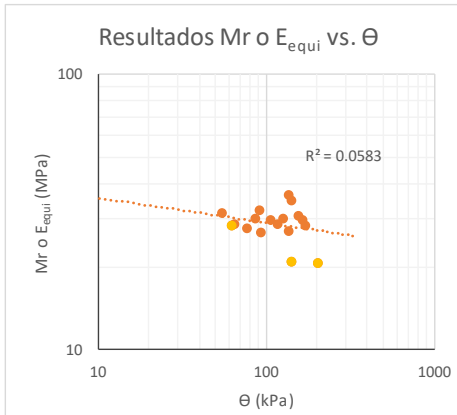
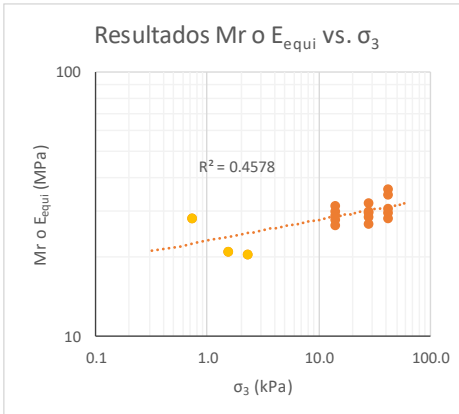
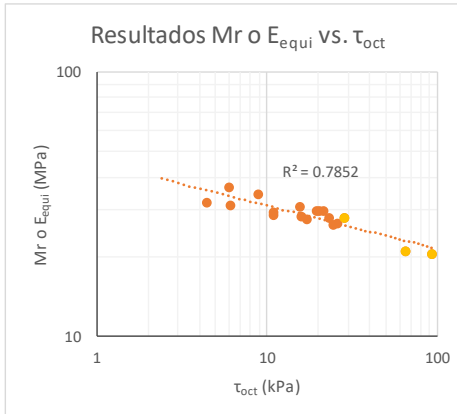




Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)
	
	
	

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	--	--

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

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	13.00	12.67	41.40	5.97	136.87	0.00035	36.44
	2	21.01	19.01	41.40	8.96	143.21	0.00055	34.61
	3	36.34	33.01	41.40	15.56	157.21	0.00107	30.72
	4	46.68	41.68	41.40	19.65	165.88	0.00141	29.63
	5	55.68	49.01	41.40	23.11	173.21	0.00174	28.13
	6	10.00	9.34	27.60	4.40	92.14	0.00029	31.93
	7	25.34	23.01	27.60	10.85	105.81	0.00078	29.41
	8	37.01	34.01	27.60	16.03	116.81	0.00120	28.41
	9	47.35	42.68	27.60	20.12	125.48	0.00143	29.84
	10	61.35	55.02	27.60	25.93	137.82	0.00205	26.78
	11	13.67	13.00	13.80	6.13	54.40	0.00041	31.35
	12	25.34	23.34	13.80	11.00	64.74	0.00081	28.68
	13	40.01	36.34	13.80	17.13	77.74	0.00132	27.62
	14	50.68	45.68	13.80	21.53	87.08	0.00153	29.95
	15	58.02	52.01	13.80	24.52	93.41	0.00196	26.49
cCBR	16	72.07	60.06	0.72	28.31	62.22	-	28.07
	17	150.14	138.13	1.50	65.11	142.63	-	20.92
	18	228.21	198.18	2.28	93.43	205.03	-	20.52



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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 16 a 20 de 2019	Profundidad (m):	0.35 - 0.65



1. Determinación del contenido de humedad



Masa del recipiente (g)	7.04
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	22.34
Masa recipiente + suelo seco (g)	15.15
Contenido de humedad (%)	88.7

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	223
Masa de la muestra parafinada (g)	233.7
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	58.2
Temperatura del agua (°C)	21.6
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99786
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	164.37

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	223
Volumen de la muestra (cm ³)	164.37
Densidad de la muestra (gr/cm ³)	1.36
Peso unitario de la muestra (kN/m³)	13.31

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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 16 a 20 de 2019	Profundidad (m):	0.35 - 0.65

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

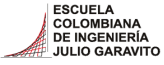

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.2
Temperatura de ensayo (°C)	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	2.73
η (%)	73.17
S (%)	87.32

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123</p>	
---	---	---

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 16 a 20 de 2019	Profundidad (m):	0.35 - 0.65

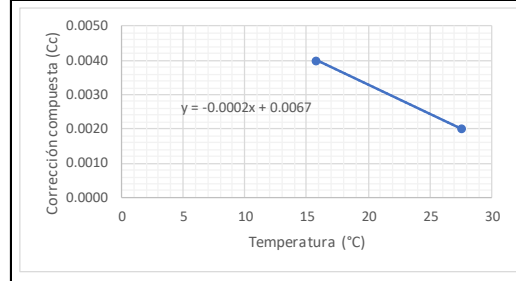
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

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 (°C)	15.8	27.6
Lectura en solución de hexametáfosfato	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 - G _s	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

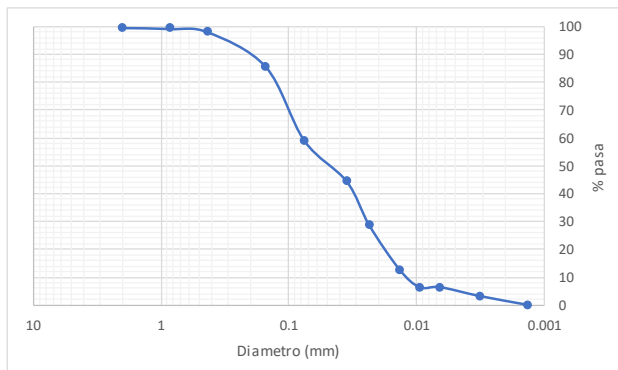
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	8:04
--	------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
8:06	2	1.018	17.3	0.0037	1.014	44.39	0.01395	12.6	0.0350
8:09	5	1.013	17.3	0.0037	1.009	28.54	0.01395	13.9	0.0233
8:19	15	1.007	20.4	0.0032	1.004	12.68	0.01343	15.2	0.0135
8:34	30	1.005	23.4	0.0027	1.002	6.34	0.01296	15.8	0.0094
9:04	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
8:04	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)

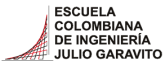

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	50.2
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	20.6
% Retenido en tamiz No 200	41.0
% Pasa el tamiz No 200	59.0

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)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	2
Fina	0.425 - 0.075	39
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	59

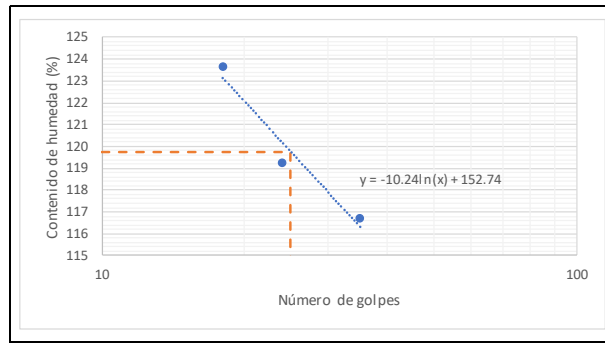
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	41
Finos	< 0.075	59

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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 16 a 20 de 2019
		Profundidad (m):	0.35 - 0.65

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	57	71	12
Masa del recipiente (g)	25,214	11,549	9,565
No. Golpes	35	24	18
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	35,851	23,217	22,475
Masa recipiente + suelo seco (g)	30,122	16,871	15,337
Contenido de humedad (%)	117	119	124



2. Determinación límite plástico

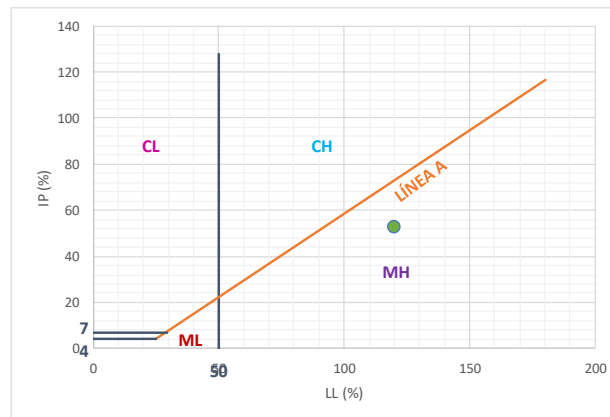
Ensayo	1	2
Número recipiente	62	71
Masa del recipiente (g)	10,934	11,472
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	17,728	17,803
Masa recipiente + suelo seco (g)	15,009	15,27
Contenido de humedad (%)	67	67

LP (%)	67
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	53
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH
---------------------------	-----------

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

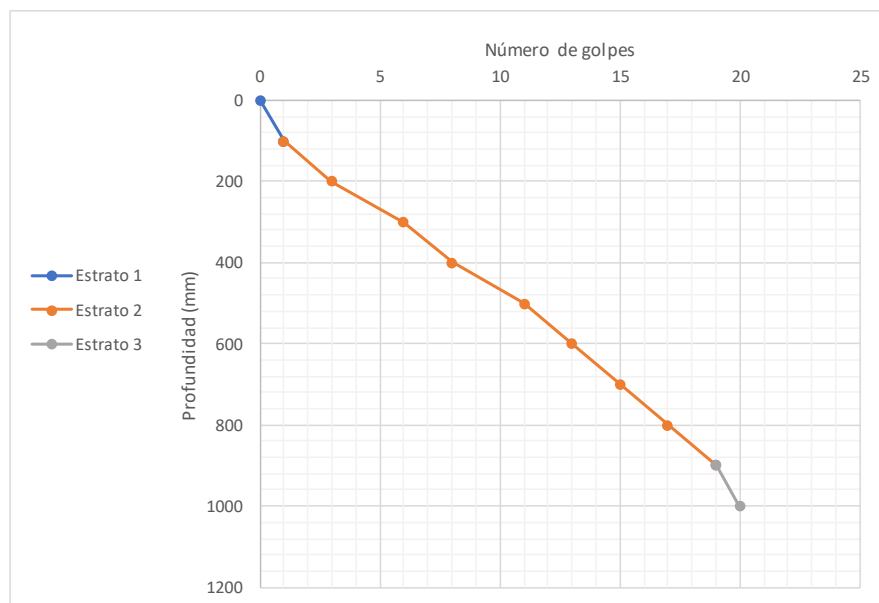
Procedencia:	Cra 72 No.181-90
Fecha de exploración:	Septiembre 06 de 2019

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	100	100
2	44	800
3	100	100



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	44
--	-----------



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13



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 16 a 20 de 2019
		Profundidad (m):	0.35 - 0.65

ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

Humedad natural

# recipiente	17
Masa recipiente (g)	112.83
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	242.28
Masa recipiente + muestra seca (g)	181.64
Contenido de humedad (%)	88.1

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)	-

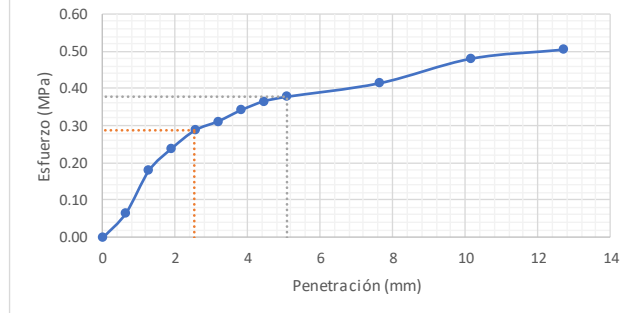
Penetración de la muestra

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	13.03	0.07
0.050	1.270	35.54	0.18
0.075	1.905	47.39	0.24
0.100	2.540	56.87	0.29
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	81.75	0.41
0.400	10.160	94.78	0.48
0.500	12.700	99.52	0.50


Registro fotográfico




Curva esfuerzo - penetración



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.29
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.38
CBR _{2,54} (%)	4.18
CBR _{5,08} (%)	3.66
CBR sin inmersión (%)	4.2



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 16 a 20 de 2019
		Profundidad (m):	0.35 - 0.65

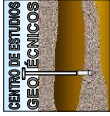
Datos de la muestra antes del ensayo				
Dato	1	2	3	4
Altura (mm)	128.75	127.97	127.9	127.77
Diámetro (mm)	61.38	61.8	61.35	61.40

Área (mm ²)	2961.16
Volumen (cm ³)	379.32
Masa húmeda muestra (g)	522.42
Densidad húmeda aprox. (g/cm ³)	1.38

Ciclo	Norma		Ensayo																					
	Presión de cámara (kPa)	S ₃	Esfuerzo cíclico (kPa)	Carga máxima real (N)	P _{max}	Carga cíclica real (N)	F _{cíclico}	Carga de contacto real (N)	P _{contacto}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{max,r}	Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico,r}	Esfuerzo real (kPa)	S _{contacto,r}	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	H ₂	Deformación resiliente prom (mm)	H _{promedio}	Deformación resiliente unitaria	ε _r	Módulo resiliente (MPa)
0	41.4	41.4	24.8	82	75	75	7	7	27.69	25.33	25.33	25.33	2.36	0.085	0.085	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.00067	37.9	37.9
1	41.4	41.4	12.4	37	34	34	3	3	12.50	11.48	11.48	11.48	1.01	0.029	0.029	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.00022	52.5	52.5
2	41.4	41.4	24.8	70	63	63	7	7	23.64	21.28	21.28	21.28	2.36	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.00048	44.0	44.0
3	41.4	41.4	37.3	115	105	105	10	10	38.84	35.46	35.46	35.46	3.38	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.00081	43.7	43.7
4	41.4	41.4	49.7	164	150	150	14	14	55.38	50.66	50.66	50.66	4.73	0.161	0.161	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.00126	40.2	40.2
5	41.4	41.4	62	195	176	176	19	19	65.85	59.44	59.44	59.44	6.42	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208	0.00162	36.6	36.6
6	27.6	27.6	12.4	35	33	33	2	2	11.82	11.14	11.14	11.14	0.68	0.030	0.030	0.029	0.029	0.030	0.030	0.030	0.030	0.00023	48.4	48.4
7	27.6	27.6	24.8	78	72	72	6	6	26.34	24.31	24.31	24.31	2.03	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.00058	42.1	42.1
8	27.6	27.6	37.3	132	121	121	11	11	44.58	40.86	40.86	40.86	3.71	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.00107	38.2	38.2
9	27.6	27.6	49.7	155	142	142	13	13	52.34	47.95	47.95	47.95	4.39	0.172	0.172	0.173	0.173	0.173	0.173	0.173	0.173	0.00135	35.6	35.6
10	27.6	27.6	62	212	194	194	18	18	71.59	65.51	65.51	65.51	6.08	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.00215	30.5	30.5
11	13.8	13.8	12.4	42	40	40	2	2	14.18	13.51	13.51	13.51	0.68	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.00030	45.5	45.5
12	13.8	13.8	24.8	81	75	75	6	6	27.35	25.33	25.33	25.33	2.03	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.00066	38.2	38.2
13	13.8	13.8	37.3	112	101	101	11	11	37.82	34.11	34.11	34.11	3.71	0.122	0.122	0.121	0.121	0.122	0.122	0.122	0.122	0.00095	36.0	36.0
14	13.8	13.8	49.7	145	131	131	14	14	48.97	44.24	44.24	44.24	4.73	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.00147	30.1	30.1
15	13.8	13.8	62	216	197	197	19	19	72.94	66.53	66.53	66.53	6.42	0.299	0.299	0.298	0.298	0.299	0.299	0.299	0.299	0.00233	28.5	28.5

Datos de humedad al inicio del ensayo	
# recipiente	12
Masa recipiente (g)	101.04
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	623.46
Masa recipiente + muestra seca (g)	376.48
Masa del agua (g)	246.98
Masa material seco (g)	275.44
Masa material húmedo (g)	522.42
Humedad (%)	89.67

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	12
Masa recipiente (g)	101.04
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	622.28
Masa recipiente + muestra seca (g)	376.48
Masa del agua (g)	245.8
Masa material seco (g)	275.44
Masa material húmedo (g)	521.24
Humedad (%)	89.24



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

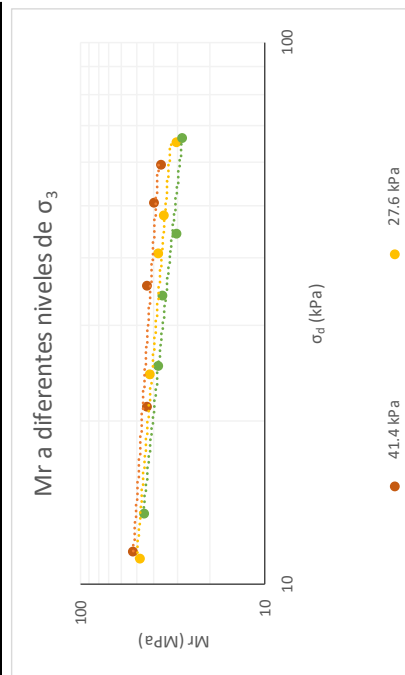
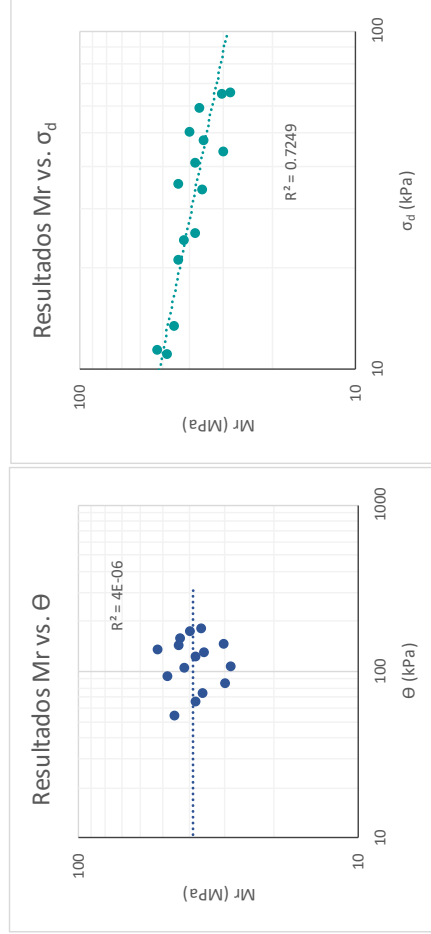
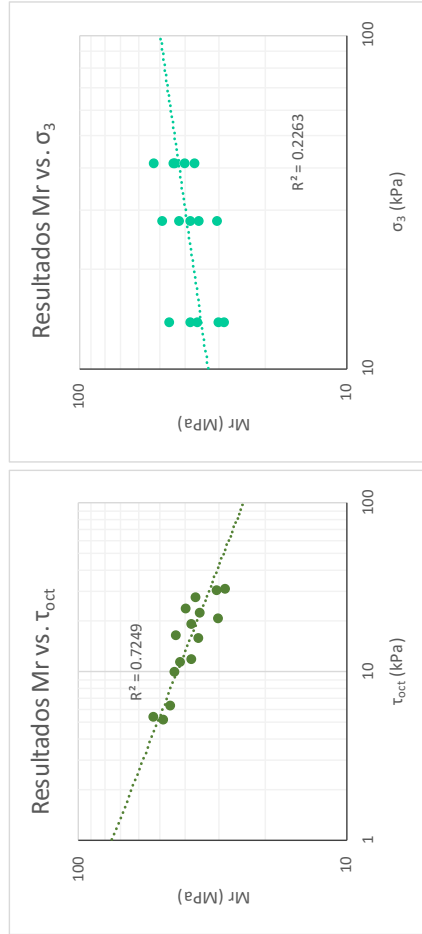


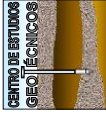
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90		
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos:	Septiembre 16 a 20 de 2019
		Profundidad (m):	0.35 - 0.65

Ecuaciones

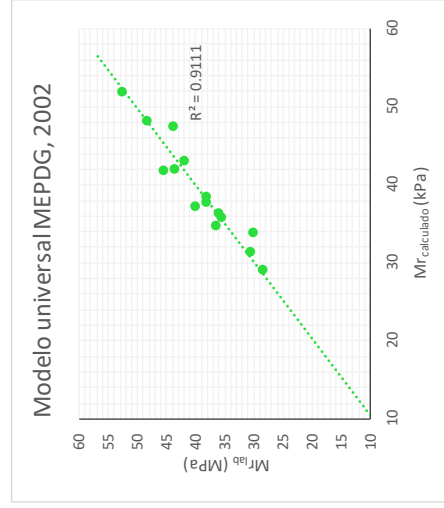
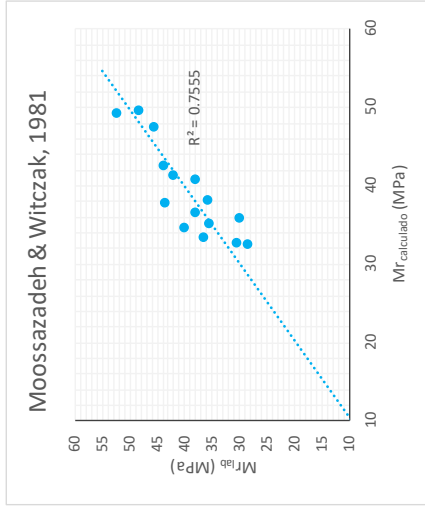
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \quad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	Mr (MPa)
1	11.48	41.40	5.4127	135.682	52.5
2	21.28	41.40	10.0293	145.475	44.0
3	35.46	41.40	16.7156	159.659	43.7
4	50.66	41.40	23.8794	174.856	40.2
5	59.44	41.40	28.0185	183.636	36.6
6	11.14	27.60	5.2535	93.944	48.4
7	24.31	27.60	11.4621	107.115	42.1
8	40.86	27.60	19.2627	123.662	38.2
9	47.95	27.60	22.6058	130.754	35.6
10	65.51	27.60	30.8840	148.315	30.5
11	13.51	13.80	6.3678	54.908	45.5
12	25.33	13.80	11.9397	66.728	38.2
13	34.11	13.80	16.0788	75.508	36.0
14	44.24	13.80	20.8547	85.639	30.1
15	66.53	13.80	31.3616	107.928	28.5





Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con velas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No. 181-90		
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos:	Septiembre 16 a 20 de 2019
		Profundidad (m):	0.35 - 0.65




Ciclo	Moosazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	$M_{r_{obs}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (Mpa)	$M_{r_{obs}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)
1	52.5	49.387	3.1	9.9	52.5	51.886	0.6	0.4
2	44.0	42.686	1.3	1.6	44.0	47.517	-3.6	12.7
3	43.7	37.829	5.8	34.2	43.7	42.068	1.6	2.6
4	40.2	34.770	5.4	29.3	40.2	37.170	3.0	9.1
5	36.6	33.481	3.1	9.8	36.6	34.705	1.9	3.6
6	48.4	49.737	-1.3	1.8	48.4	48.100	0.3	0.1
7	42.1	41.359	0.7	0.5	42.1	43.115	-1.0	1.1
8	38.2	36.582	1.6	2.6	38.2	37.794	0.4	0.2
9	35.6	35.224	0.4	0.1	35.6	35.788	-0.2	0.0
10	30.5	32.719	-2.2	4.8	30.5	31.418	-0.9	0.8
11	45.5	47.525	-2.0	4.0	45.5	41.763	3.8	14.2
12	38.2	40.962	-2.8	7.8	38.2	38.528	-0.4	0.1
13	36.0	38.178	-2.2	4.9	36.0	36.261	-0.3	0.1
14	30.1	35.902	-5.8	33.2	30.1	33.814	-3.7	13.5
15	28.5	32.600	-4.1	16.4	28.5	29.077	-0.5	0.3
		Σ		160.9		Σ		68.7


$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$$

$$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

k_1	29.467	k_1	0.543
k_2	-0.236	k_2	0.216
P_a (kPa)	102	k_3	-2.448
		P_a (kPa)	102



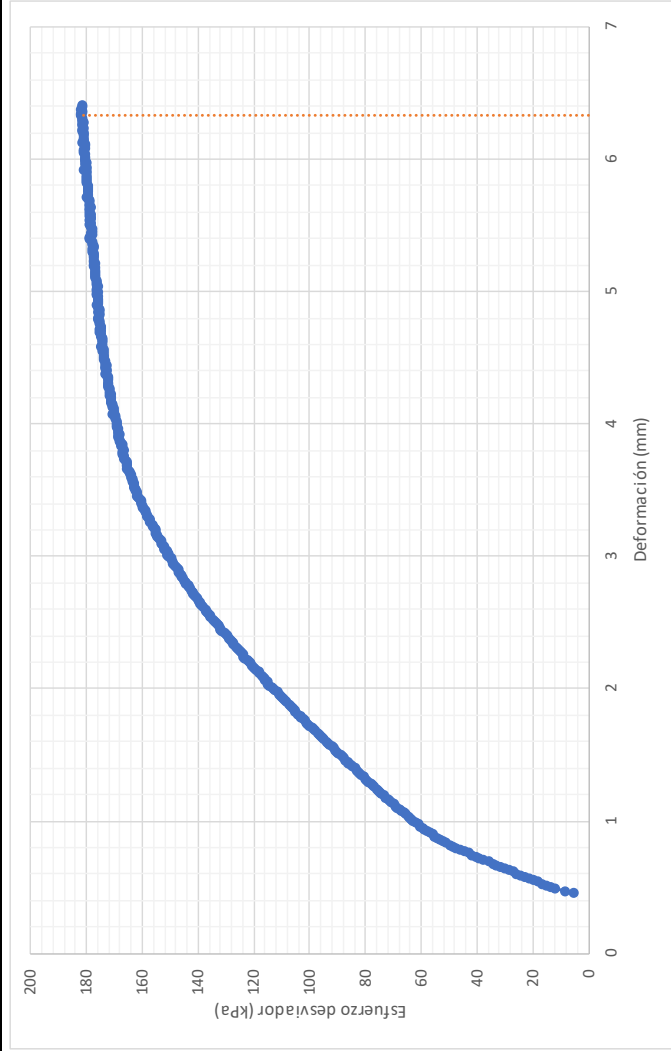
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



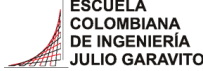

CENTRO DE ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS

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 16 a 20 de 2019
Profundidad (m):	0.35 - 0.65		

Prueba rápida de corte



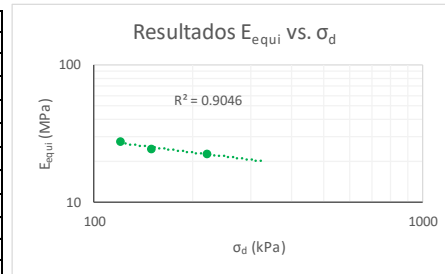
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	
Máximo esfuerzo (kPa)	0.128
Máxima deformación (mm)	182.15
Máxima deformación (%)	6.334
	4.945

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

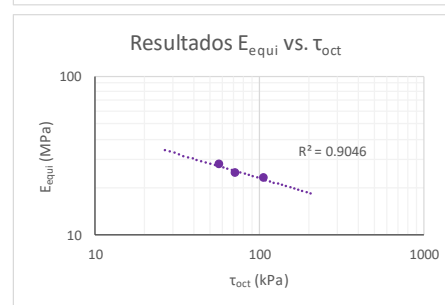
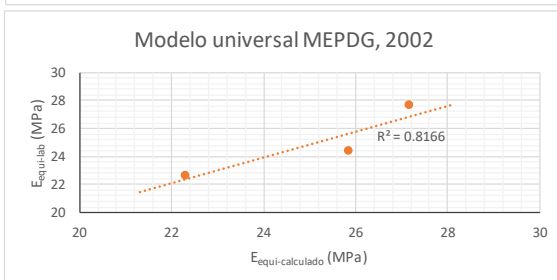
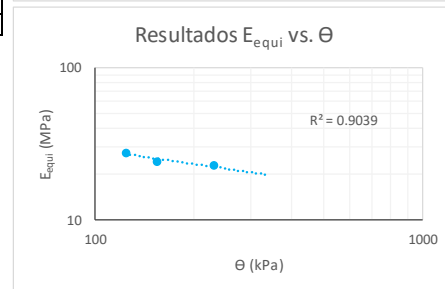
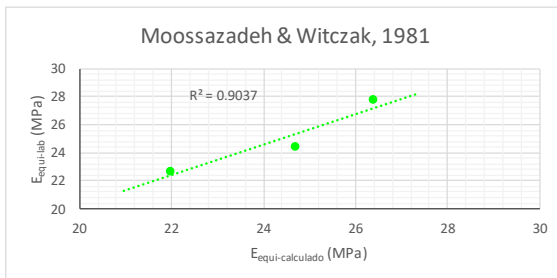
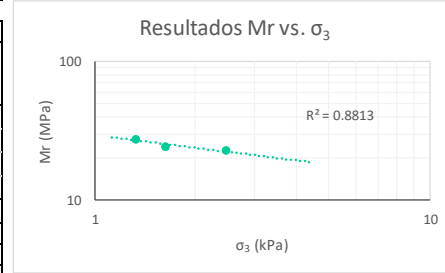
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con vetas negras y presencia de raíces y arena		
Procedencia (Localización):	Cra 72 No.181-90		
Fecha exploración:	Septiembre 06 de 2019	Fecha ensayos:	Septiembre 16 a 20 de 2019
		Profundidad (m):	0.35 - 0.65

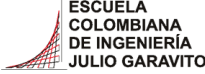

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	89
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.646	1.288	2.546
Carga máxima pistón (kg) P_{max}	26.066	31.990	48.577
Carga cíclica pistón (kg) P_{cíclico}	23.696	29.62	43.838
Carga de contacto pistón (kg) P_{contacto}	2.370	2.370	4.739
Esfuerzo máximo pistón (kPa) σ₁	0.132	0.162	0.246
Esfuerzo desviador pistón (MPa) σ_d	0.120	0.150	0.222
Esfuerzo confinamiento (MPa) σ₃	0.001	0.002	0.002
Cortante octaédrico (MPa) τ_{oct}	0.057	0.071	0.105
Invariante de esfuerzos (MPa) θ	0.124	0.155	0.230
Deformación elástica (mm) u	0.098	0.139	0.219
Módulo equivalente (MPa) E_{equi}	27.7	24.4	22.7

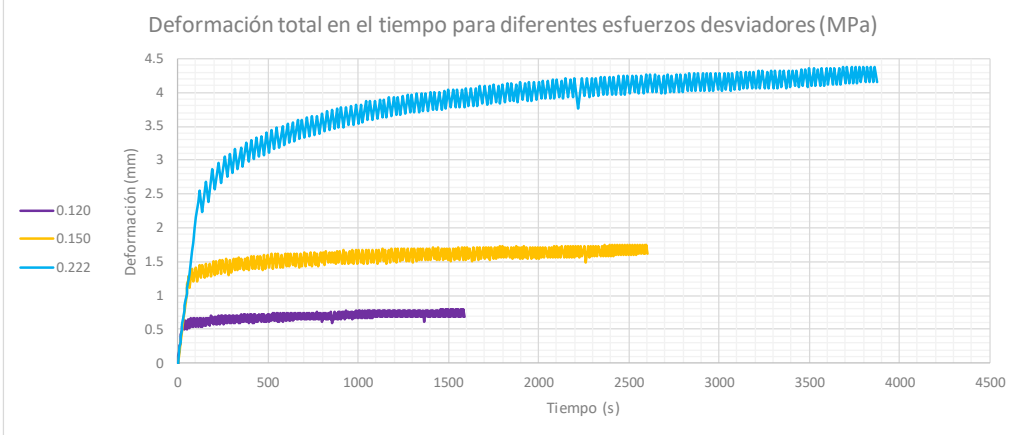


Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
k₁	27.700		k₁	0.601	
k₂	-0.298		k₂	0.587	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-2.105	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
27.7	26.38	1.8	27.7	27.15	0.3
24.4	24.69	0.1	24.4	25.84	2.1
22.7	21.96	0.5	22.7	22.30	0.1
	Σ	2.4		Σ	2.6

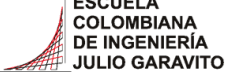



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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 16 a 20 de 2019	Profundidad (m):	0.35 - 0.65

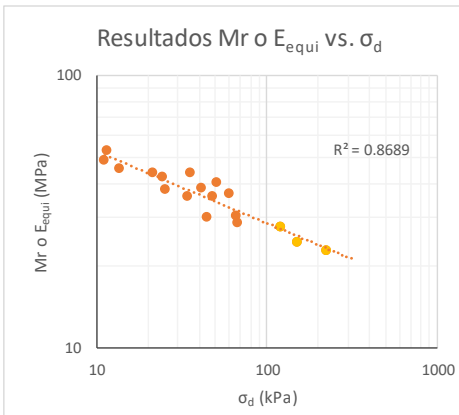
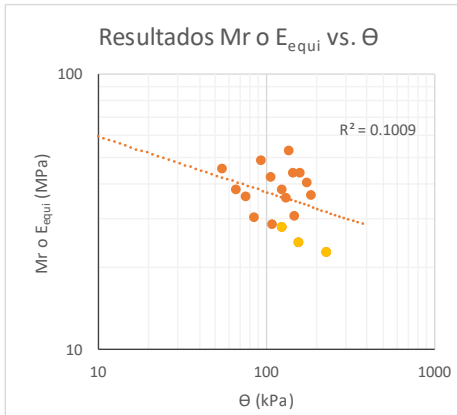
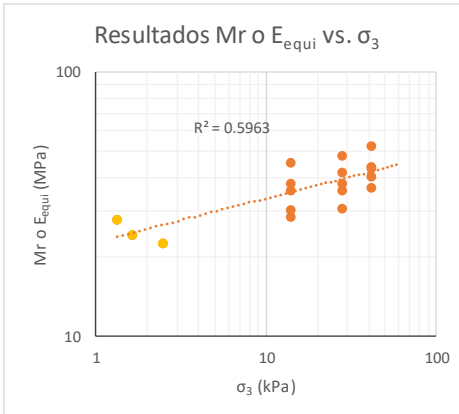
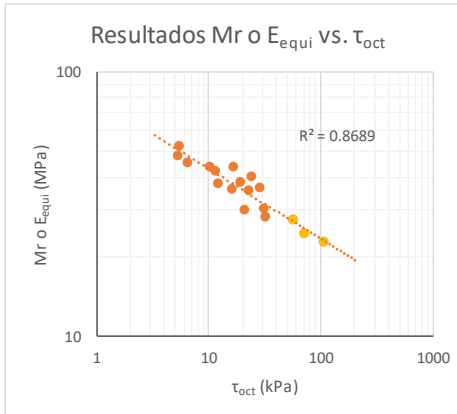


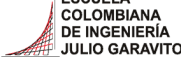

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	--	--

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 16 a 20 de 2019
		Profundidad (m):	0.35 - 0.65

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	12.50	11.48	41.40	5.41	135.68	0.00022	52.53
	2	23.64	21.28	41.40	10.03	145.48	0.00048	43.96
	3	38.84	35.46	41.40	16.72	159.66	0.00081	43.68
	4	55.38	50.66	41.40	23.88	174.86	0.00126	40.18
	5	65.85	59.44	41.40	28.02	183.64	0.00162	36.60
	6	11.82	11.14	27.60	5.25	93.94	0.00023	48.39
	7	26.34	24.31	27.60	11.46	107.11	0.00058	42.09
	8	44.58	40.86	27.60	19.26	123.66	0.00107	38.21
	9	52.34	47.95	27.60	22.61	130.75	0.00135	35.61
	10	71.59	65.51	27.60	30.88	148.31	0.00215	30.52
	11	14.18	13.51	13.80	6.37	54.91	0.00030	45.54
	12	27.35	25.33	13.80	11.94	66.73	0.00066	38.17
	13	37.82	34.11	13.80	16.08	75.51	0.00095	35.96
	14	48.97	44.24	13.80	20.85	85.64	0.00147	30.14
	15	72.94	66.53	13.80	31.36	107.93	0.00233	28.55
cCBR	16	132.13	120.11	1.32	56.62	124.08	-	27.73
	17	162.15	150.14	1.62	70.78	155.01	-	24.40
	18	246.23	222.21	2.46	104.75	229.60	-	22.69



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillas con presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes				
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019	Profundidad (m):	1.80 - 2.00



1. Determinación del contenido de humedad

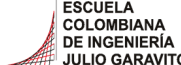

Masa del recipiente (g)	108.94
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	185.37
Masa recipiente + suelo seco (g)	154.21
Contenido de humedad (%)	68.8

2. Determinación del volumen de la muestra

Masa total de la muestra (g)	84.4
Masa de la muestra parafinada (g)	86
Masa de la muestra parafinada sum. (g)	30.2
Temperatura del agua (°)	17
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99878
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	54.15

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (g)	84.4
Volumen de la muestra (cm ³)	54.15
Densidad de la muestra (gr/cm ³)	1.56
Peso unitario de la muestra (kN/m³)	15.29

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillas con presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes				
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019	Profundidad (m):	1.80 - 2.00

4. Calibración del picnómetro

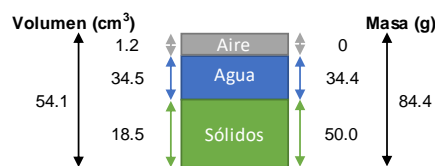
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	143.24	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)	47.9
Temperatura de ensayo (°C)	25.2
Densidad del agua (g/cm ³)	0.997
Masa picnómetro vacío (g)	143.24
Volumen picnómetro (cm ³)	499.56
Masa picnómetro con agua (g)	641.30
Masa picnómetro+ agua + suelo (g)	671.52
Gravedad específica sin corregir	2.71
Factor de corrección	0.99879
Gravedad específica corregida	2.71

6. Relaciones de fase de la muestra, saturación, porosidad y relación de vacíos



e	1.93
η (%)	65.83
S (%)	96.65

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123</p>	
---	---	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillas con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019
		Profundidad (m):	1.80 - 2.00

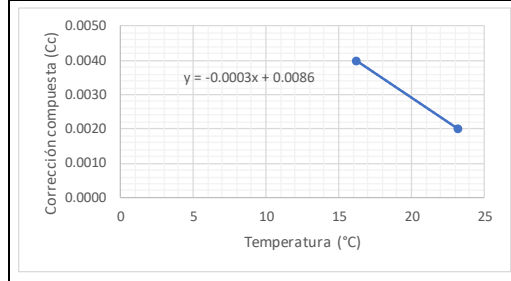
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	17.71
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	30.5
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	29.96
Masa del agua (g)	0.54
Masa material seco (g)	12.25
Humedad higroscópica (%)	4.4
Factor corrección Ch	0.9578

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H
----------------------	------

Rango de temperaturas (°C)	16.2	23.2
Lectura en solución de hexametáfosfato	1.0040	1.0020
Corrección compuesta (Cc)	0.0040	0.0020



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	47.9
Gravedad específica del suelo - G _s	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	3309

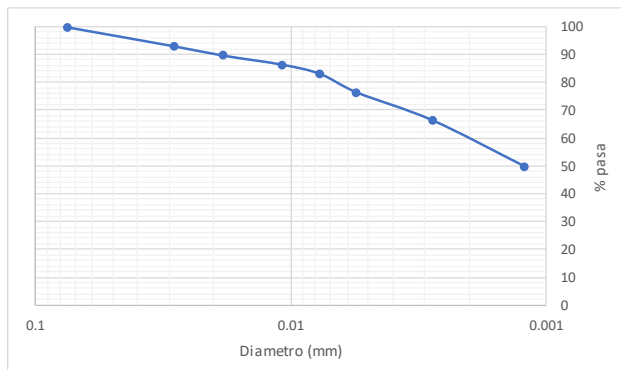
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	13:21
--	-------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
13:23	2	1.032	19.0	0.0032	1.028	92.66	0.01357	8.9	0.0286
13:26	5	1.030	19.0	0.0032	1.027	89.35	0.01357	9.2	0.0184
13:36	15	1.029	19.1	0.0032	1.026	86.04	0.01356	9.4	0.0107
13:51	30	1.028	19.6	0.0030	1.025	82.73	0.01347	9.7	0.0077
14:21	60	1.026	20.4	0.0028	1.023	76.11	0.01334	10.2	0.0055
17:38	250	1.023	20.8	0.0027	1.020	66.19	0.01327	11.0	0.0028
13:21	1440	1.017	22.0	0.0023	1.015	49.64	0.01308	12.3	0.0012

4. Análisis por tamizado (Material usado en hidrometría)

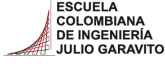

Masa seca al horno usada en el ensayo (g)	47.9
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	0.26
% Retenido en tamiz No 200	0.5
% Pasa el tamiz No 200	99.5

Tamiz (mm)	Tamiz (in)	W _{RETENIDO} (gr)	% Retenido	% Pasa	% Retenido acumulado
4.75	No 4	0.00	0.0	100.0	0.0
2.000	No 10	0.00	0.0	100.0	0.0
0.850	No 20	0.00	0.0	100.0	0.0
0.425	No 40	0.09	0.2	99.8	0.2
0.150	No 100	0.10	0.2	99.6	0.4
0.075	No 200	0.07	0.1	99.5	0.5



Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	0
Media	2 - 0.425	0
Fina	0.425 - 0.075	0
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	99

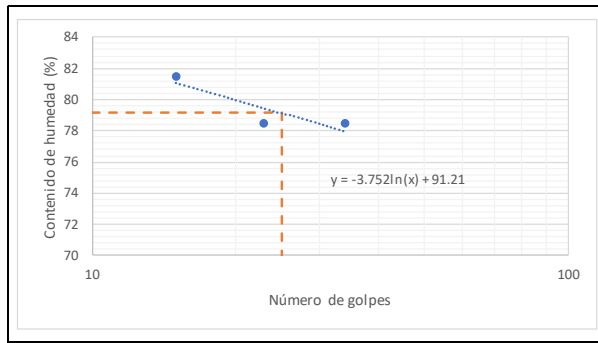
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	1
Finos	< 0.075	99

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillas con presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes				
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019	Profundidad (m):	1.80 - 2.00

1. Determinación límite líquido

Punto	1	2	3
Número de recipiente	72	71	66
Masa del recipiente (g)	11.039	7.675	12.137
No. Golpes	34	23	15
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	25.948	22.913	25.936
Masa recipiente + suelo seco (g)	19.393	16.211	19.74
Contenido de humedad (%)	78	79	81



LL (%)	79
---------------	-----------

2. Determinación límite plástico

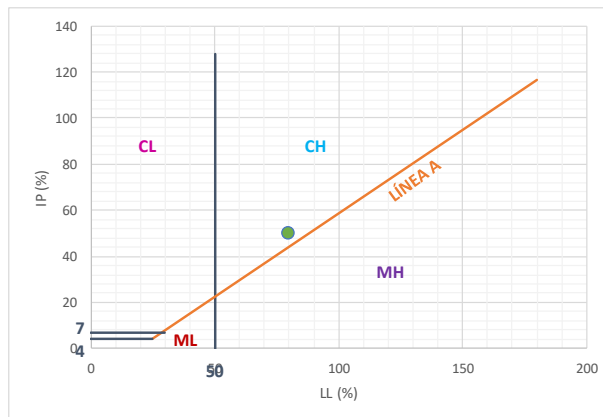
Ensayo	1	2
Número recipiente	7	10
Masa del recipiente (g)	17.39	17.74
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	23.66	23.73
Masa recipiente + suelo seco (g)	22.27	22.39
Contenido de humedad (%)	28	29

LP (%)	29
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	50
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	CH
---------------------------	-----------

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

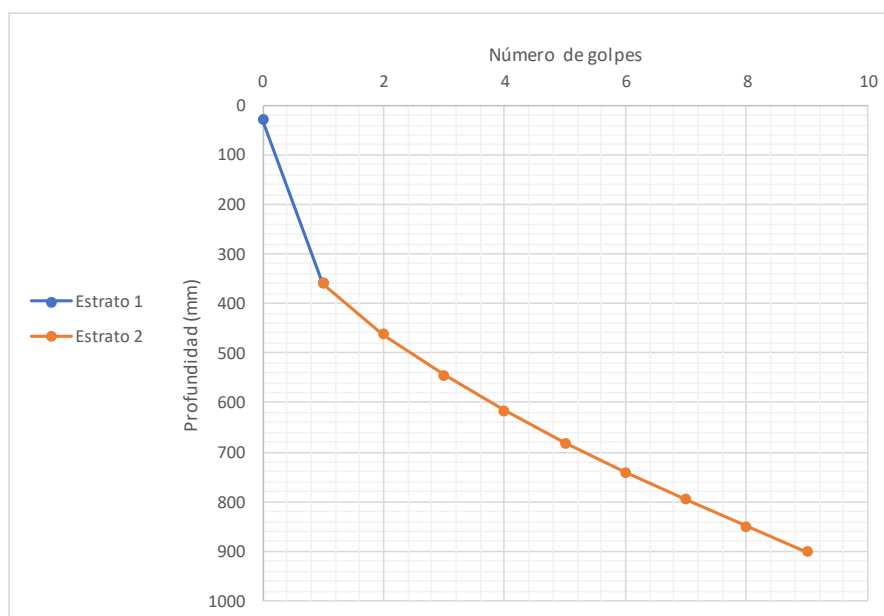
Procedencia:	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019

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	30	-	-	-	-
1	360	330	330	1	330
1	463	103	103	1	103
1	545	82	82	1	82
1	616	71	71	1	71
1	682	66	66	1	66
1	741	59	59	1	59
1	795	54	54	1	54
1	850	55	55	1	55
1	901	51	51	1	51

*El ensayo se realizó a nivel de la toma de muestras

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	330	360
2	66	541



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	330
--	------------



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillas con presencia de raíces				
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes				
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019	Profundidad (m):	1.80 - 2.00

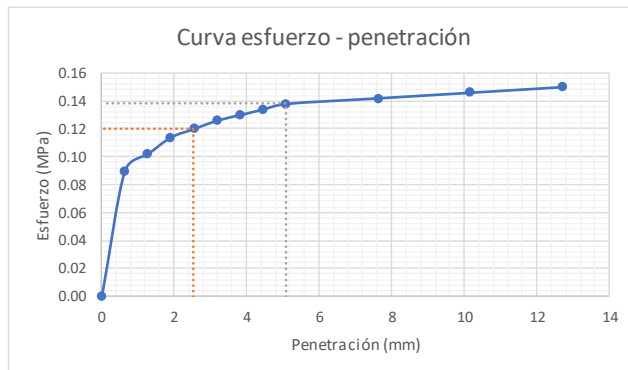
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

Humedad natural	
# recipiente	40
Masa recipiente (g)	122.6
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	711.63
Masa recipiente + muestra seca (g)	465.06
Contenido de humedad (%)	72.0


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	17.77	0.09
0.050	1.270	20.14	0.10
0.075	1.905	22.51	0.11
0.100	2.540	23.70	0.12
0.125	3.175	24.88	0.13
0.150	3.810	25.67	0.13
0.175	4.445	26.46	0.13
0.200	5.080	27.25	0.14
0.300	7.620	28.04	0.14
0.400	10.160	28.83	0.15
0.500	12.700	29.62	0.15

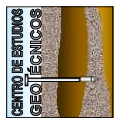
Registro fotográfico



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.12
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.14
CBR _{2,54} (%)	1.74
CBR _{5,08} (%)	1.34
CBR sin inmersión (%)	1.7



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 muy blanda color gris y vetas amarillas con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK-45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina Deportes		
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019
		Profundidad (m):	1.80 - 2.00


Datos de la muestra antes del ensayo				
Dato	1	2	3	4
Altura (mm)	148	148.24	148.72	148.98
Diámetro (mm)	72.83	72.61	72.84	72.7
				72.75

Área (mm ²)	4156.20
Volumen (cm ³)	617.13
Masa húmeda muestra (g)	988.8
Densidad húmeda aprox. (g/cm ³)	1.60


Ciclo	Norma	Ensayo																							
		Presión de cámara (kPa)	S ₃	Esfuerzo cíclico (kPa)	Carga máxima real (N)	F _{max}	Carga cíclica real (N)	P _{cíclico}	Carga de contacto real (N)	F _{contacto}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{max r}	Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico r}	Esfuerzo real (kPa)	S _{contacto r}	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	H ₂	Deformación resiliente prom (mm)	H _{promedio}	Deformación resiliente unitaria	ε _r	Módulo resiliente (MPa)
0		41.4	24.8	24.8	97	88	9	23.34	21.17	2.17	2.17	21.17	21.17	2.17	2.17	0.091	0.091	0.09	0.09	0.091	0.091	0.091	0.00061	34.7	
1		41.4	12.4	12.4	36	33	3	8.66	7.94	0.72	0.72	7.94	7.94	0.72	0.72	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.00021	38.0	
2		41.4	24.8	24.8	105	96	9	25.26	23.10	2.17	2.17	23.10	23.10	2.17	2.17	0.105	0.105	0.105	0.105	0.105	0.105	0.105	0.00071	32.7	
3		41.4	37.3	37.3	154	138	16	37.05	33.20	3.85	3.85	33.20	33.20	3.85	3.85	0.179	0.179	0.179	0.179	0.179	0.179	0.179	0.00121	27.5	
4		41.4	49.7	49.7	217	196	21	52.21	47.16	6.50	6.50	47.16	47.16	6.50	6.50	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.00163	28.9	
5		41.4	62	62	259	232	27	62.32	55.82	6.50	6.50	55.82	55.82	6.50	6.50	0.315	0.315	0.313	0.313	0.314	0.314	0.314	0.00211	26.4	
6		27.6	12.4	12.4	52	48	4	12.51	11.55	0.96	0.96	11.55	11.55	0.96	0.96	0.047	0.047	0.046	0.046	0.047	0.047	0.047	0.00031	36.9	
7		27.6	24.8	24.8	102	91	11	24.54	21.90	2.65	2.65	21.90	21.90	2.65	2.65	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.00073	29.8	
8		27.6	37.3	37.3	159	145	14	38.26	34.89	3.37	3.37	34.89	34.89	3.37	3.37	0.166	0.166	0.164	0.164	0.165	0.165	0.165	0.00111	31.4	
9		27.6	49.7	49.7	202	181	21	48.60	43.55	5.05	5.05	43.55	43.55	5.05	5.05	0.235	0.235	0.233	0.233	0.234	0.234	0.234	0.00158	27.6	
10		27.6	62	62	257	230	27	61.84	55.34	6.50	6.50	55.34	55.34	6.50	6.50	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.00197	28.1	
11		13.8	12.4	12.4	37	32	5	8.90	7.70	1.20	1.20	7.70	7.70	1.20	1.20	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.00016	47.6	
12		13.8	24.8	24.8	94	84	10	22.62	20.21	2.41	2.41	20.21	20.21	2.41	2.41	0.081	0.081	0.08	0.08	0.081	0.081	0.081	0.00054	37.3	
13		13.8	37.3	37.3	140	124	16	33.68	29.83	3.85	3.85	29.83	29.83	3.85	3.85	0.145	0.145	0.145	0.145	0.145	0.145	0.145	0.00098	30.6	
14		13.8	49.7	49.7	205	184	21	49.32	44.27	5.05	5.05	44.27	44.27	5.05	5.05	0.247	0.247	0.244	0.244	0.246	0.246	0.246	0.00165	26.8	
15		13.8	62	62	286	259	27	68.81	62.32	6.50	6.50	62.32	62.32	6.50	6.50	0.316	0.316	0.315	0.315	0.316	0.316	0.316	0.00212	29.3	

Datos de humedad al inicio del ensayo	
# recipiente	14
Masa recipiente (g)	106.29
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1041.32
Masa recipiente + muestra seca (g)	668.29
Masa del agua (g)	373.03
Masa material seco (g)	562
Masa material húmedo (g)	935.03
Humedad (%)	66.38

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	14
Masa recipiente (g)	106.29
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	1041.32
Masa recipiente + muestra seca (g)	668.49
Masa del agua (g)	372.83
Masa material seco (g)	562.2
Masa material húmedo (g)	935.03
Humedad (%)	66.32



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



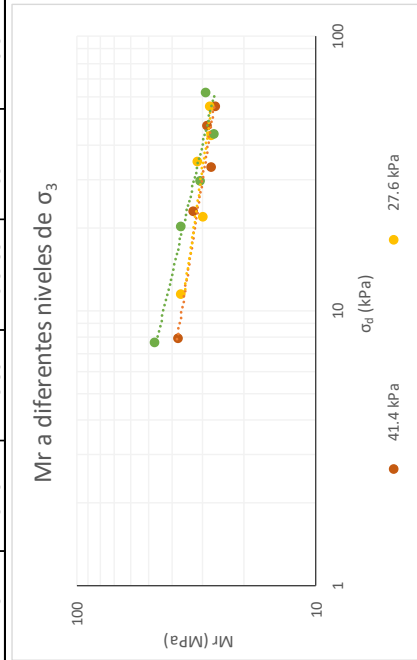
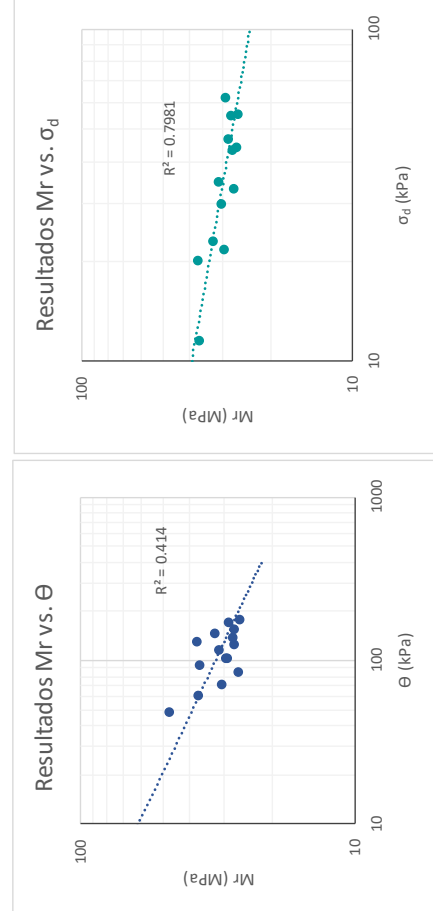
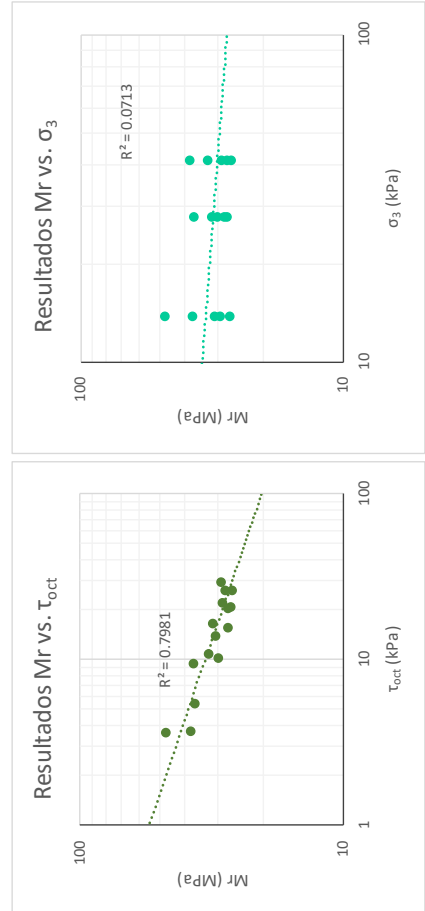
CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillentas con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK 45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019
		Profundidad (m):	1.80 - 2.00

Ecuaciones

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \quad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	Mr (MPa)
1	7.94	41.40	3.7429	132.140	38.0
2	23.10	41.40	10.8885	147.298	32.7
3	33.20	41.40	15.6522	157.403	27.5
4	47.16	41.40	22.2307	171.358	28.9
5	55.82	41.40	26.3139	180.020	26.4
6	11.55	27.60	5.4443	94.349	36.9
7	21.90	27.60	10.3214	104.695	29.8
8	34.89	27.60	16.4462	117.688	31.4
9	43.55	27.60	20.5294	126.349	27.6
10	55.34	27.60	26.0871	138.139	28.1
11	7.70	13.80	3.6295	49.099	47.6
12	20.21	13.80	9.5275	61.611	37.3
13	29.83	13.80	14.0643	71.235	30.6
14	44.27	13.80	20.8697	85.671	26.8
15	62.32	13.80	29.3763	103.717	29.3

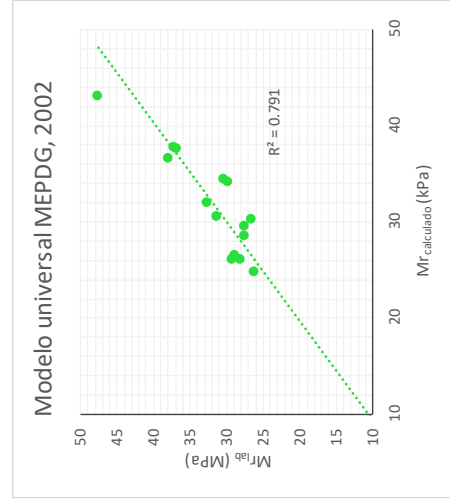
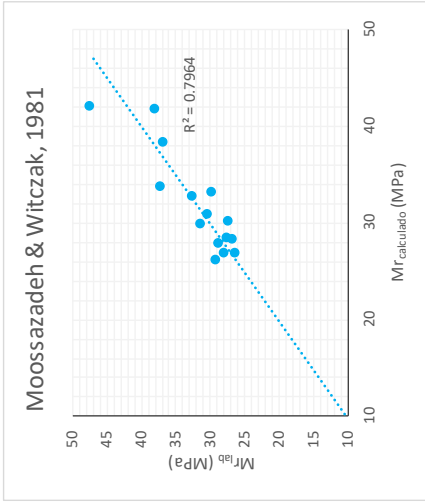




ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillentas con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Profundidad (m):	1.80 - 2.00



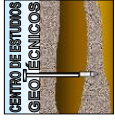
Ciclo	Moosazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	Mr _{lab} (MPa)	Mr _{cal} (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (Mpa)	Mr _{lab} (MPa)	Mr _{cal} (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)
1	38.0	41.855	-3.8	14.6	38.0	36.558	1.5	2.2
2	32.7	32.881	-0.2	0.0	32.7	32.071	0.6	0.4
3	27.5	30.292	-2.7	7.6	27.5	29.535	-2.0	4.0
4	28.9	27.983	0.9	0.8	28.9	26.510	2.4	5.6
5	26.4	26.937	-0.5	0.3	26.4	24.866	1.5	2.3
6	36.9	38.457	-1.6	2.5	36.9	37.606	-0.7	0.5
7	29.8	33.281	-3.5	11.9	29.8	34.235	-4.4	19.4
8	31.4	29.955	1.4	2.1	31.4	30.635	0.8	0.6
9	27.6	28.491	-0.9	0.7	27.6	28.556	-0.9	0.8
10	28.1	26.989	1.2	1.3	28.1	26.061	2.1	4.3
11	47.6	42.147	5.5	30.1	47.6	43.157	4.5	20.1
12	37.3	33.888	3.4	11.5	37.3	37.840	-0.6	0.3
13	30.6	31.033	-0.5	0.2	30.6	34.483	-3.9	15.4
14	26.8	28.385	-1.6	2.6	26.8	30.309	-3.5	12.5
15	29.3	26.275	3.1	9.3	29.3	26.158	3.2	10.0
			Σ	96.6			Σ	98.5

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_3} \left(\frac{T_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

k₁	23.506	k₁	0.398
k₂	-0.226	k₂	-0.166
P_a (kPa)	102	k₃	-1.727
		P_a (kPa)	102

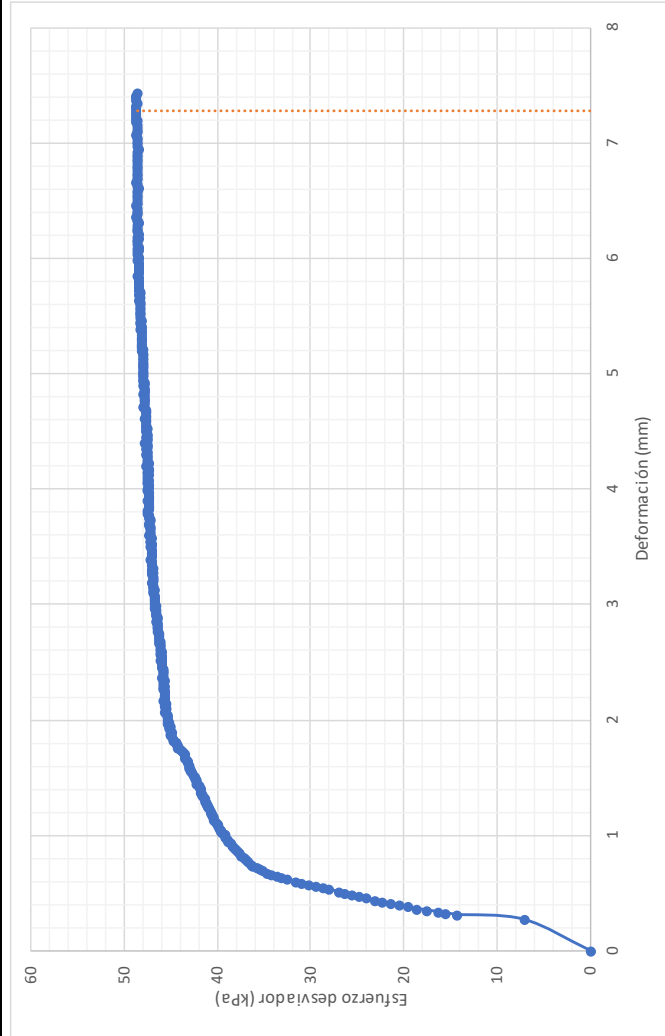


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

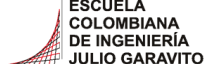



Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillas con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019
		Profundidad (m):	1.80 - 2.00

Prueba rápida de corte



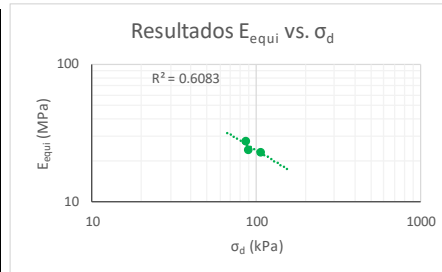
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.148
Máximo esfuerzo (kPa)	48.826
Máxima deformación (mm)	7.286
Máxima deformación (%)	4.9

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

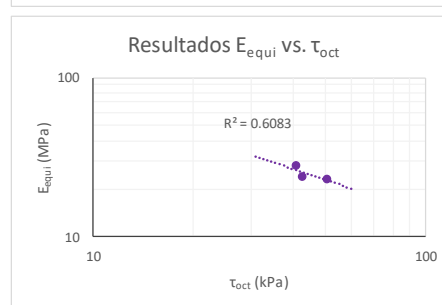
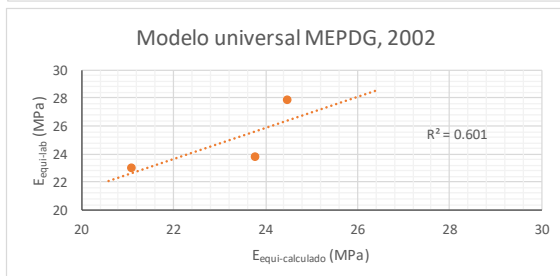
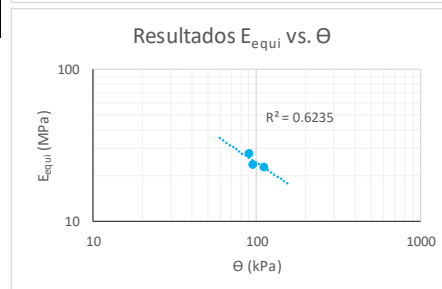
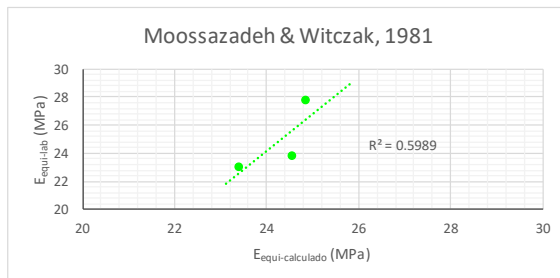
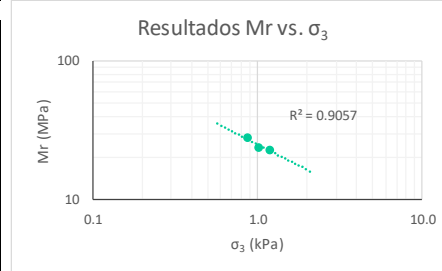
Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillas con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), E.CI, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019
		Profundidad (m):	1.80 - 2.00

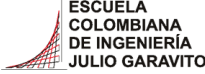

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	69
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.603	1.288	2.564
Carga máxima pistón (kg) P_{max}	17.109	20.218	23.478
Carga cíclica pistón (kg) P_{ciclico}	17.109	17.848	21.108
Carga de contacto pistón (kg) P_{contacto}	0.000	2.370	2.370
Esfuerzo máximo pistón (kPa) σ₁	0.087	0.102	0.119
Esfuerzo desviador pistón (MPa) σ_d	0.087	0.090	0.107
Esfuerzo confinamiento (MPa) σ₃	0.001	0.001	0.001
Cortante octaédrico (MPa) τ_{oct}	0.041	0.043	0.050
Invariante de esfuerzos (MPa) θ	0.089	0.094	0.111
Deformación elástica (mm) u	0.071	0.086	0.105
Módulo equivalente (MPa) E_{equi}	27.8	23.8	23.0

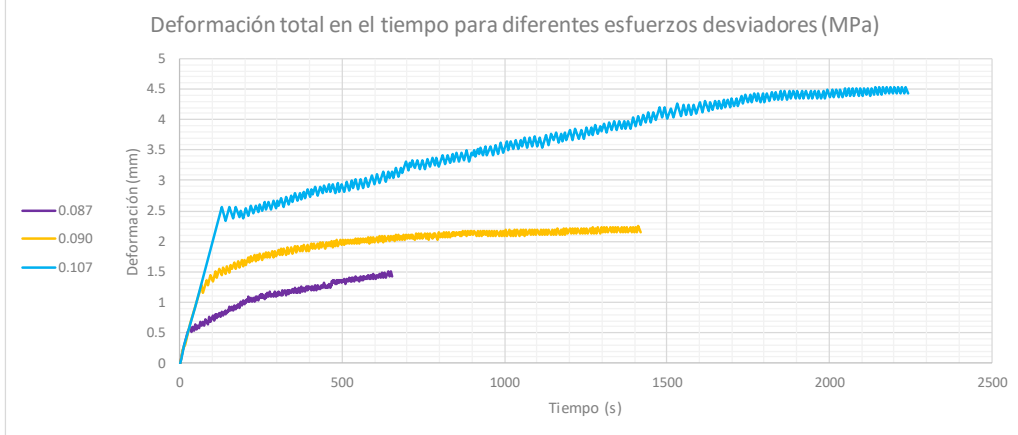


Moosazadeh & Witzcak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
k₁	23.733		k₁	0.420	
k₂	-0.285		k₂	-0.171	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-1.729	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
27.8	24.86	8.8	27.8	24.47	11.2
23.8	24.56	0.5	23.8	23.77	0.0
23.0	23.41	0.2	23.0	21.09	3.6
	Σ	9.5		Σ	14.8

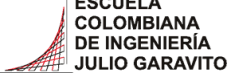



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillas con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración:	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019
		Profundidad (m):	1.80 - 2.00

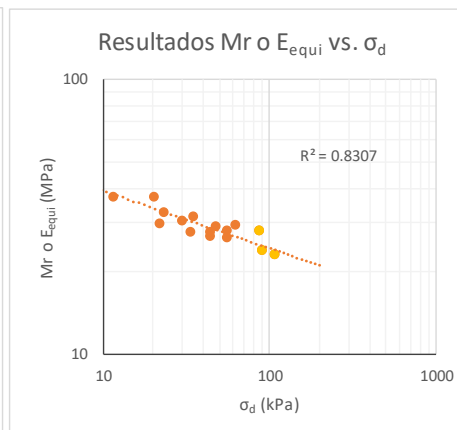
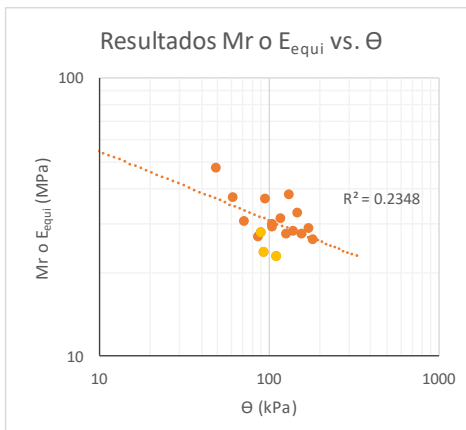
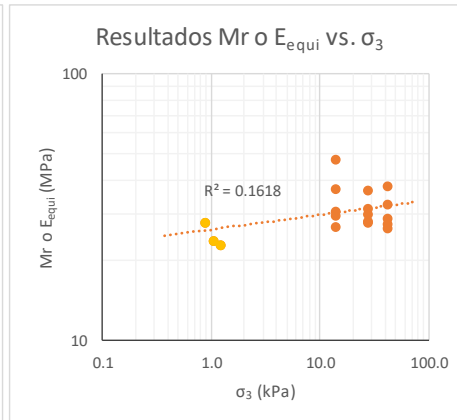
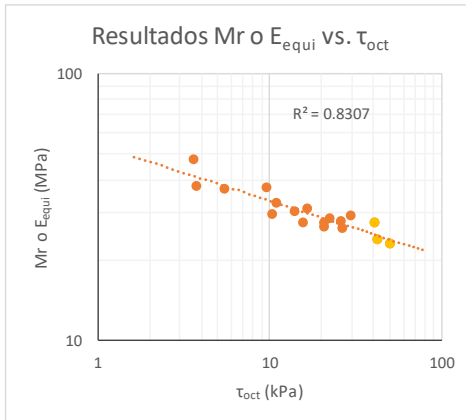


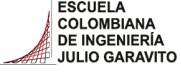

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEO TÉCNICOS</p>
---	--	---

Identificación (Descripción):	Arcilla de consistencia muy blanda color gris y vetas amarillas con presencia de raíces		
Procedencia (Localización):	AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), ECI, caño detrás oficina deportes		
Fecha exploración	Octubre 28 de 2019	Fecha ensayos:	Nov. 04 a 09 de 2019
		Profundidad (m):	1.80 - 2.00

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	8.66	7.94	41.40	3.74	132.14	0.00021	38.03
	2	25.26	23.10	41.40	10.89	147.30	0.00071	32.66
	3	37.05	33.20	41.40	15.65	157.40	0.00121	27.54
	4	52.21	47.16	41.40	22.23	171.36	0.00163	28.88
	5	62.32	55.82	41.40	26.31	180.02	0.00211	26.40
	6	12.51	11.55	27.60	5.44	94.35	0.00031	36.88
	7	24.54	21.90	27.60	10.32	104.70	0.00073	29.83
	8	38.26	34.89	27.60	16.45	117.69	0.00111	31.40
	9	48.60	43.55	27.60	20.53	126.35	0.00158	27.63
	10	61.84	55.34	27.60	26.09	138.14	0.00197	28.14
	11	8.90	7.70	13.80	3.63	49.10	0.00016	47.63
	12	22.62	20.21	13.80	9.53	61.61	0.00054	37.28
	13	33.68	29.83	13.80	14.06	71.23	0.00098	30.55
	14	49.32	44.27	13.80	20.87	85.67	0.00165	26.78
	15	68.81	62.32	13.80	29.38	103.72	0.00212	29.33
cCBR	16	86.72	86.72	0.87	40.88	89.33	-	27.82
	17	102.48	90.47	1.02	42.65	93.54	-	23.84
	18	119.01	106.99	1.19	50.44	110.57	-	22.99



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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 del contenido de humedad**

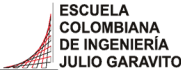

Masa del recipiente (g)	17.7
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	63.6
Masa recipiente + suelo seco (g)	39.70
Contenido de humedad (%)	108.6

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 (°)	16.6
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99885
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	101.85

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (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/m³)	13.37

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

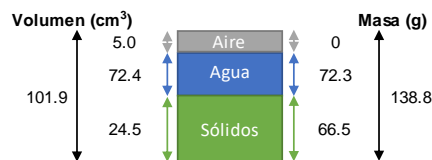
4. Calibración del picnómetro

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

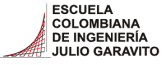

*Calibración realizada en agosto de 2018

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.22
Temperatura de ensayo (°C)	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

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123</p>	
---	---	---

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

3. Análisis por hidrometría

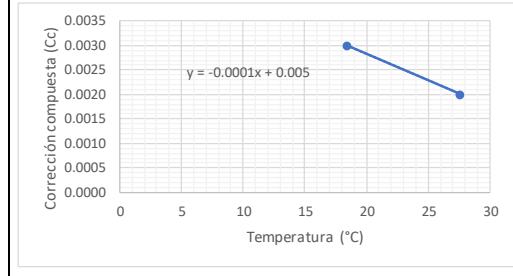
Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.56
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	48.8
Gravedad específica del suelo - G _s	2.72
Gravedad específica del agua - G ₁	1.000
$Constante A = \left[\frac{100000}{W_{muestra}} * \frac{G_s}{G_s - g_1} \right]$	
A	3239

Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	14:04
--	-------

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H
----------------------	------

Rango de temperaturas (°C)	18.4	27.6
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0030	1.0020
Corrección compuesta (Cc)	0.0030	0.0020

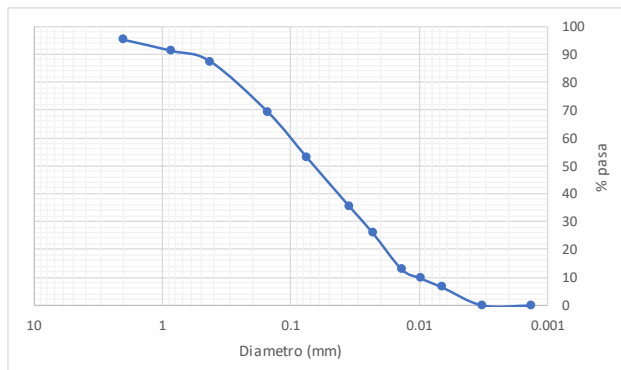


Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
14:06	2	1.014	18.4	0.0030	1.011	35.63	0.01364	13.4	0.0353
14:09	5	1.011	18.4	0.0030	1.008	25.92	0.01364	14.2	0.0230
14:19	15	1.007	18.5	0.0030	1.004	12.96	0.01364	15.2	0.0137
14:34	30	1.006	18.8	0.0030	1.003	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)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	5
Media	2 - 0.425	8
Fina	0.425 - 0.075	34
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	53

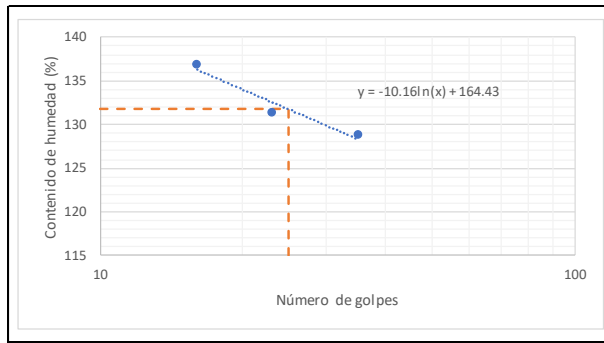
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	47
Finos	< 0.075	53

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

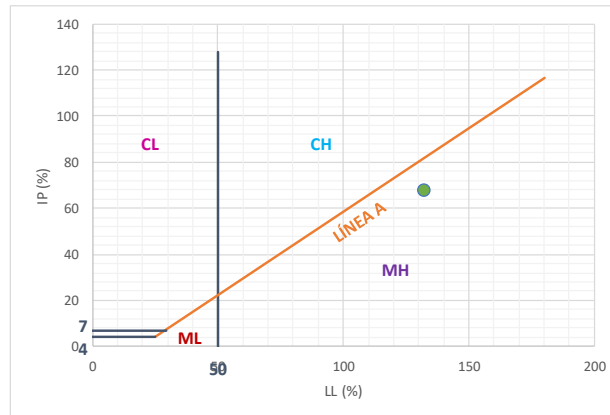
Ensayo	1	2
Número recipiente	A1	10
Masa del recipiente (g)	10.602	9.655
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	15.742	15.329
Masa recipiente + suelo seco (g)	13.756	13.113
Contenido de humedad (%)	63	64

LP (%)	64
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	68
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH
---------------------------	-----------

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

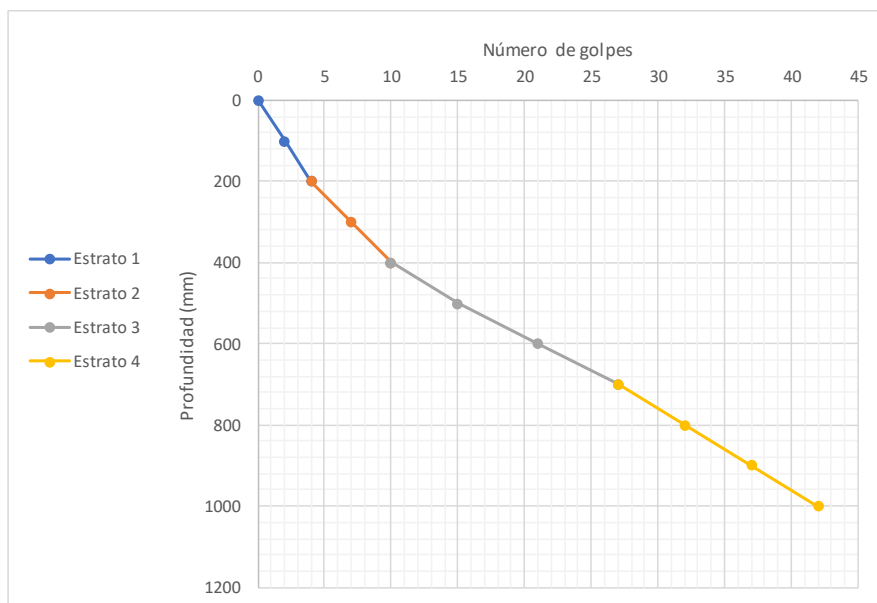
Procedencia:	Calle 134A # 50 - 34
Fecha de exploración:	Enero 14 de 2020

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	-	-	-	-
2	100	100	50	1	50
2	200	100	50	1	50
3	300	100	33	1	33
3	400	100	33	1	33
5	500	100	20	1	20
6	600	100	17	1	17
6	700	100	17	1	17
5	800	100	20	1	20
5	900	100	20	1	20
5	1000	100	20	1	20

*El ensayo se realizó a nivel de la superficie

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	50	200
2	33	200
3	18	300
4	20	300



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	18
--	-----------

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

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

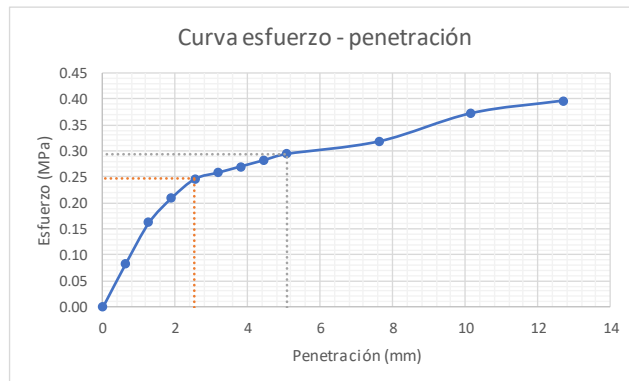
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

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 inmersión (%)	3.6

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13</p>	
---	--	---

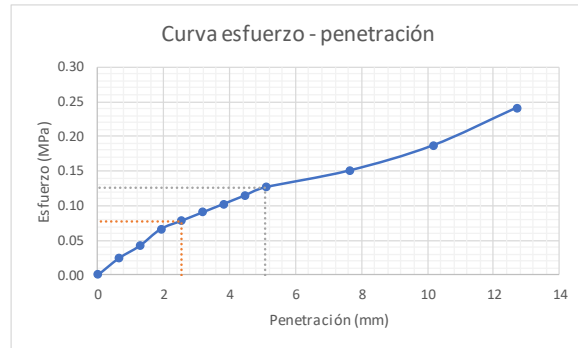
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina		
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34		
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	Fecha ensayos:	Enero 24 a 30 de 2020
		Profundidad (m):	0.50 - 0.70

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	4.74	0.02
0.050	1.270	8.29	0.04
0.075	1.905	13.03	0.07
0.100	2.540	15.40	0.08
0.125	3.175	17.77	0.09
0.150	3.810	20.14	0.10
0.175	4.445	22.51	0.11
0.200	5.080	24.88	0.13
0.300	7.620	29.62	0.15
0.400	10.160	36.73	0.19
0.500	12.700	47.39	0.24




Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.08
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.13
CBR _{2,54} (%)	1.13
CBR _{5,08} (%)	1.22
CBR con inmersión (%)	1.2

Humedad final	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	115.17
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	236.22
Masa recipiente + muestra seca (g)	174.1
Contenido de humedad (%)	105.4



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


Dato	Datos de la muestra antes del ensayo			
	1	2	3	4
Altura (mm)	132.23	131.23	130.72	130.14
Diámetro (mm)	62.17	61.06	62.15	61.81
			Prom (mm)	
				131.08
				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	Presión de cámara (kPa)		Carga máxima real (N)	Carga cíclica real (N)	Carga de contacto real (N)	Esfuerzo máximo real (kPa)	Esfuerzo cíclico real (kPa)	Esfuerzo real (kPa)	Esfuerzo de contacto real (kPa)	Ensayo		Deformación resiliente LVDT1 (mm)	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	Deformación resiliente promedio (mm)	Deformación resiliente unitaria ϵ_r	Módulo resiliente (MPa)
	S_3	$S_{ciclico}$								H_1	H_2					
0	41.4	24.8	90	83	7	30.00	27.66	2.33	2.33	0.102	0.102	0.102	0.102	0.102	0.00078	35.6
1	41.4	12.4	41	38	3	13.67	12.67	1.00	1.00	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.00031	40.5
2	41.4	24.8	80	73	7	26.66	24.33	2.33	2.33	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.00067	36.2
3	41.4	37.3	119	109	10	39.66	36.33	3.33	3.33	0.135	0.135	0.135	0.135	0.135	0.00103	35.3
4	41.4	49.7	149	135	14	49.66	44.99	4.67	4.67	0.169	0.169	0.169	0.169	0.169	0.00129	34.9
5	41.4	62	196	177	19	65.33	58.99	6.33	6.33	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.00185	32.0
6	27.6	12.4	42	39	3	14.00	13.00	1.00	1.00	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.00037	34.8
7	27.6	24.8	71	65	6	23.66	21.66	2.00	2.00	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.00064	33.8
8	27.6	37.3	133	122	11	44.33	40.66	3.67	3.67	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.00123	33.1
9	27.6	49.7	148	132	16	49.33	43.99	5.33	5.33	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.00140	31.3
10	27.6	62	199	181	18	66.33	60.33	6.00	6.00	0.253	0.253	0.253	0.253	0.253	0.00193	31.3
11	13.8	12.4	28	26	2	9.33	8.67	0.67	0.67	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.00022	39.2
12	13.8	24.8	77	70	7	25.66	23.33	2.33	2.33	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.00066	35.2
13	13.8	37.3	110	100	10	36.66	33.33	3.33	3.33	0.127	0.127	0.127	0.127	0.127	0.00097	34.4
14	13.8	49.7	145	130	15	48.33	43.33	5.00	5.00	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.00146	29.7
15	13.8	62	175	163	12	58.33	54.33	4.00	4.00	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.00209	26.0

Datos de humedad al inicio 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



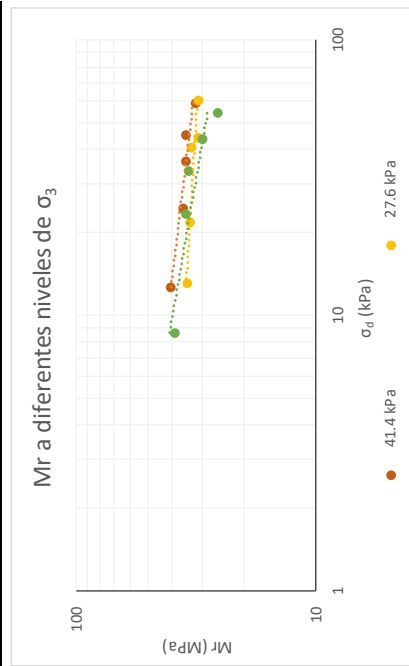
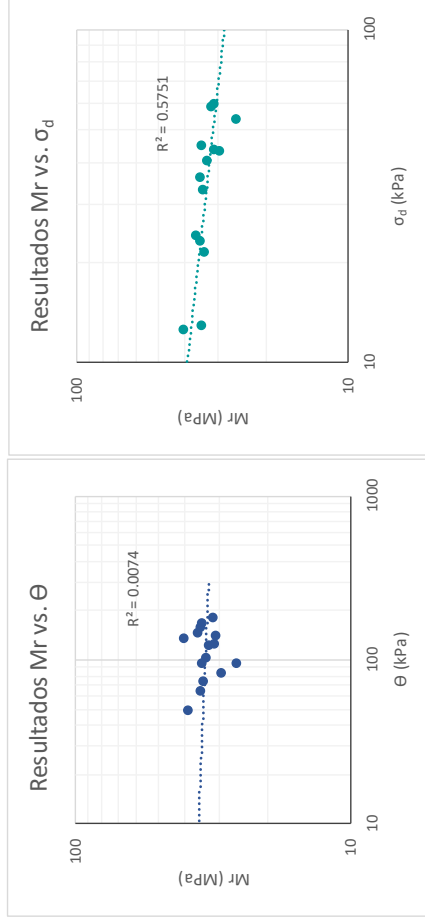
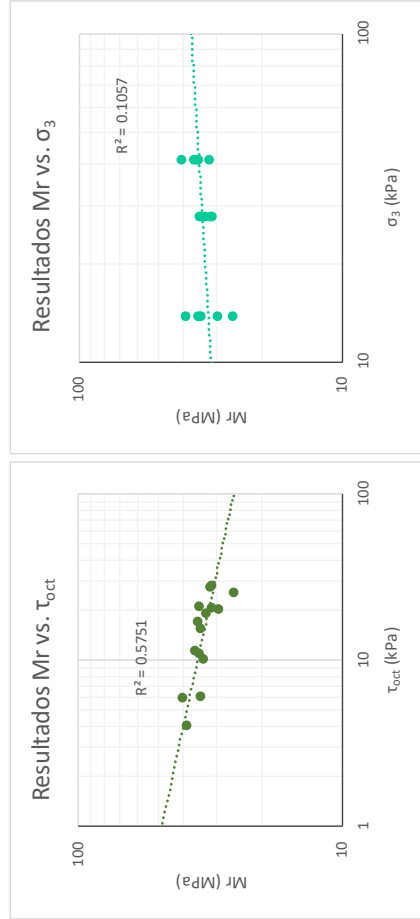
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13




CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

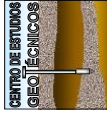
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina		
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34		
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	Fecha ensayos:	Enero 24 a 30 de 2020
		Profundidad (m):	0.50 - 0.70

Ecuaciones						
$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d$ $\theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$						
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Mr (MPa)
1	12.67	41.40	5.9704	136.865	40.5	40.5
2	24.33	41.40	11.4695	148.530	36.2	36.2
3	36.33	41.40	17.1257	160.529	35.3	35.3
4	44.99	41.40	21.2107	169.195	34.9	34.9
5	58.99	41.40	27.8096	183.193	32.0	32.0
6	13.00	27.60	6.1275	95.798	34.8	34.8
7	21.66	27.60	10.2126	104.464	33.8	33.8
8	40.66	27.60	19.1682	123.462	33.1	33.1
9	43.99	27.60	20.7394	126.795	31.3	31.3
10	60.33	27.60	28.4381	143.126	31.3	31.3
11	8.67	13.80	4.0850	50.066	39.2	39.2
12	23.33	13.80	10.9981	64.731	35.2	35.2
13	33.33	13.80	15.7116	74.729	34.4	34.4
14	43.33	13.80	20.4251	84.728	29.7	29.7
15	54.33	13.80	25.6100	95.727	26.0	26.0



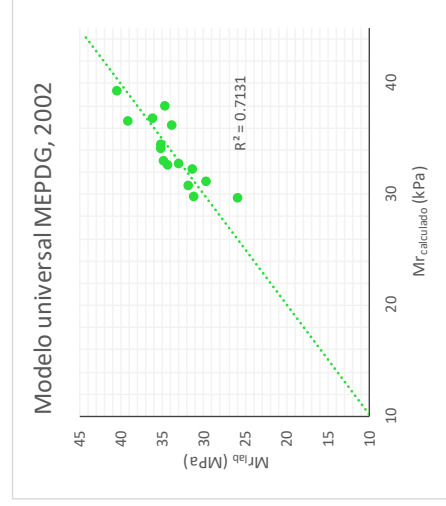
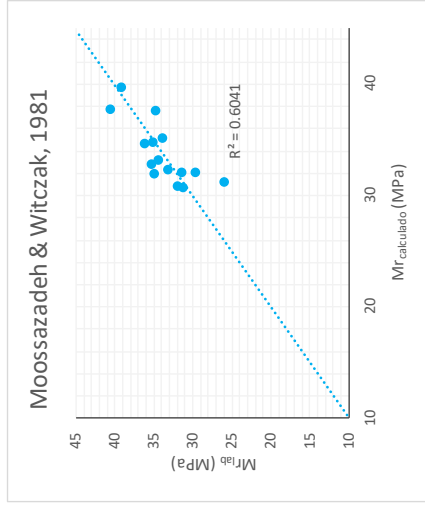


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



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 T34A # 50 - 34		
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	Fecha ensayos:	Enero 24 a 30 de 2020
		Profundidad (m):	0.50 - 0.70




Ciclo	Moossazadeh & Witzczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	$M_{r_{lab}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)	$M_{r_{lab}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (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	32.988	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

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_3} * \left(\frac{r_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

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



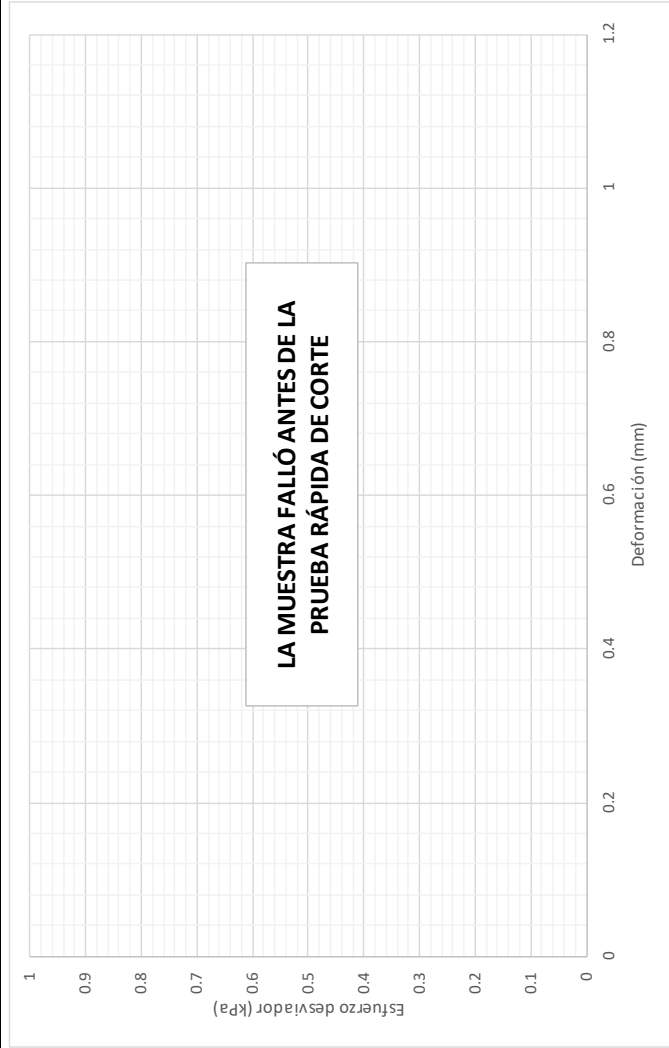
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



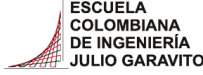

CENTRO DE ESTUDIOS
GEOTÉCNICOS

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



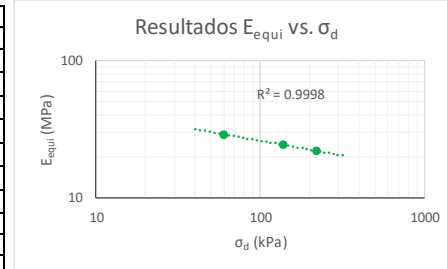
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.131
Máximo esfuerzo (kPa)	0.00
Máxima deformación (mm)	#N/D
Máxima deformación (%)	#N/D

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

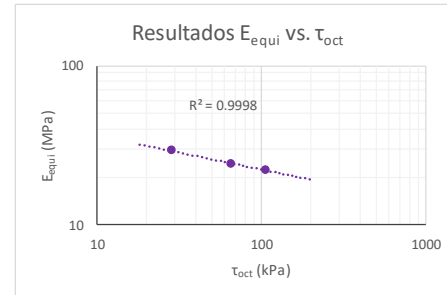
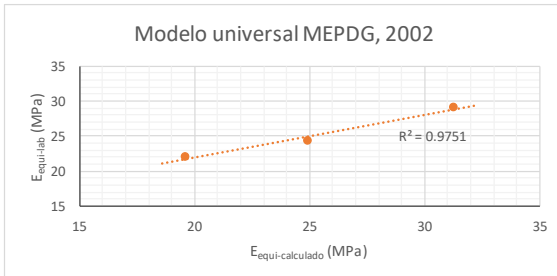
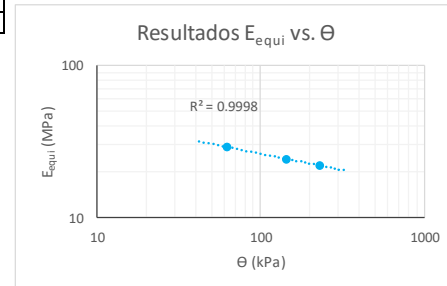
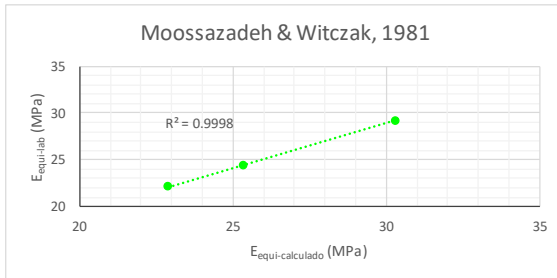
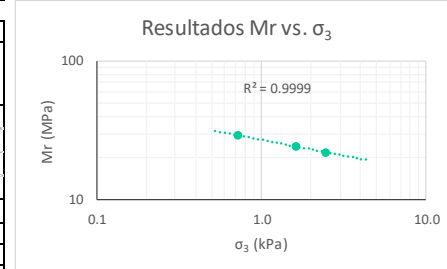
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café y presencia de raíces e importante arena gruesa a fina		
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34		
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	Fecha ensayos:	Enero 24 a 30 de 2020
		Profundidad (m):	0.50 - 0.70



Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	109
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo		1	2	3
Penetración objetivo (mm)		0.646	1.292	2.550
Carga máxima pistón (kg)	P_{max}	14.218	31.990	48.577
Carga cíclica pistón (kg)	P_{cíclico}	11.848	27.251	43.838
Carga de contacto pistón (kg)	P_{contacto}	2.370	4.739	4.739
Esfuerzo máximo pistón (kPa)	σ₁	0.072	0.162	0.246
Esfuerzo desviador pistón (MPa)	σ_d	0.060	0.138	0.222
Esfuerzo confinamiento (MPa)	σ₃	0.001	0.002	0.002
Cortante octaédrico (MPa)	τ_{oct}	0.028	0.065	0.105
Invariante de esfuerzos (MPa)	θ	0.062	0.143	0.230
Deformación elástica (mm)	u	0.047	0.128	0.225
Módulo equivalente (MPa)	E_{equi}	29.2	24.3	22.1

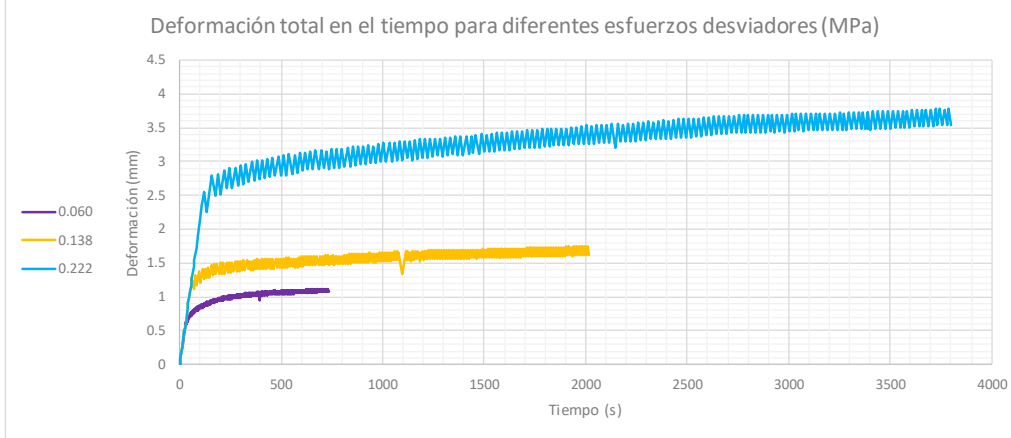


Moosazadeh & Witzcak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
	k₁	27.044		k₁	0.498
	k₂	-0.214		k₂	0.201
	P_a (MPa)	0.102		k₃	-1.580
				P_a (MPa)	0.102
E_{eq}lab (MPa)	E_{eq}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{eq}lab (MPa)	E_{eq}cal (MPa)	Difer² (MPa)
29.2	30.29	1.3	29.2	31.24	4.3
24.3	25.34	1.0	24.3	24.92	0.3
22.1	22.89	0.7	22.1	19.58	6.2
	Σ	2.9		Σ	10.9

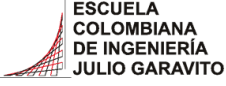



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

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

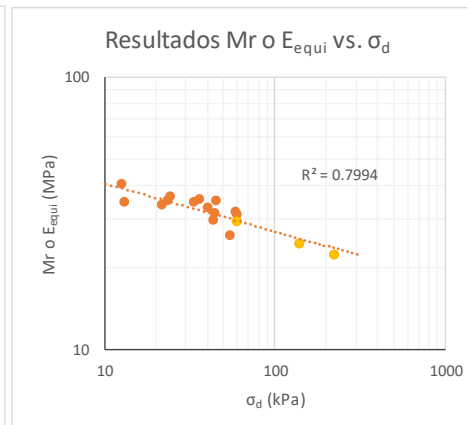
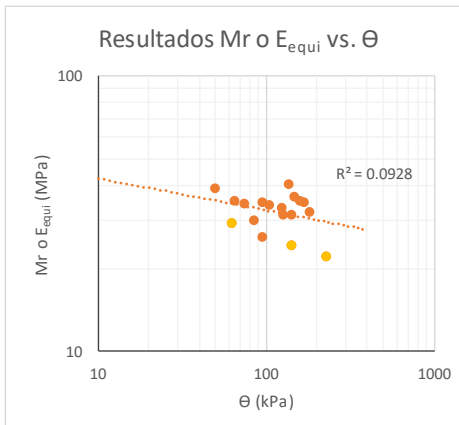
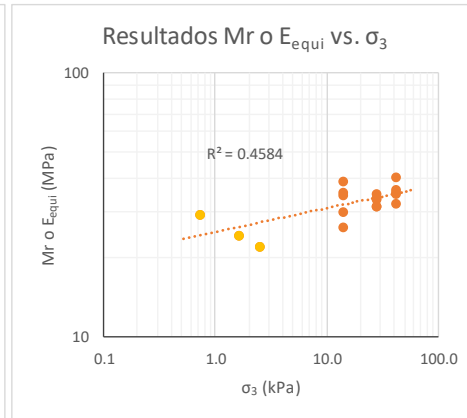
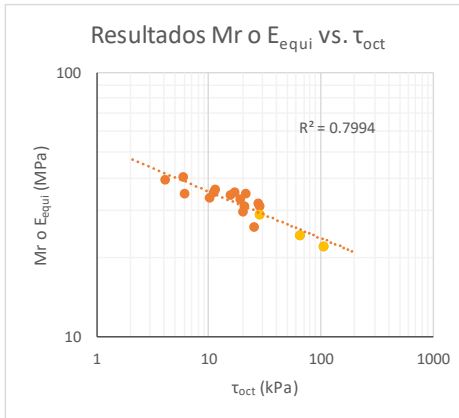


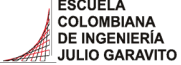

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	
---	--	---

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

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	13.67	12.67	41.40	5.97	136.87	0.00031	40.49
	2	26.66	24.33	41.40	11.47	148.53	0.00067	36.24
	3	39.66	36.33	41.40	17.13	160.53	0.00103	35.27
	4	49.66	44.99	41.40	21.21	169.19	0.00129	34.90
	5	65.33	58.99	41.40	27.81	183.19	0.00185	31.95
	6	14.00	13.00	27.60	6.13	95.80	0.00037	34.77
	7	23.66	21.66	27.60	10.21	104.46	0.00064	33.81
	8	44.33	40.66	27.60	19.17	123.46	0.00123	33.11
	9	49.33	43.99	27.60	20.74	126.79	0.00140	31.34
	10	66.33	60.33	27.60	28.44	143.13	0.00193	31.26
	11	9.33	8.67	13.80	4.09	50.07	0.00022	39.17
	12	25.66	23.33	13.80	11.00	64.73	0.00066	35.15
	13	36.66	33.33	13.80	15.71	74.73	0.00097	34.40
	14	48.33	43.33	13.80	20.43	84.73	0.00146	29.74
	15	58.33	54.33	13.80	25.61	95.73	0.00209	25.99
cCBR	16	72.07	60.06	0.72	28.31	62.22	-	29.16
	17	162.15	138.13	1.62	65.12	143.00	-	24.34
	18	246.23	222.21	2.46	104.75	229.60	-	22.08



	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	--	---

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 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 (°C)	16.6
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99885
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	94.09

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (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/m³)	13.42

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS RELACIONES GRAVIMÉTRICAS Y VOLUMÉTRICAS DEL SUELO INV - E- 122/128 & ASTM D7263-09</p>	
---	--	---

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

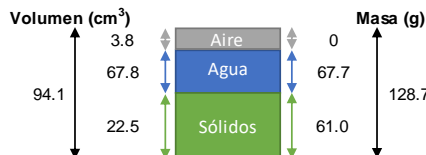
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	143.24	641.99			499.56
Desv.	0.00	0.34			0.02

*Calibración realizada en agosto de 2018

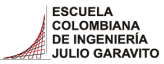

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.29
Temperatura de ensayo (°C)	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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	

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

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 - G _s	2.71
Gravedad específica del agua - G ₁	1.000
$\text{Constante } A = \left[\frac{100000}{W_{\text{muestra}} * \frac{G_s}{G_s - g_1}} \right]$	
A	3157

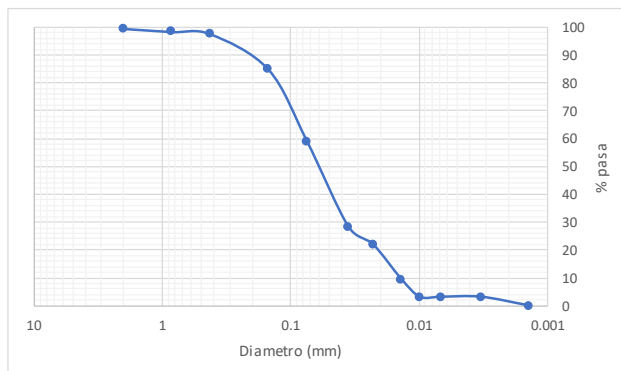
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	8:04
--	------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
8:06	2	1.013	19.1	0.0038	1.009	28.41	0.01355	13.9	0.0357
8:09	5	1.011	19.1	0.0038	1.007	22.10	0.01355	14.4	0.0230
8:19	15	1.007	19.4	0.0038	1.003	9.47	0.01355	15.5	0.0138
8:34	30	1.005	19.8	0.0037	1.001	3.16	0.01355	16.0	0.0099
9:04	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
8:04	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

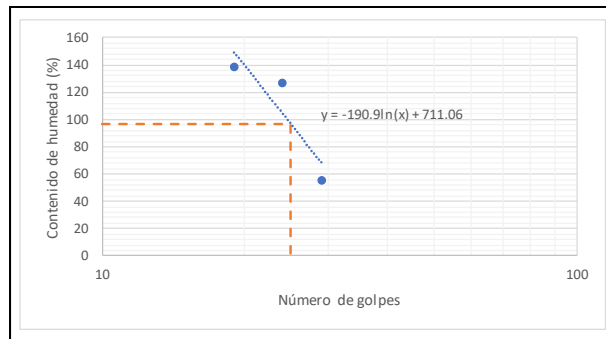
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	41
Finos	< 0.075	59

	<p>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</p>	
---	--	---

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

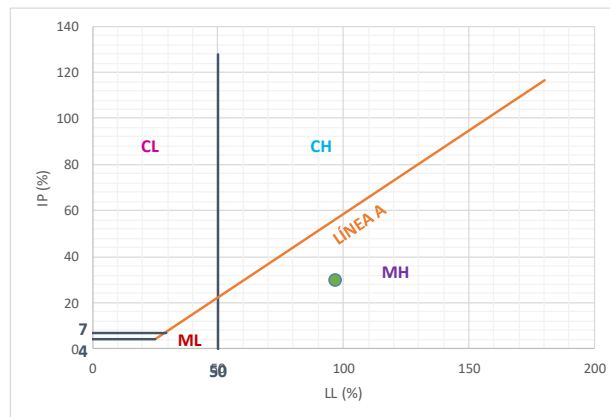
Ensayo	1	2
Número recipiente	57	70
Masa del recipiente (g)	25.131	11.242
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	31.156	17.459
Masa recipiente + suelo seco (g)	28.744	14.993
Contenido de humedad (%)	67	66

LP (%)	66
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	30
---------------	-----------

4. Clasificación del suloe (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH
---------------------------	-----------

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

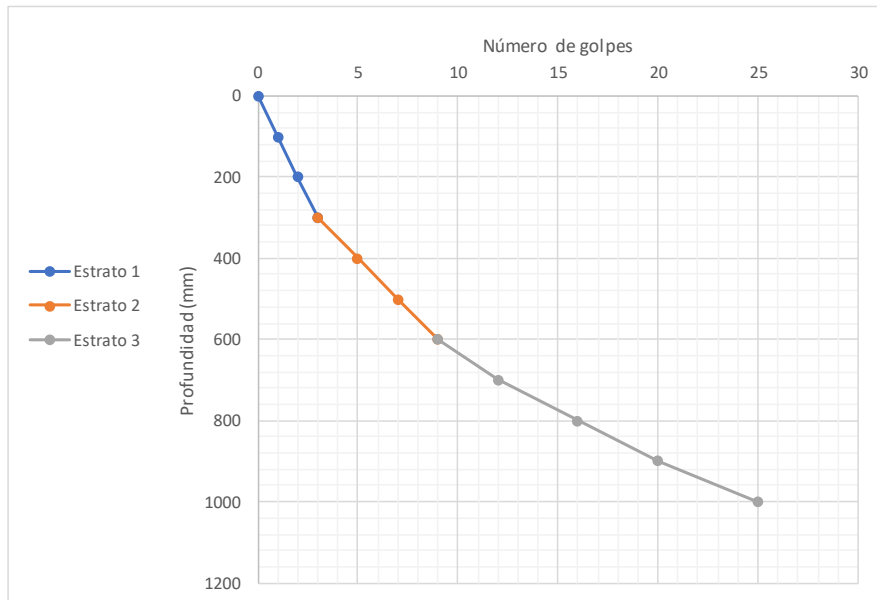
Procedencia:	Calle 134A # 50 - 34
Fecha de exploración:	Enero 14 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

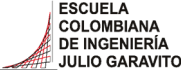

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
1	100	100	100	1	100
1	200	100	100	1	100
1	300	100	100	1	100
2	400	100	50	1	50
2	500	100	50	1	50
2	600	100	50	1	50
3	700	100	33	1	33
4	800	100	25	1	25
4	900	100	25	1	25
5	1000	100	20	1	20

*El ensayo se realizó a nivel de la superficie

Estrato	DN (mm/golpe)	Espesor (mm)
1	100	100
2	50	800
3	25	100



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	50
--	-----------

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

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

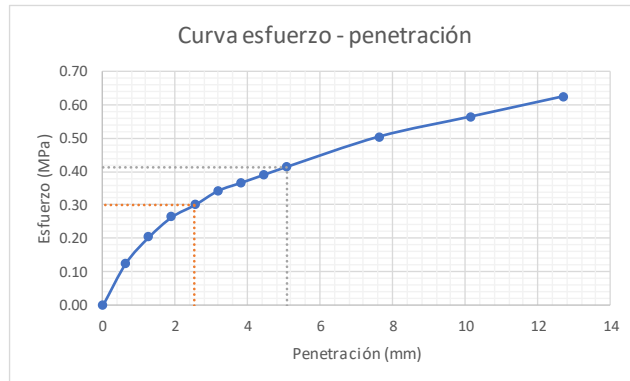
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

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 inmersión (%)	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
---	---	--

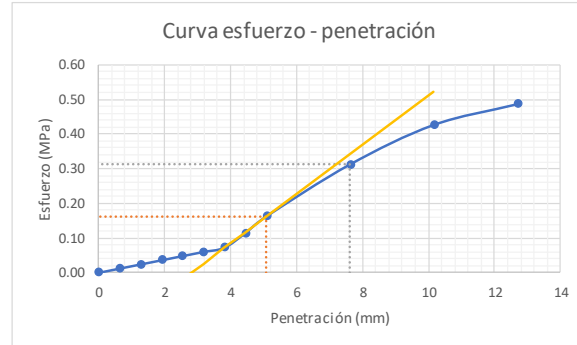
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina				
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34				
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	Fecha ensayos:	Febrero 03 a 08 de 2020	Profundidad (m):	0.50 - 0.70

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	2.37	0.01
0.050	1.270	4.74	0.02
0.075	1.905	7.11	0.04
0.100	2.540	9.48	0.05
0.125	3.175	11.85	0.06
0.150	3.810	14.22	0.07
0.175	4.445	22.51	0.11
0.200	5.080	31.99	0.16
0.300	7.620	61.61	0.31
0.400	10.160	84.12	0.43
0.500	12.700	95.97	0.49



Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.16
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.31
CBR _{2,54} (%)	2.35
CBR _{5,08} (%)	3.02
CBR con inmersión (%)	3.0

Humedad final	
# recipiente	4
Masa recipiente (g)	108.43
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	248.28
Masa recipiente + muestra seca (g)	174.74
Contenido de humedad (%)	110.9



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

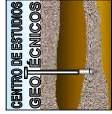
Dato	Datos de la muestra antes del ensayo			
	1	2	3	4
Altura (mm)	128.41	128.7	128.67	127.57
Diámetro (mm)	62.65	62.87	62.82	62.02
				62.59

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	Presión de cámara (kPa)	S ₃	Carga		Carga de contacto real (N)	Carga cíclica real (N)	P _{cíclico}	P _{max}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{max r}	Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico r}	Esfuerzo real (kPa)	S _{contacto r}	Esfuerzo de contacto real (kPa)	Deformación resiliente			Módulo resiliente (MPa)
			real (N)	(N)												real (N)	LVDT1 (mm)	H ₂	
0	41.4	24.8	74	67	7	24.05	21.78	2.28	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	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	0.034	0.034	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	0.103	0.103	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	0.156	0.156	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	0.218	0.218	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	0.264	0.264	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	0.065	0.065	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	0.102	0.102	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	0.155	0.155	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	0.215	0.215	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	0.300	0.300	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	0.030	0.030	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	0.128	0.128	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	0.165	0.165	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	0.225	0.225	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	0.279	0.279	0.279	0.279	0.279	0.00217	23.5	

Datos de humedad al inicio 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
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

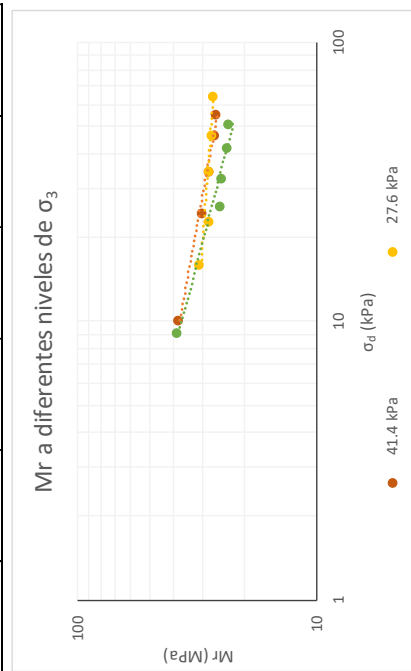
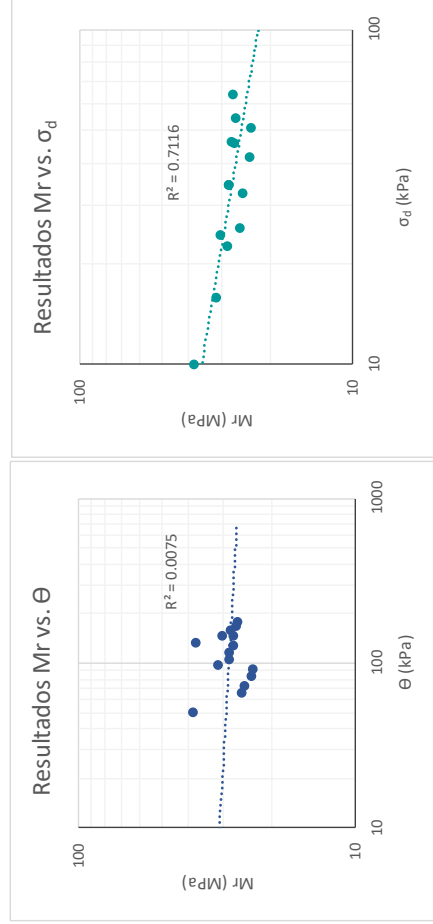
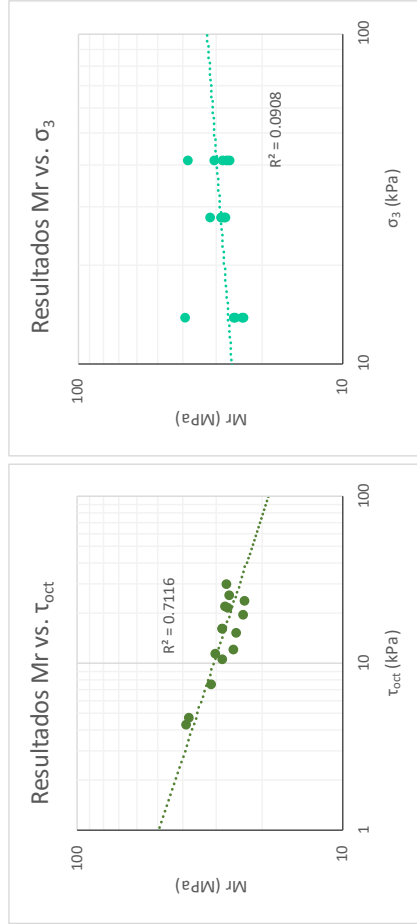


Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina		
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34		
Fecha e exploración:	Enero 14 de 2020	Fecha ensayos:	Febrero 03 a 08 de 2020
		Profundidad (m):	0.50 - 0.70

Ecuaciones

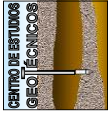
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d \quad \theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$$

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

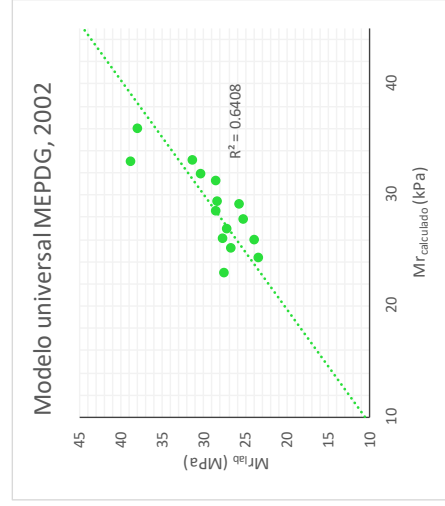
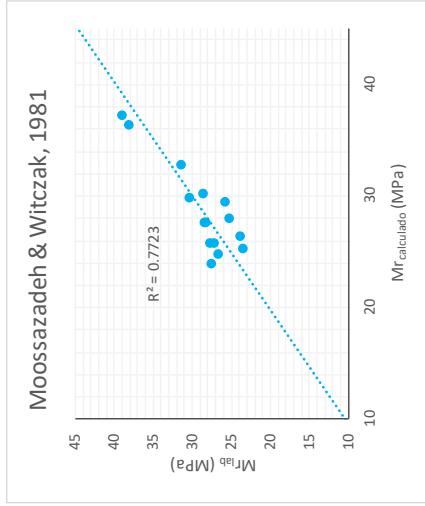





ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



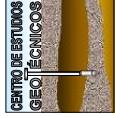
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020
Fecha ensayos:	Febrero 03 a 08 de 2020
Profundidad (m):	0.50 - 0.70



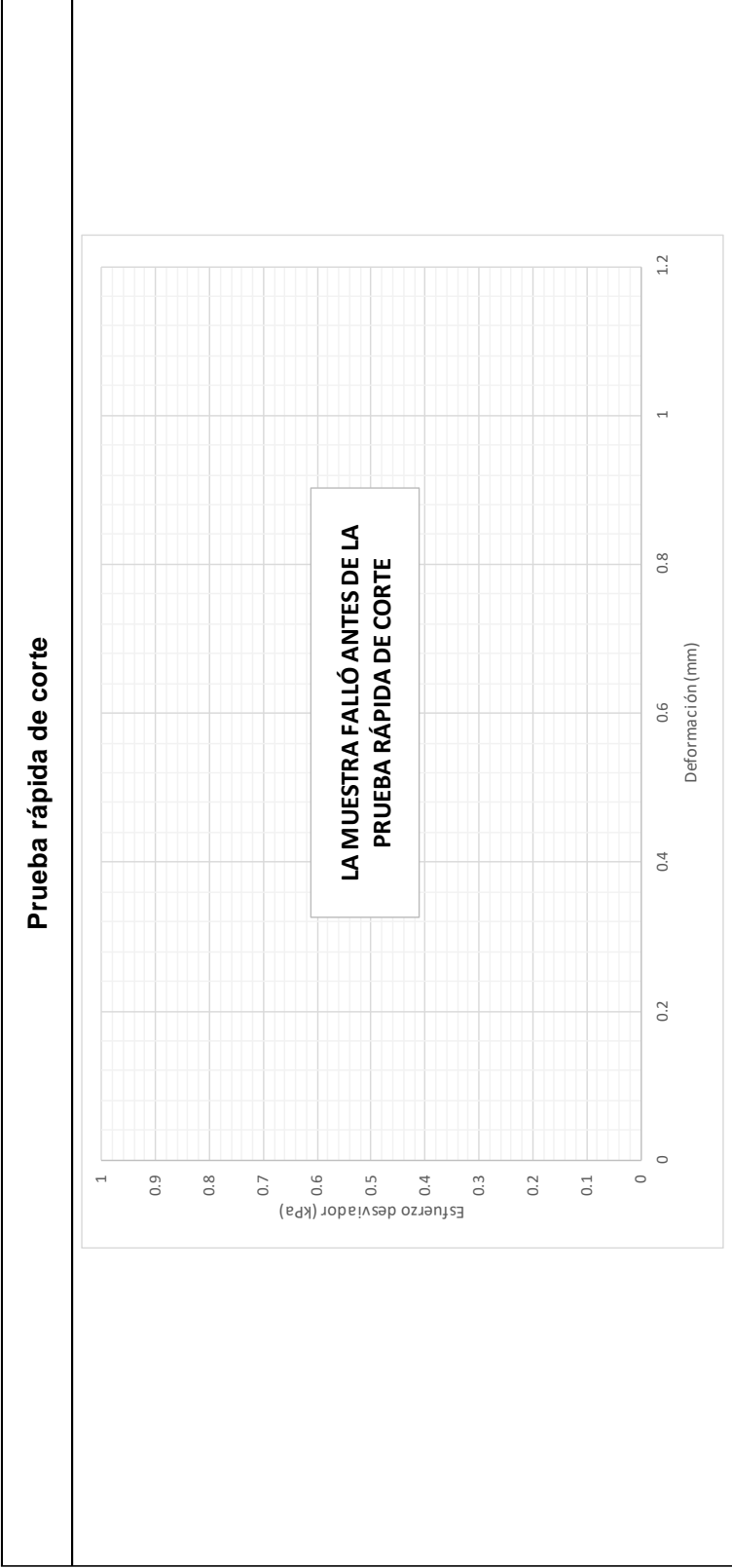
Moossazadeh & Witczak, 1981		Modelo universal MEPDG, 2002						
$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$		$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{T_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$						
k_1	21.642	k_1	0.378					
k_2	-0.225	k_2	0.098					
P_a (kPa)	102	k_3	-2.128					
		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



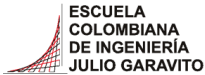

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



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



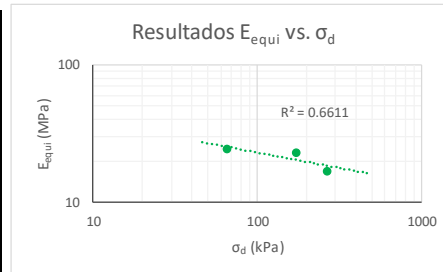
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.128
Máximo esfuerzo (kPa)	0.00
Máxima deformación (mm)	#N/D
Máxima deformación (%)	#N/D

	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)	
---	--	---

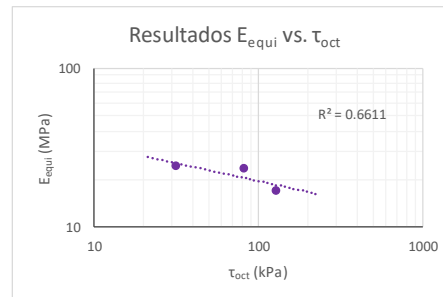
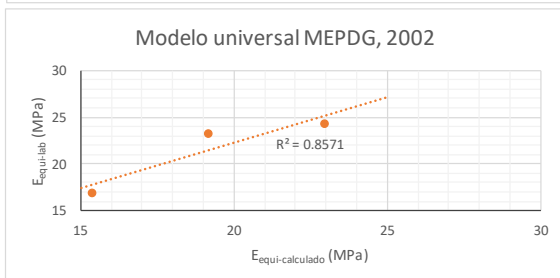
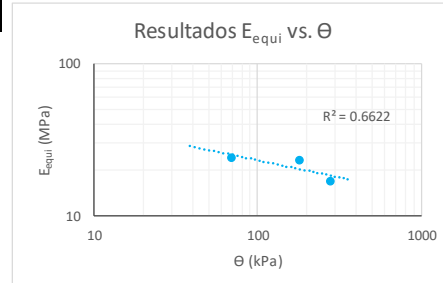
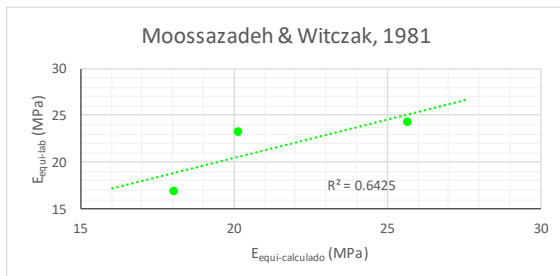
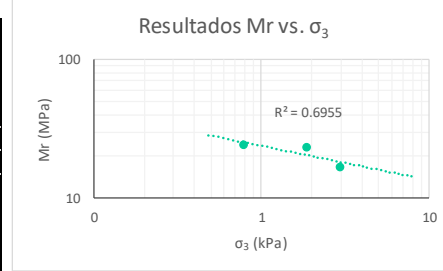
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café, manchas negras y presencia de raíces y arena gruesa a fina		
Procedencia (Localización):	Calle 134A # 50 - 34		
Fecha exploración:	Enero 14 de 2020	Fecha ensayos:	Febrero 03 a 08 de 2020
		Profundidad (m):	0.50 - 0.70

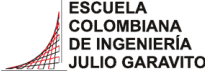

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	111
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Area del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.632	1.281	2.546
Carga máxima pistón (kg) P_{max}	15.402	36.729	58.055
Carga cíclica pistón (kg) P_{cíclico}	13.032	34.359	53.316
Carga de contacto pistón (kg) P_{contacto}	2.370	2.370	4.739
Esfuerzo máximo pistón (kPa) σ₁	0.078	0.186	0.294
Esfuerzo desviador pistón (MPa) σ_d	0.066	0.174	0.270
Esfuerzo confinamiento (MPa) σ₃	0.001	0.002	0.003
Cortante octaédrico (MPa) τ_{oct}	0.031	0.082	0.127
Invariante de esfuerzos (MPa) θ	0.068	0.180	0.279
Deformación elástica (mm) u	0.062	0.169	0.357
Módulo equivalente (MPa) E_{equi}	24.3	23.2	16.9

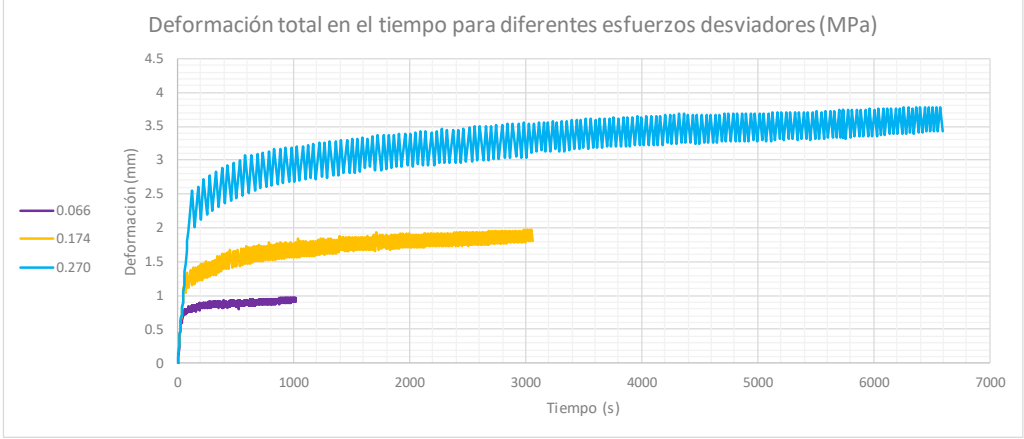


Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$		
k₁	23.000		k₁	0.449	
k₂	-0.250		k₂	0.453	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-1.910	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{eq,lab} (MPa)	E_{eq,cal} (MPa)	Difer² (MPa)	E_{eq,lab} (MPa)	E_{eq,cal} (MPa)	Difer² (MPa)
24.3	25.64	1.8	24.3	22.97	1.8
23.2	20.12	9.6	23.2	19.16	16.4
16.9	18.03	1.4	16.9	15.37	2.2
	Σ	12.7		Σ	20.5

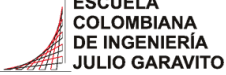



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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

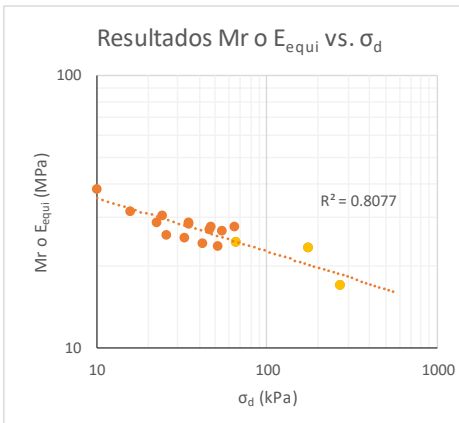
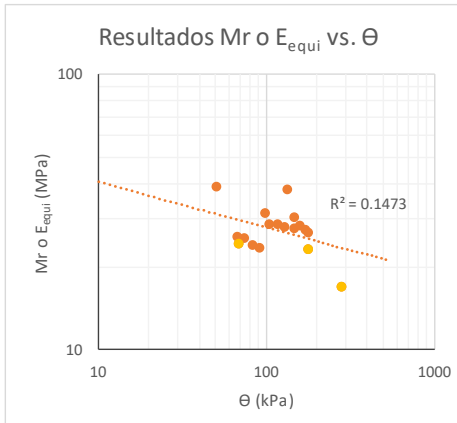
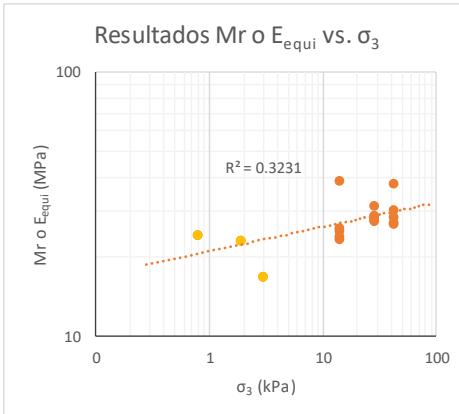
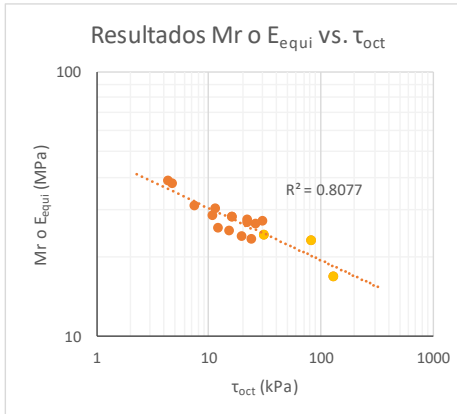




Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	--	--

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

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	11.05	10.08	41.40	4.75	134.28	0.00026	38.03
	2	26.65	24.38	41.40	11.49	148.58	0.00080	30.37
	3	38.03	34.45	41.40	16.24	158.65	0.00122	28.34
	4	50.38	46.15	41.40	21.76	170.35	0.00170	27.17
	5	61.10	54.93	41.40	25.89	179.13	0.00206	26.70
	6	16.58	15.93	27.60	7.51	98.73	0.00051	31.44
	7	25.03	22.75	27.60	10.72	105.55	0.00079	28.63
	8	37.70	34.45	27.60	16.24	117.25	0.00121	28.53
	9	51.35	46.48	27.60	21.91	129.28	0.00168	27.74
	10	70.53	64.35	27.60	30.34	147.15	0.00234	27.53
	11	9.43	9.10	13.80	4.29	50.50	0.00023	38.93
	12	28.93	25.68	13.80	12.10	67.08	0.00100	25.74
	13	35.75	32.50	13.80	15.32	73.90	0.00129	25.28
	14	46.80	41.93	13.80	19.76	83.33	0.00175	23.91
	15	57.53	51.03	13.80	24.05	92.43	0.00217	23.47
cCBR	16	78.07	66.06	0.78	31.14	68.40	-	24.32
	17	186.18	174.16	1.86	82.10	179.75	-	23.22
	18	294.28	270.25	2.94	127.40	279.08	-	16.86



	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 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 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 (°)	16.6
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99885
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	151.82

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (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/m³)	14.55

	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 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

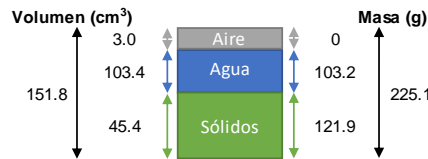
4. Calibración del picnómetro

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

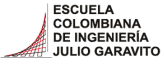

*Calibración realizada en agosto de 2018

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.2
Temperatura de ensayo (°C)	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

	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123</p>	
---	---	---

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

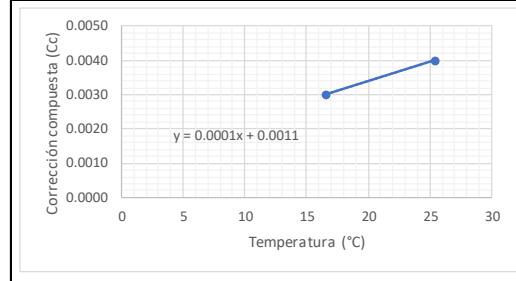
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

Masa del recipiente (g)	17.65
Masa recipiente + muestra seca al aire (g)	33.93
Masa recipiente + muestra seca al horno (g)	33.8
Masa del agua (g)	0.13
Masa material seco (g)	16.15
Humedad higroscópica (%)	0.8
Factor corrección Ch	0.9920

2. Corrección compuesta por la lectura del hidrómetro

Hidrómetro utilizado	151H
----------------------	------

Rango de temperaturas (°C)	16.6	25.4
Lectura en solución de hexametafosfato	1.0030	1.0040
Corrección compuesta (Cc)	0.0030	0.0040



3. Análisis por hidrometría

Masa usada para el ensayo [Mas] (g)	50.68
Masa seca al horno [Mas*Ch] (g)	50.3
Gravedad específica del suelo - G _s	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	3166

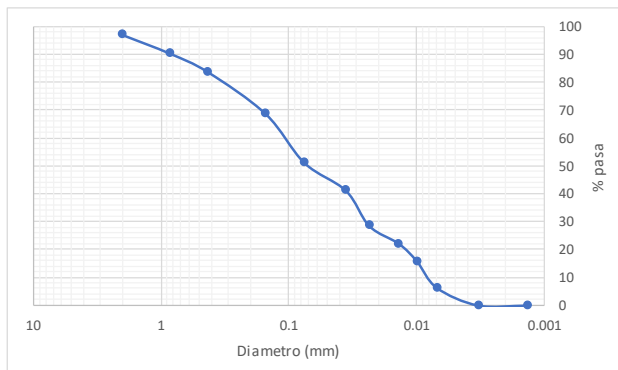
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	8:40
--	------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	Cc	R _{CORREGIDO}	% suelo suspensión	K	L (cm)	φ partículas (mm)
8:42	2	1.016	17.2	0.0031	1.013	41.16	0.01397	12.9	0.0355
8:45	5	1.013	17.2	0.0031	1.009	28.49	0.01397	13.9	0.0233
8:55	15	1.010	17.2	0.0031	1.007	22.16	0.01397	14.4	0.0137
9:10	30	1.008	17.8	0.0031	1.005	15.83	0.01397	15.0	0.0099
9:40	60	1.005	20.2	0.0034	1.002	6.33	0.01345	15.8	0.0069
12:57	250	1.004	24.2	0.0039	1.000	0.00	0.01283	16.3	0.0033
8:40	1440	1.004	25.0	0.0040	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)	50.3
Masa seca después de lavado retiene No 200 (g)	24.6
% Retenido en tamiz No 200	48.9
% Pasa el tamiz No 200	51.1

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	1.49	2.96	97.0	3.0
0.850	No 20	3.36	6.68	90.4	9.6
0.425	No 40	3.38	6.72	83.6	16.4
0.150	No 100	7.56	15.04	68.6	31.4
0.075	No 200	8.78	17.46	51.1	48.9



Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	3
Media	2 - 0.425	13
Fina	0.425 - 0.075	33
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	51

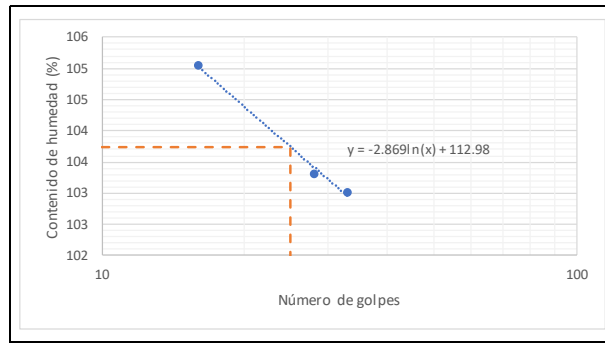
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	49
Finos	< 0.075	51

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>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</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	---	---

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

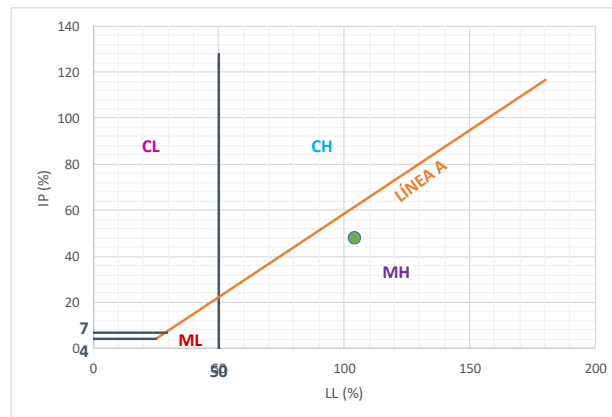
Ensayo	1	2
Número recipiente	13	75
Masa del recipiente (g)	7.172	10.704
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	14.717	17.202
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.034	14.886
Contenido de humedad (%)	55	55

LP (%)	55
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	48
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH
---------------------------	-----------

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

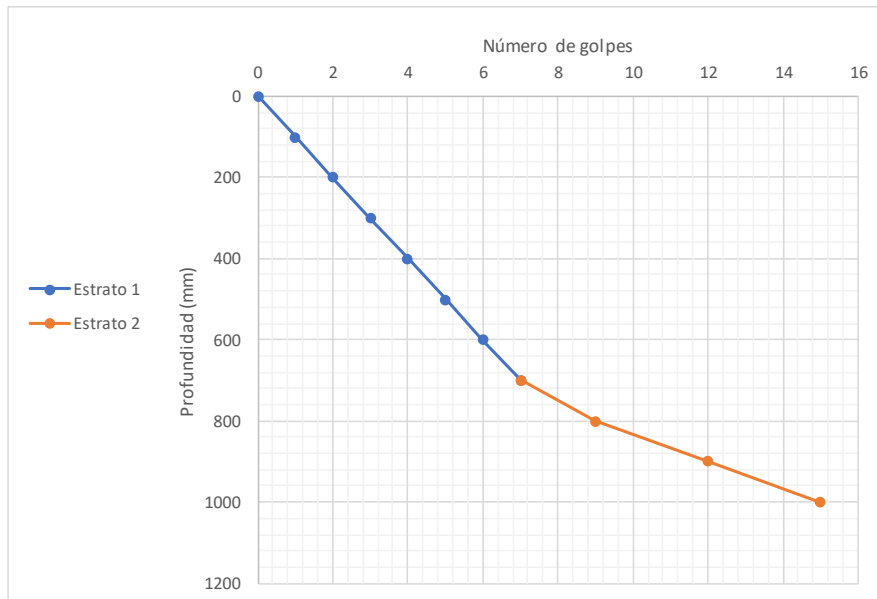
Procedencia:	Calle 125 con Autopista Norte
Fecha de exploración:	Febrero 13 de 2020

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



DN del estrato donde se tomaron las muestras (mm/golpe)	100
--	------------



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA
INV - E - 148 - 13



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

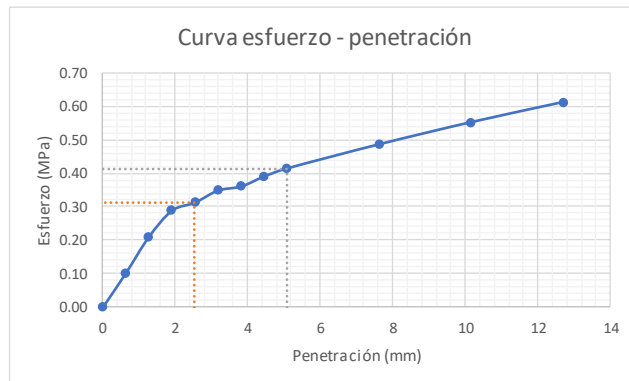
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

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 inmersión (%)	4.5

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	---	---

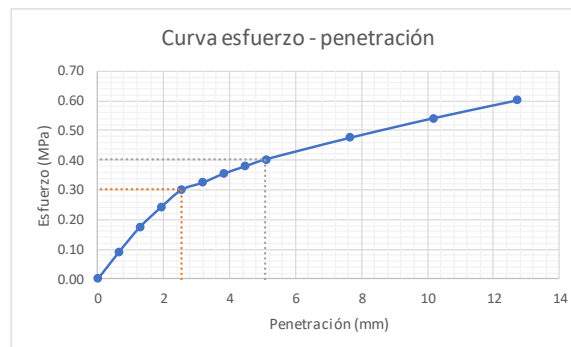
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces		
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte		
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	Fecha ensayos:	Febrero 14 a 21 de 2020
		Profundidad (m):	0.40 - 0.70

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	59.24	0.30
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)	0.30
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.40
CBR _{2,54} (%)	4.36
CBR _{5,08} (%)	3.89
CBR con inmersión (%)	4.4

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
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
Altura (mm)	138.45	138.47	137.71	137.41
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


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
Altura (mm)	138.45	138.47	137.71	137.41
Diámetro (mm)	62.76	62.4	62.6	62.19
				62.49


Ciclo	Ensayo										Módulo resiliente (MPa)											
	Presión de cámara (kPa)	S ₃	Carga máxima real (N)	F _{max}	Carga cíclica real (N)	P _{cíclico}	Carga de contacto real (N)	F _{contacto}	Esfuerzo máximo real (kPa)	S _{max r}		Esfuerzo cíclico real (kPa)	S _{cíclico r}	Esfuerzo real (kPa)	S _{contacto r}	Deformación resiliente LVDT1 (mm)	H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm)	H ₂	Deformación resiliente promedio	H _{promedio}	Deformación resiliente unitaria
0	41.4	24.8	78	78	71	71	7	25.43	25.43	23.15	23.15	2.28	2.28	0.129	0.129	0.036	0.128	0.129	0.036	0.129	0.00093	24.9
1	41.4	12.4	35	35	33	33	2	11.41	11.41	10.76	10.76	0.65	0.65	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.00026	41.3
2	41.4	24.8	98	98	91	91	7	31.96	31.96	29.67	29.67	2.28	2.28	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.00094	31.5
3	41.4	37.3	112	112	102	102	10	36.52	36.52	33.26	33.26	3.26	3.26	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.00108	30.8
4	41.4	49.7	111	111	96	96	15	36.19	36.19	31.30	31.30	4.89	4.89	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.00113	27.7
5	41.4	62	201	201	182	182	19	65.54	65.54	59.35	59.35	6.20	6.20	0.316	0.316	0.316	0.316	0.316	0.316	0.316	0.00229	25.9
6	27.6	12.4	35	35	33	33	2	11.41	11.41	10.76	10.76	0.65	0.65	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.00027	40.1
7	27.6	24.8	83	83	78	78	5	27.06	27.06	25.43	25.43	1.63	1.63	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.00086	29.5
8	27.6	37.3	103	103	92	92	11	33.59	33.59	30.00	30.00	3.59	3.59	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.00107	28.2
9	27.6	49.7	140	140	125	125	15	45.65	45.65	40.76	40.76	4.89	4.89	0.221	0.221	0.221	0.221	0.221	0.221	0.221	0.00160	25.5
10	27.6	62	176	176	157	157	19	57.39	57.39	51.19	51.19	6.20	6.20	0.264	0.264	0.264	0.264	0.264	0.264	0.264	0.00191	26.8
11	13.8	12.4	57	57	57	57	0	18.59	18.59	18.59	18.59	0.00	0.00	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.00058	32.1
12	13.8	24.8	55	55	49	49	6	17.93	17.93	15.98	15.98	1.96	1.96	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.00050	32.0
13	13.8	37.3	113	113	102	102	11	36.85	36.85	33.26	33.26	3.59	3.59	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.00109	30.6
14	13.8	49.7	151	151	135	135	16	49.24	49.24	44.02	44.02	5.22	5.22	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.00155	28.4
15	13.8	62	181	181	162	162	19	59.02	59.02	52.82	52.82	6.20	6.20	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.00204	25.9

Datos de humedad al inicio del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	126.23
Masa recipiente + muestra seca (g)	712.2
Masa del agua (g)	440
Masa material seco (g)	272.2
Masa material húmedo (g)	313.77
Humedad (%)	585.97
	86.75

Datos de humedad al final del ensayo	
# recipiente	N/A
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	126.23
Masa recipiente + muestra seca (g)	711.31
Masa del agua (g)	440
Masa material seco (g)	271.31
Masa material húmedo (g)	313.77
Humedad (%)	585.08
	86.47



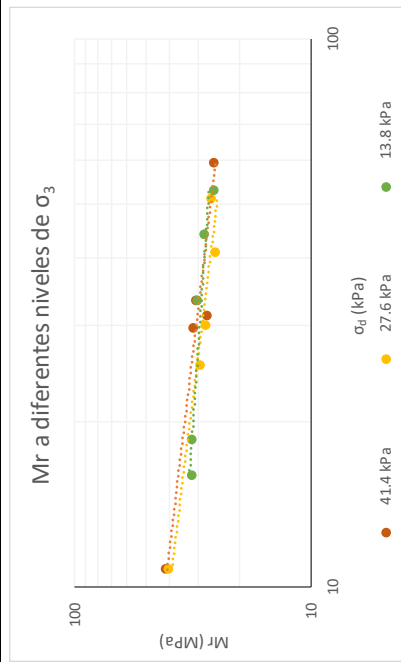
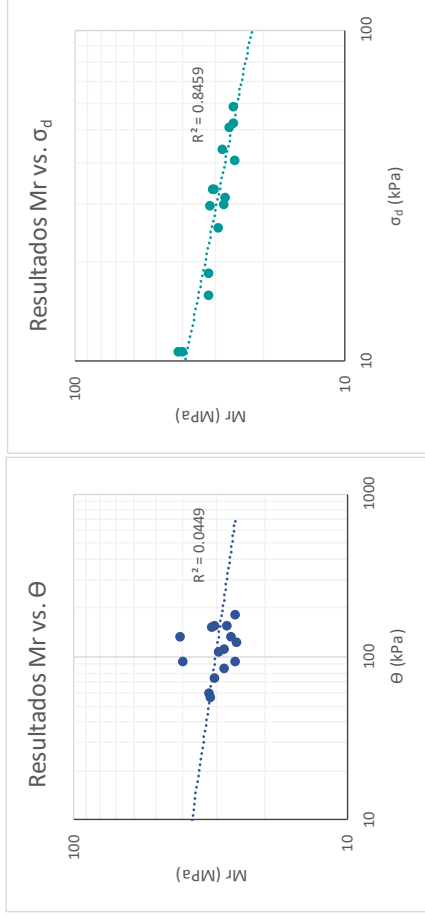
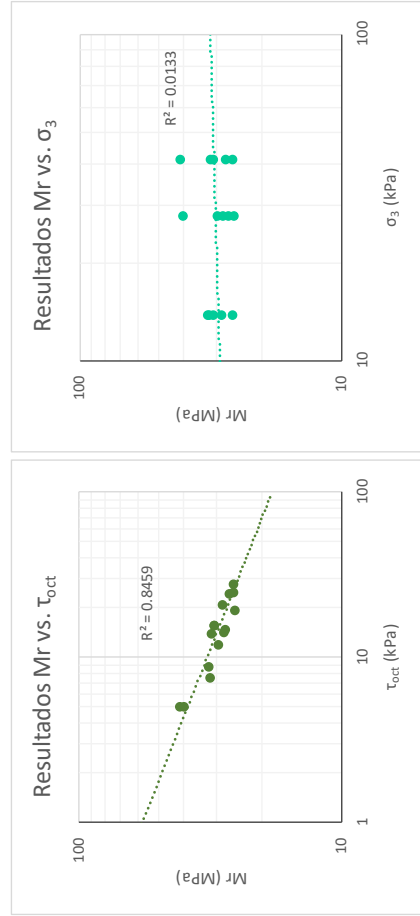
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13




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						
$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d$ $\theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$						
Ciclo	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)
1	10.76	41.40	5.0726	134.961	41.3	41.3
2	29.67	41.40	13.9881	153.873	31.5	31.5
3	33.26	41.40	15.6790	157.460	30.8	30.8
4	31.30	41.40	14.7567	155.504	27.7	27.7
5	59.35	41.40	27.9762	183.547	25.9	25.9
6	10.76	27.60	5.0726	93.561	40.1	40.1
7	25.43	27.60	11.9898	108.234	29.5	29.5
8	30.00	27.60	14.1418	112.799	28.2	28.2
9	40.76	27.60	19.2144	123.560	25.5	25.5
10	51.19	27.60	24.1333	133.995	26.8	26.8
11	18.59	13.80	8.7618	59.987	32.1	32.1
12	15.98	13.80	7.5321	57.378	32.0	32.0
13	33.26	13.80	15.6790	74.660	30.6	30.6
14	44.02	13.80	20.7516	85.421	28.4	28.4
15	52.82	13.80	24.9019	94.225	25.9	25.9



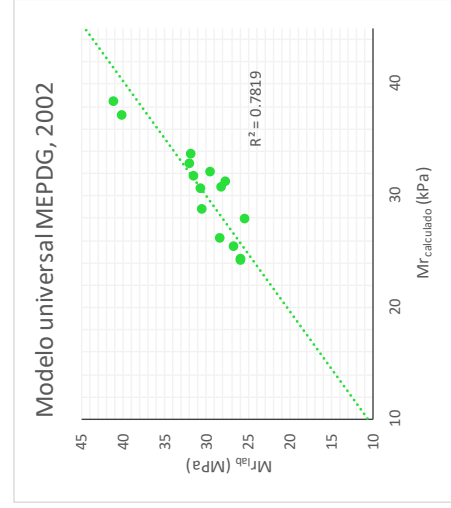
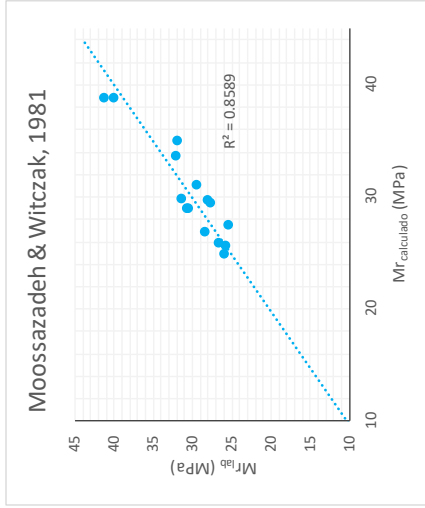


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



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



Ciclo	Moosazadeh & Witczak, 1981				Modelo universal MEPDG, 2002			
	Mr_obs (MPa)	Mr_cal (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (Mpa)	Mr_obs (MPa)	Mr_cal (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)
1	41.3	38.927	2.3	5.4	41.3	38.938	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	0.1	25.9	24.297	1.6	2.4
			Σ	44.5			Σ	68.9

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_3} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

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

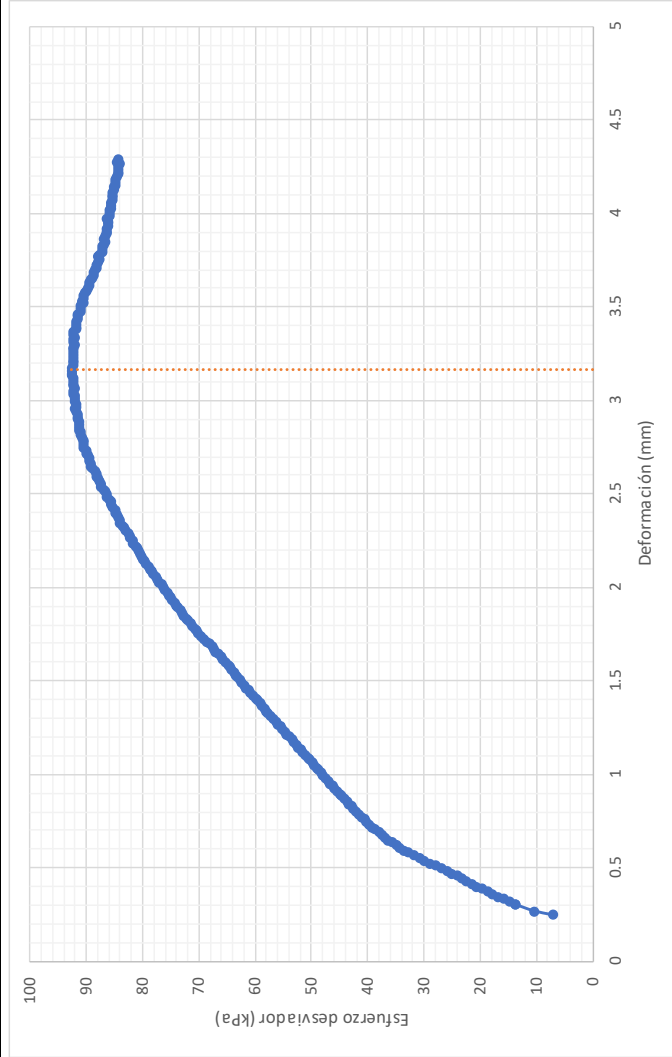


ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
 INV - E - 156 - 13

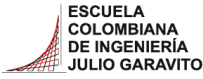


Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces		
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte		
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	Fecha ensayos:	Febrero 14 a 21 de 2020
Fecha exploración:		Profundidad (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



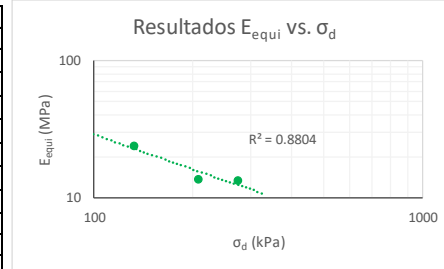
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)



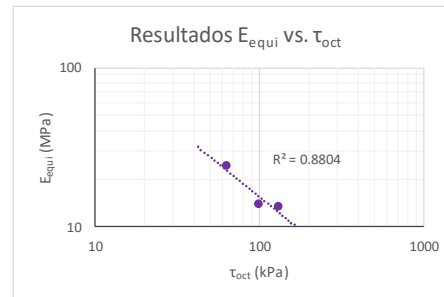
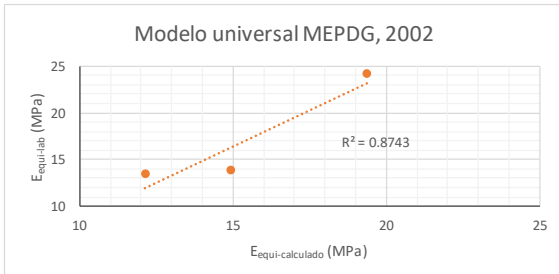
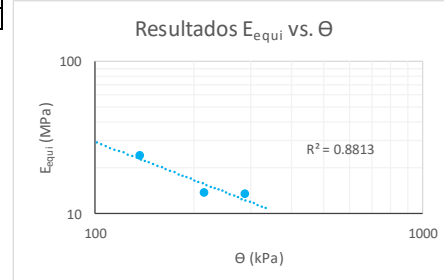
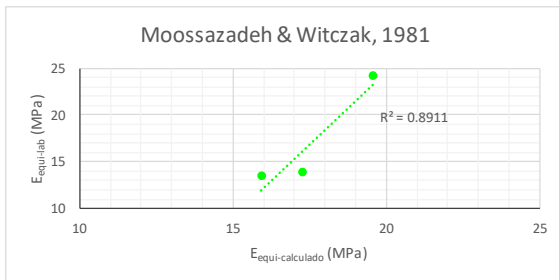
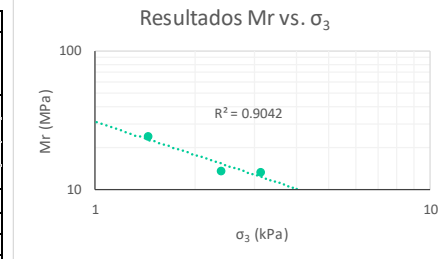
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	Fecha ensayos:	Febrero 14 a 21 de 2020	Profundidad (m):	0.40 - 0.70

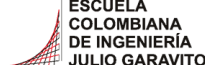

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	85
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo		1	2	3
Penetración objetivo (mm)		0.625	1.288	2.539
Carga máxima pistón (kg)	P_{max}	28.435	46.870	61.610
Carga cíclica pistón (kg)	P_{cíclico}	26.065	40.946	54.501
Carga de contacto pistón (kg)	P_{contacto}	2.370	5.924	7.109
Esfuerzo máximo pistón (kPa)	σ₁	0.144	0.238	0.312
Esfuerzo desviador pistón (MPa)	σ_d	0.132	0.208	0.276
Esfuerzo confinamiento (MPa)	σ₃	0.001	0.002	0.003
Cortante octaédrico (MPa)	τ_{oct}	0.062	0.098	0.130
Invariante de esfuerzos (MPa)	θ	0.136	0.215	0.286
Deformación elástica (mm)	u	0.124	0.335	0.457
Módulo equivalente (MPa)	E_{equi}	24.1	13.8	13.4

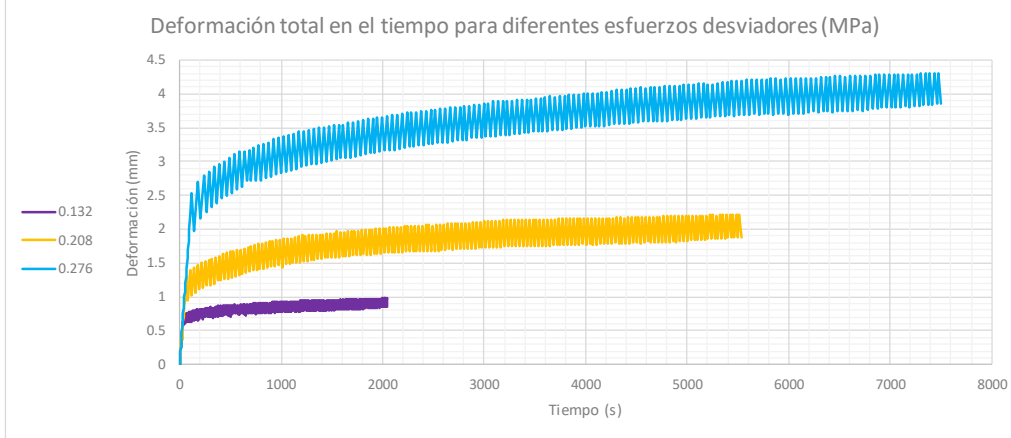


Moosazadeh & Witzcak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$		
k₁	21.056		k₁	0.395	
k₂	-0.280		k₂	0.125	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-1.614	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
24.1	19.58	20.5	24.1	19.37	22.5
13.8	17.26	11.9	13.8	14.94	1.3
13.4	15.93	6.2	13.4	12.15	1.7
	Σ	38.6		Σ	25.4

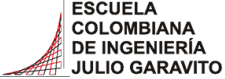



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

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

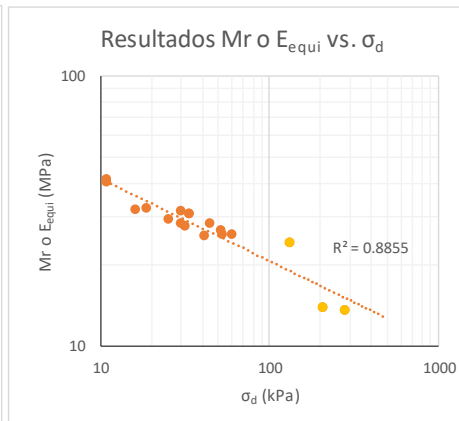
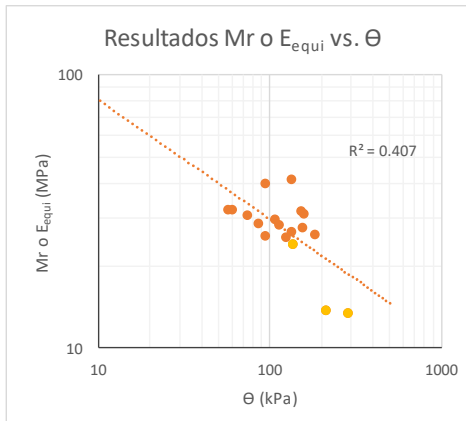
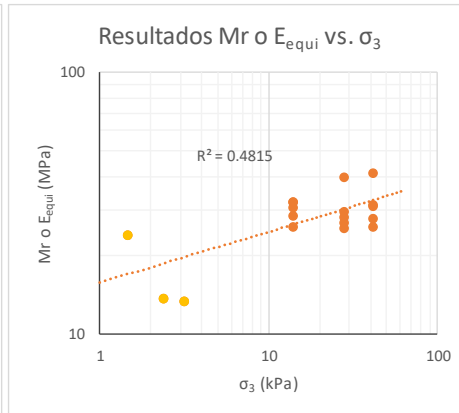
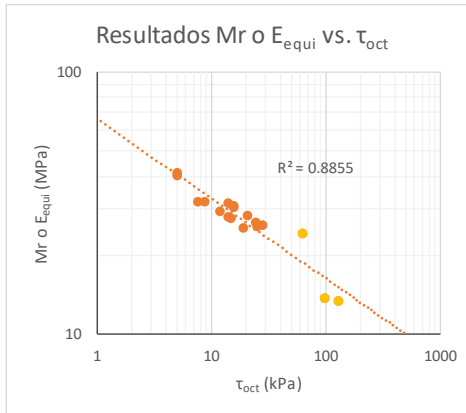


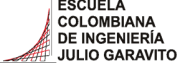

Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	---	---

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

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	11.41	10.76	41.40	5.07	134.96	0.00026	41.25
	2	31.96	29.67	41.40	13.99	153.87	0.00094	31.50
	3	36.52	33.26	41.40	15.68	157.46	0.00108	30.81
	4	36.19	31.30	41.40	14.76	155.50	0.00113	27.69
	5	65.54	59.35	41.40	27.98	183.55	0.00229	25.92
	6	11.41	10.76	27.60	5.07	93.56	0.00027	40.14
	7	27.06	25.43	27.60	11.99	108.23	0.00086	29.50
	8	33.59	30.00	27.60	14.14	112.80	0.00107	28.16
	9	45.65	40.76	27.60	19.21	123.56	0.00160	25.45
	10	57.39	51.19	27.60	24.13	133.99	0.00191	26.76
	11	18.59	18.59	13.80	8.76	59.99	0.00058	32.06
	12	17.93	15.98	13.80	7.53	57.38	0.00050	31.96
	13	36.85	33.26	13.80	15.68	74.66	0.00109	30.60
	14	49.24	44.02	13.80	20.75	85.42	0.00155	28.39
	15	59.02	52.82	13.80	24.90	94.22	0.00204	25.85
cCBR	16	144.13	132.12	1.44	62.28	136.45	-	24.11
	17	237.58	207.55	2.38	97.84	214.68	-	13.81
	18	312.30	276.26	3.12	130.23	285.63	-	13.44



	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 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 del contenido de humedad

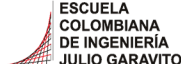

Masa del recipiente (g)	112.77
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	174.73
Masa recipiente + suelo seco (g)	145.20
Contenido de humedad (%)	91.1

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 (°)	16.8
Densidad del agua (g/cm ³)	0.99881
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0.93
Volumen de la muestra (cm³)	129.63

3. Peso unitario de la muestra

Masa de la muestra (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/m³)	14.17

	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 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

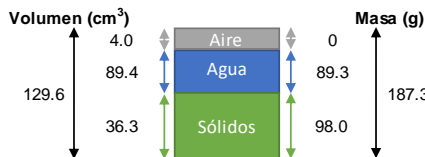
Medida	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro y agua (g)	Temp. de calib(°)	Densidad agua (g/cm ³)	V. picnómetro (cm ³)
1	143.24	641.53	23.4	0.99745	499.56
2	143.24	641.73	21.4	0.99791	499.53
3	143.24	642.24	16.6	0.99885	499.57
4	143.24	642.25	16.4	0.99888	499.57
5	143.24	642.22	16.8	0.99881	499.57
Prom	143.24	641.99			499.56
Desv.	0.00	0.34			0.02

*Calibración realizada en agosto de 2018

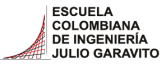

5. Determinación de la gravedad específica

Masa seca material (g)	49.4
Temperatura de ensayo (°C)	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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS (HIDROMETRÍA) INV - E - 123	
---	--	---

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

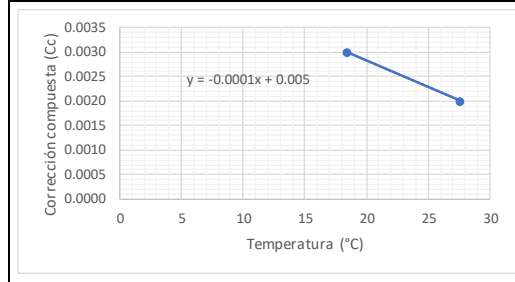
1. Factor de corrección higroscópica (Ch)

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 (°C)	18.4	27.6
Lectura en solución de hexametáfosfato	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 - G _s	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

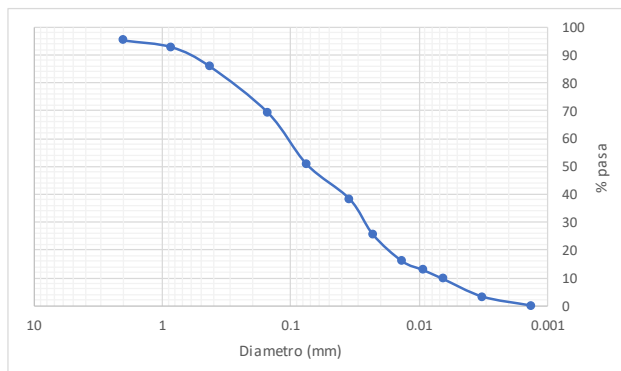
Hora de inicio del ensayo (HH:MM)	11:33
--	-------

Hora	Tiempo (min)	R	Temp. (°C)	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)	%
<i>Arenas</i>		
Gruesa	4.75 - 2	5
Media	2 - 0.425	9
Fina	0.425 - 0.075	35
<i>Finos</i>		
Arcilla - Limo	> 0.075	51

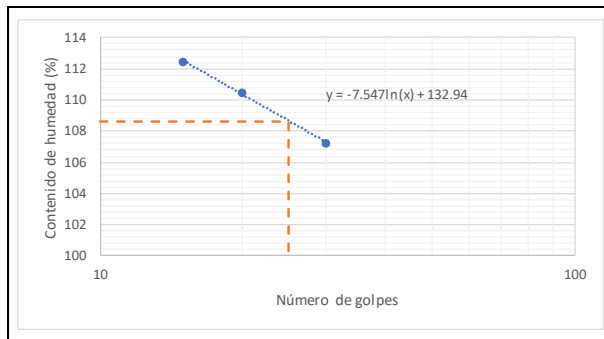
Pocentaje partículas		
Partículas	Rango tamaños (mm)	%
Arenas	4.75 - 0.075	49
Finos	< 0.075	51

	<p>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</p>	
---	--	---

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

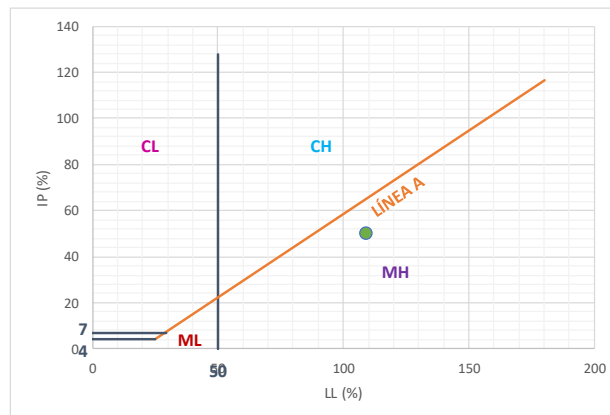
Ensayo	1	2
Número recipiente	3	4
Masa del recipiente (g)	7.256	7.428
Masa recipiente + suelo húmedo (g)	15.086	15.623
Masa recipiente + suelo seco (g)	12.19	12.629
Contenido de humedad (%)	59	58

LP (%)	58
---------------	-----------



3. Determinación índice de plasticidad

IP (%)	51
---------------	-----------

4. Clasificación del suelo (Sistema SUCS) - Carta de Casagrande



Clasificación SUCS	MH
---------------------------	-----------

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO INV - E - 172 - 13</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

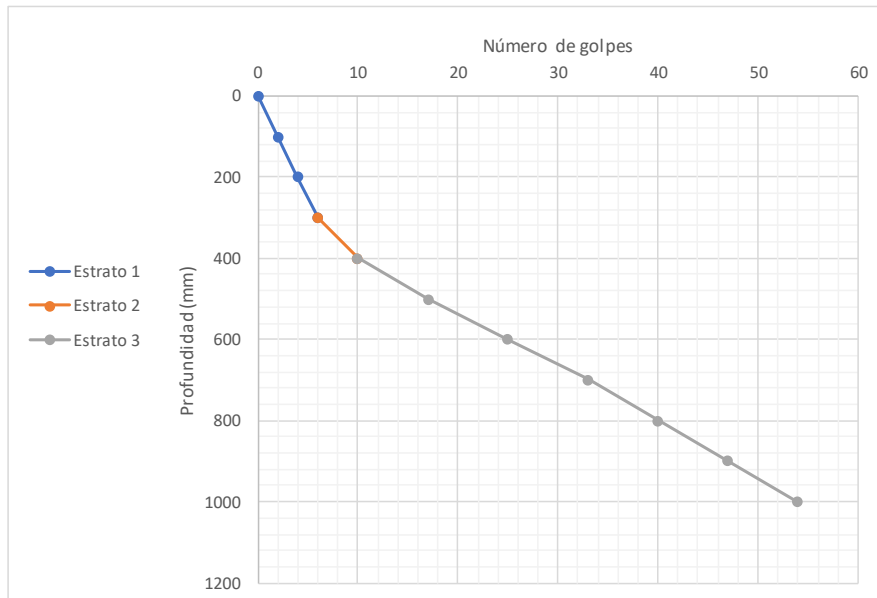
Procedencia:	Calle 125 con Autopista Norte
Fecha de exploración:	Febrero 13 de 2020

Peso del martillo (kg):	8
Pofundidad del punto cero bajo superficie (m):	0

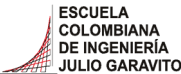

Número de golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración entre lecturas	Penetración por golpe (mm)	Factor del martillo	Índice PDC (mm/golpe)
0	0	-	-	-	-
2	100	100	50	1	50
2	200	100	50	1	50
2	300	100	50	1	50
4	400	100	25	1	25
7	500	100	14	1	14
8	600	100	13	1	13
8	700	100	13	1	13
7	800	100	14	1	14
7	900	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 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS CBR DE SUELOS SOBRE MUESTRA INALTERADA INV - E - 148 - 13	
---	---	---

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

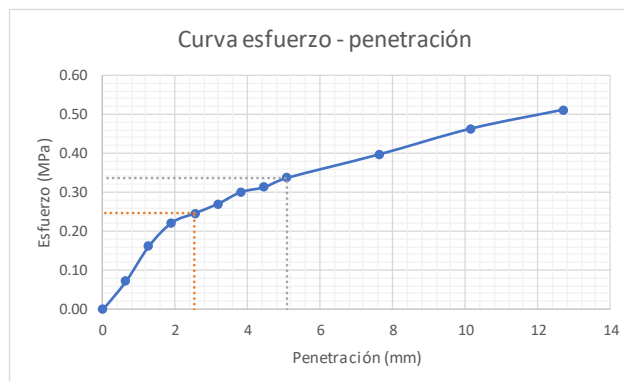
ENSAYO A HUMEDAD NATURAL

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	78.20	0.40
0.400	10.160	91.23	0.46
0.500	12.700	100.71	0.51

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 inmersión (%)	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
---	---	--

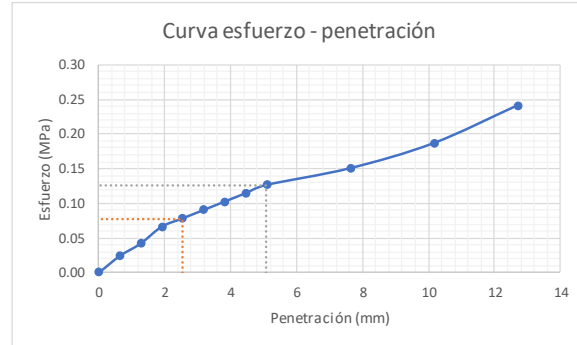
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces				
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte				
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	Fecha ensayos:	Febrero 21 a 28 de 2020	Profundidad (m):	0.40 - 0.70

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	4.74	0.02
0.050	1.270	8.29	0.04
0.075	1.905	13.03	0.07
0.100	2.540	15.40	0.08
0.125	3.175	17.77	0.09
0.150	3.810	20.14	0.10
0.175	4.445	22.51	0.11
0.200	5.080	24.88	0.13
0.300	7.620	29.62	0.15
0.400	10.160	36.73	0.19
0.500	12.700	47.39	0.24




Esfuerzo a 2,54mm (MPa)	0.08
Esfuerzo a 5,08mm (MPa)	0.13
CBR _{2,54} (%)	1.13
CBR _{5,08} (%)	1.22
CBR con inmersión (%)	1.2

Humedad final	
# recipiente	N/A
Masa recipiente (g)	115.17
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	236.22
Masa recipiente + muestra seca (g)	174.1
Contenido de humedad (%)	105.4



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
Altura (mm)	131.25	130.59	131.27	130.92
Diámetro (mm)	61.58	61.27	61.74	61.6
				Prom (mm)
				131.01
				61.55

Área (mm ²)	2975.16
Volumen (cm ³)	389.77
Masa húmeda muestra (g)	546.52
Densidad húmeda aprox. (g/cm ³)	1.40


Ciclo	Norma	Ensayo														
		Presión de cámara (kPa) S ₃	Esfuerzo cíclico (kPa) S _{cíclico}	Carga máxima real (N) P _{max}	Carga cíclica real (N) P _{cíclico}	Carga de contacto real (N) P _{contacto}	Esfuerzo máximo real (kPa) S _{max r}	Esfuerzo cíclico real (kPa) S _{cíclico r}	Esfuerzo real (kPa) S _{contacto r}	Esfuerzo de contacto real (kPa) S _{contacto r}	Deformación resiliente LVDT1 (mm) H ₁	Deformación resiliente LVDT2 (mm) H ₂	Deformación resiliente prom (mm) H _{promedio}	Deformación resiliente unitaria ε _r	Módulo resiliente (MPa) M _r	
0		41.4	24.8	75	66	7	25.21	22.86	2.35	0.086	0.086	0.086	0.00066	34.8		
1		41.4	12.4	38	35	3	12.77	11.76	1.01	0.053	0.053	0.053	0.00040	29.1		
2		41.4	24.8	57	50	7	19.16	16.81	2.35	0.080	0.080	0.080	0.00061	27.5		
3		41.4	37.3	103	93	10	34.62	31.26	3.36	0.154	0.154	0.154	0.00118	26.6		
4		41.4	49.7	139	125	14	46.72	42.01	4.71	0.243	0.243	0.243	0.00185	22.7		
5		41.4	62	183	165	18	61.51	55.46	6.05	0.332	0.332	0.332	0.00253	21.9		
6		27.6	12.4	31	31	0	10.42	10.42	0.00	0.048	0.048	0.048	0.00037	28.4		
7		27.6	24.8	59	53	6	19.83	17.81	2.02	0.085	0.085	0.085	0.00065	27.5		
8		27.6	37.3	105	95	10	35.29	31.93	3.36	0.157	0.157	0.157	0.00120	26.6		
9		27.6	49.7	145	130	15	48.74	43.70	5.04	0.218	0.218	0.218	0.00166	26.3		
10		27.6	62	202	183	19	67.90	61.51	6.39	0.362	0.362	0.362	0.00276	22.3		
11		13.8	12.4	24	23	1	8.07	7.73	0.34	0.035	0.035	0.035	0.00027	28.9		
12		13.8	24.8	57	50	7	19.16	16.81	2.35	0.078	0.078	0.078	0.00060	28.2		
13		13.8	37.3	98	88	10	32.94	29.58	3.36	0.142	0.142	0.142	0.00108	27.3		
14		13.8	49.7	143	129	14	48.06	43.36	4.71	0.229	0.229	0.229	0.00175	24.8		
15		13.8	62	187	169	18	62.85	56.80	6.05	0.355	0.355	0.355	0.00271	21.0		

Datos de humedad al inicio 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



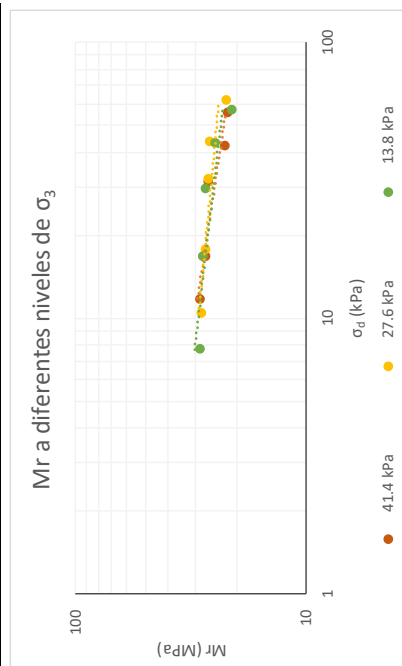
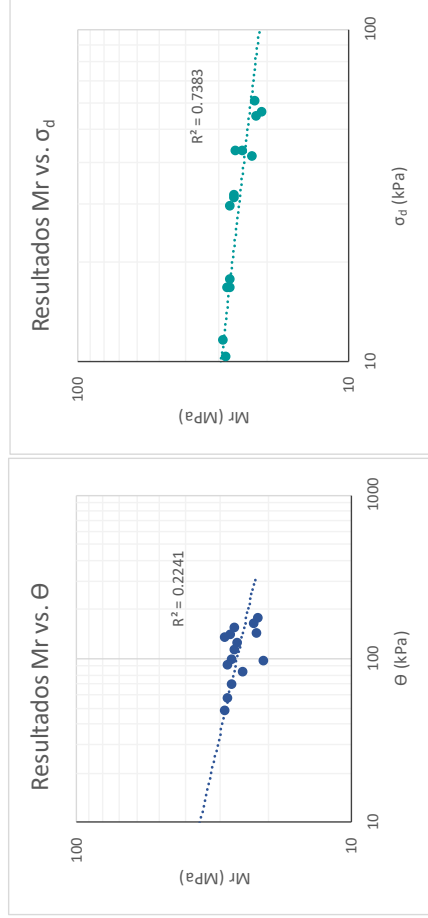
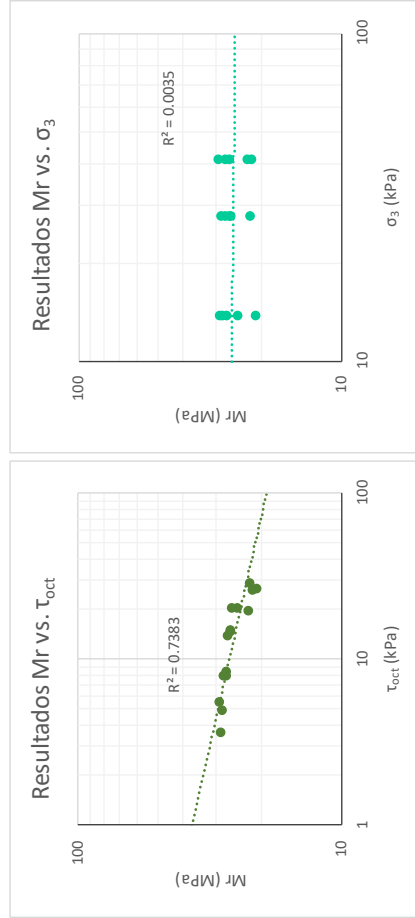
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13




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						
Ciclo	$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \sigma_d$			$\theta = \sigma_d + 3 * \sigma_3$		
	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	τ_{oct} (kPa)	Mr (MPa)
1	11.76	41.40	5.5456	135.964	135.964	29.1
2	16.81	41.40	7.9223	141.006	141.006	27.5
3	31.26	41.40	14.7355	155.459	155.459	26.6
4	42.01	41.40	19.8058	166.215	166.215	22.7
5	55.46	41.40	26.1437	179.659	179.659	21.9
6	10.42	27.60	4.9118	93.220	93.220	28.4
7	17.81	27.60	8.3977	100.614	100.614	27.5
8	31.93	27.60	15.0524	114.731	114.731	26.6
9	43.70	27.60	20.5981	126.495	126.495	26.3
10	61.51	27.60	28.9957	144.309	144.309	22.3
11	7.73	13.80	3.6443	49.131	49.131	28.9
12	16.81	13.80	7.9223	58.206	58.206	28.2
13	29.58	13.80	13.9433	70.978	70.978	27.3
14	43.36	13.80	20.4396	84.759	84.759	24.8
15	56.80	13.80	26.7775	98.204	98.204	21.0





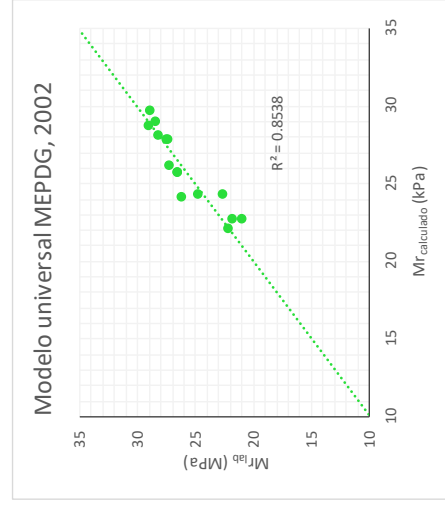
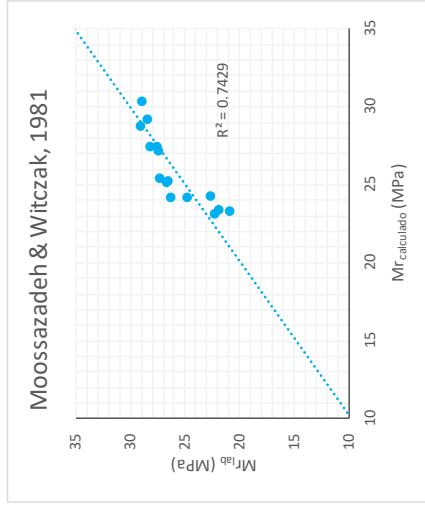
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

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



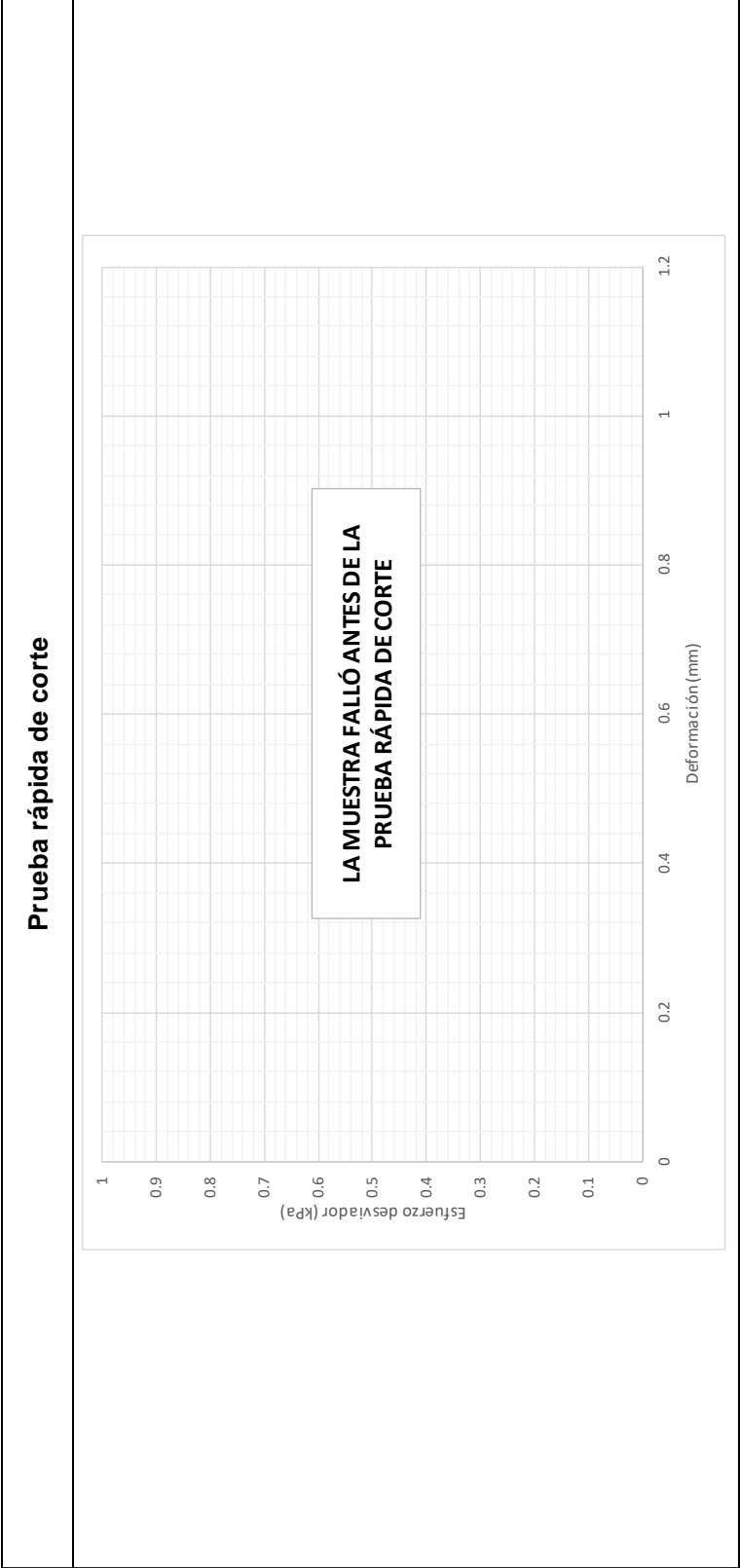
Moosazadeh & Witczak, 1981		Modelo universal MEPDG, 2002						
$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$		$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{T_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$						
k_1	21.624	k_1	0.303					
k_2	-0.132	k_2	-0.010					
P_a (kPa)	102	k_3	-1.323					
		P_a (kPa)	102					
Ciclo	$M_{r_{lab}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)	$M_{r_{lab}}$ (MPa)	$M_{r_{cal}}$ (MPa)	Difer (MPa)	Difer ² (MPa)
1	29.1	28.759	0.3	0.1	29.1	28.699	0.4	0.1
2	27.5	27.437	0.1	0.0	27.5	27.870	-0.3	0.1
3	26.6	25.278	1.3	1.7	26.6	25.712	0.9	0.8
4	22.7	24.310	-1.7	2.8	22.7	24.289	-1.6	2.7
5	21.9	23.435	-1.6	2.4	21.9	22.694	-0.8	0.7
6	28.4	29.224	-0.8	0.6	28.4	29.039	-0.6	0.4
7	27.5	27.226	0.2	0.1	27.5	27.810	-0.4	0.1
8	26.6	25.207	1.4	2.1	26.6	25.702	0.9	0.9
9	26.3	24.185	2.1	4.3	26.3	24.151	2.1	4.4
10	22.3	23.117	-0.9	0.7	22.3	22.093	0.2	0.0
11	28.9	30.399	-1.5	2.1	28.9	29.700	-0.8	0.6
12	28.2	27.437	0.8	0.6	28.2	28.130	0.1	0.0
13	27.3	25.463	1.8	3.3	27.3	26.159	1.1	1.3
14	24.8	24.209	0.6	0.4	24.8	24.294	0.5	0.3
15	21.0	23.361	-2.4	5.8	21.0	22.690	-1.7	3.0
		Σ		27.0		Σ		15.3



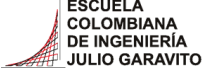

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS
INV - E - 156 - 13



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
Fecha exploración:		Profundidad (m):	0.40 - 0.70



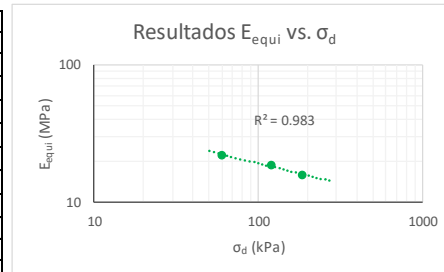
Velocidad de aplicación de la carga (mm/min)	0.131
Máximo esfuerzo (kPa)	0.00
Máxima deformación (mm)	#N/D
Máxima deformación (%)	#N/D

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	---	--

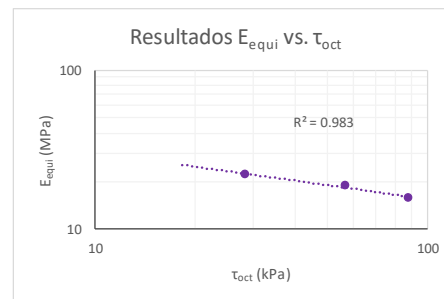
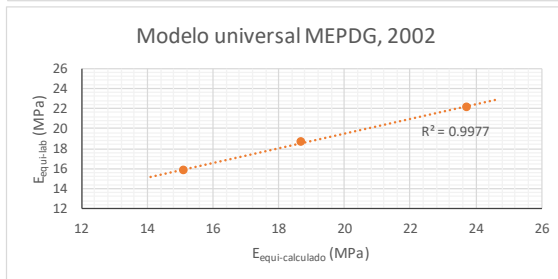
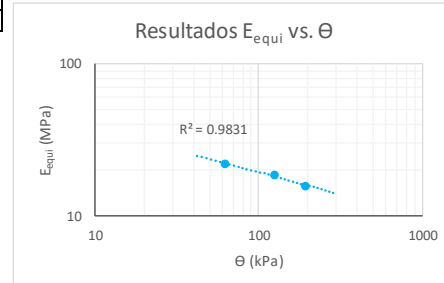
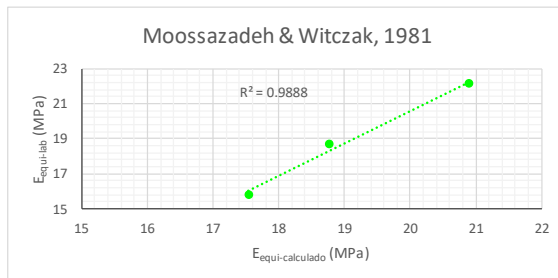
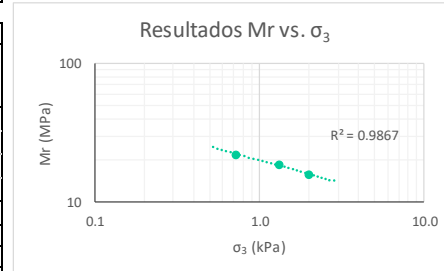
Identificación (Descripción):	Limo de consistencia blanda color café con presencia importante de arena y de algunas pequeñas raíces		
Procedencia (Localización):	Calle 125 con Autopista Norte		
Fecha exploración:	Febrero 13 de 2020	Fecha ensayos:	Febrero 21 a 28 de 2020
		Profundidad (m):	0.40 - 0.70

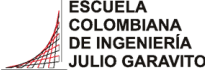

Información inicial del ensayo	
Humedad natural de la muestra (%)	91
Relación de Poisson del suelo (Asumido)	0.45
Diámetro del pistón penetrado (mm)	49.64
Altura del molde (mm)	177.8
Área del pistón penetrado (mm)	1935.32

Ensayo	1	2	3
Penetración objetivo (mm)	0.625	1.266	2.539
Carga máxima pistón (kg) P_{max}	14.218	26.066	39.098
Carga cíclica pistón (kg) P_{cíclico}	11.848	23.696	36.728
Carga de contacto pistón (kg) P_{contacto}	2.370	2.370	2.370
Esfuerzo máximo pistón (kPa) σ₁	0.072	0.132	0.198
Esfuerzo desviador pistón (MPa) σ_d	0.060	0.120	0.186
Esfuerzo confinamiento (MPa) σ₃	0.001	0.001	0.002
Cortante octaédrico (MPa) τ_{oct}	0.028	0.057	0.088
Invariante de esfuerzos (MPa) θ	0.062	0.124	0.192
Deformación elástica (mm) u	0.062	0.145	0.263
Módulo equivalente (MPa) E_{equi}	22.1	18.7	15.8

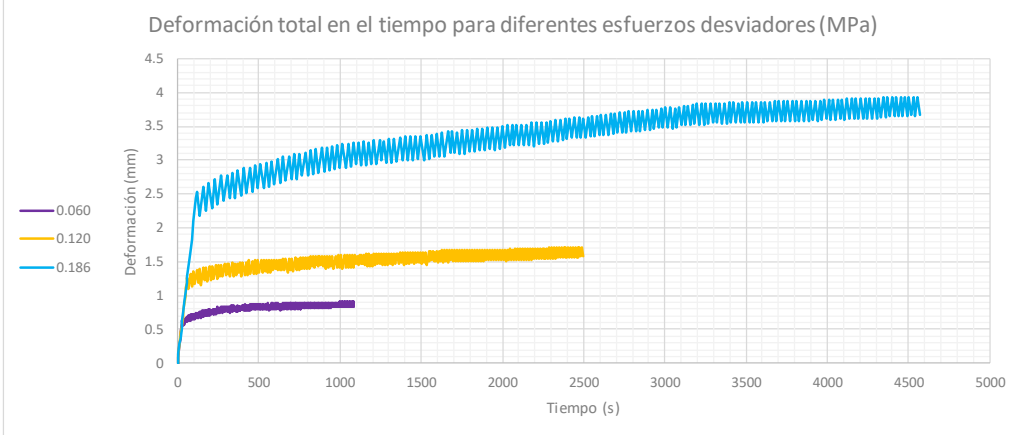


Moosazadeh & Witczak, 1981			Modelo universal MEPDG, 2002		
$E_{equi} = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2}$			$M_r = k_1 * P_a * \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$		
k₁	19.254		k₁	0.306	
k₂	-0.155		k₂	-0.015	
P_a (MPa)	0.102		k₃	-1.155	
			P_a (MPa)	0.102	
E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)	E_{equi}lab (MPa)	E_{equi}cal (MPa)	Difer² (MPa)
22.1	20.90	1.5	22.1	23.70	2.5
18.7	18.77	0.0	18.7	18.69	0.0
15.8	17.54	3.0	15.8	15.09	0.5
	Σ	4.4		Σ	3.0

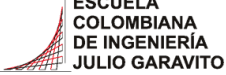



 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
--	--	---

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



Carga Vs Deformación a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)	Deformaciones a diferentes esfuerzos desviadores (MPa)

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ENSAYO DE CBR CÍCLICO (cCBR) Y MÓDULO RESILIENTE (Mr)</p>	 <p>CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</p>
---	--	--

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

	Ciclo	σ_1 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	τ_{oct} (kPa)	θ (kPa)	ϵ_r	Mr o E_{equi} (MPa)
Mr	1	12.77	11.76	41.40	5.55	135.96	0.00040	29.08
	2	19.16	16.81	41.40	7.92	141.01	0.00061	27.52
	3	34.62	31.26	41.40	14.74	155.46	0.00118	26.59
	4	46.72	42.01	41.40	19.81	166.21	0.00185	22.65
	5	61.51	55.46	41.40	26.14	179.66	0.00253	21.88
	6	10.42	10.42	27.60	4.91	93.22	0.00037	28.44
	7	19.83	17.81	27.60	8.40	100.61	0.00065	27.46
	8	35.29	31.93	27.60	15.05	114.73	0.00120	26.64
	9	48.74	43.70	27.60	20.60	126.50	0.00166	26.26
	10	67.90	61.51	27.60	29.00	144.31	0.00276	22.26
	11	8.07	7.73	13.80	3.64	49.13	0.00027	28.94
	12	19.16	16.81	13.80	7.92	58.21	0.00060	28.23
	13	32.94	29.58	13.80	13.94	70.98	0.00108	27.29
	14	48.06	43.36	13.80	20.44	84.76	0.00175	24.81
	15	62.85	56.80	13.80	26.78	98.20	0.00271	20.96
cCBR	16	72.07	60.06	0.72	28.31	62.22	-	22.11
	17	132.13	120.11	1.32	56.62	124.08	-	18.70
	18	198.18	186.17	1.98	87.76	192.12	-	15.81

