

EFFECTO DEL PORCENTAJE DE DIATOMEAS EN LA CURVA COMPRESIBILIDAD DEL SUELO

**ELABORADO POR:
YEISON EDUARDO HERNANDEZ MANRIQUE**

TRABAJO DIRIGIDO

**DIRECTOR:
ING. CATALINA LOZADA LOPEZ**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D.C
2019**

Tabla de contenido

RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	8
3. MARCO TEORICO.....	9
3.1. Comportamiento en las propiedades Índice de un suelo diatomáceo.....	9
3.2. Compresibilidad de suelos arcillosos.....	9
Curva de compresibilidad.....	9
Curva de consolidación Método de Taylor.....	10
Curva de consolidación Método de Casagrande	11
3.3. Ciudades en el mundo con suelos con diatomeas	12
3.4. Efecto de las diatomeas en la compresibilidad del suelo.	12
3.5. Efecto de las diatomeas en la resistencia al corte de los suelos.	13
3.6. Modelación en Centrífuga.....	13
4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
5. OBJETIVO	15
5.1. Objetivo General	15
5.2. Objetivos Específico.....	15
6. METODOLOGIA	16
7. SECUENCIA Y TIPO DE ACTIVIDADES QUE SE DESARROLLARÁN	16
8. Efecto de las Diatomeas en la Compresibilidad.....	18
8.1. Efecto del porcentaje de diatomeas en el valor del Límite Líquido	18
8.2. Gravedad Especifica.....	19
8.3. Curvas de Consolidación	20
8.4. Curvas de compresibilidad	22
9. Efecto de las diatomeas en la estabilidad de un Talud en Centrífuga	25
9.1. Modelos a 200 gravedades	25
Modelo 100C-0D	26
Modelo 75C-25D	27
Modela 50C-50D	28
Modelo 25C-75D	28
9.2. Superficie de Falla.....	29
Modelo 100C-0D	29
Modelo 75C-25D	29
Modelo 50C-50D	30
Modelo 25C-75D	30
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
11. BIBLIOGRAFÍA.....	32
Anexo 1 Caracterización del Material	33
Anexo 2 Limites Atterberg.....	35
Anexo 2.1 75C – 25D	35
Anexo 2.2 50C – 50D	36
Anexo 2.3 100C	37
Anexo 2.4 25C -75D.....	38
Anexo 2.5 100D.....	39
Anexo 2.6 Registro Fotográfico.....	40
Anexo 3 Consolidación	43

Anexo 3.1 Resultados Consolidación 100C.....	43
Anexo 3.2 Resultado Consolidación 75C-25D.....	48
Anexo 3.3 Resultado Consolidación 50C-50D.....	53
Anexo 3.4 Resultado Consolidación 25C-75D.....	58
Anexo 3.5 Registro Fotográfico.....	63
Anexo 4 Gravedad Especifica	69
Anexo 4.1 Calibración.....	69
Anexo 4.2 25C – 75D	71
Anexo 4.3 50C – 50D	71
Anexo 4.4 75C – 25D	72
Anexo 4.5 Registro Fotografico.....	72
Anexo 5 Centrifuga.....	75
Anexo 5.1 Registro Fotográfico.....	75

Figuras

Figura 1 Imágenes en el microscopio electrónico de barrido (MEB) de diatomeas fósiles del área de Chivatá. Fuente: Mineralogía y geoquímica de diatomitas (Boyacá, Colombia), Naranjo-Merchán, W., Gaviria-Melo, S., Manosalva-Sánchez, S. (2007).....	9
Figura 2 Grafica deformación - Raíz del tiempo Método Taylor Fuente: Mecánica de Suelos II.(2016). [Figura]. Método de Casagrande y Taylor Recuperado de https://dokumen.tips/documents/metodo-casagrande-y-taylor.html	11
Figura 3 Grafica deformación- Log(tiempo) Método de Casagrande Fuente: Fuente: Mecánica de Suelos II.(2016). [Figura]. Método de Casagrande y Taylor Recuperado de https://dokumen.tips/documents/metodo-casagrande-y-taylor.html	11
Figura 4 Proceso con el que se llevó a cabo la consolidación	16
Figura 5 Consolidómetros edométricos	20
Figura 6 Centrifuga Geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito	26
Figura 7 Modelo 100C-0D antes y después del vuelo.....	26
Figura 8 Vista en planta de modelo 100C-0D después del vuelo	27
Figura 9 Modelo 75C-25D de Centrifuga antes y después del vuelo	27
Figura 10 Vista en planta de Modelo 75C-25D después del vuelo	27
Figura 11 Modelo 50C-50D de Centrifuga antes y después del vuelo	28
Figura 12 Vista en planta de modelo 50C-50D después del vuelo	28
Figura 13 Modelo 25C-75D de Centrifuga antes y después del vuelo	28
Figura 14 Vista en planta de modelo 25C-75D después del vuelo	29
Figura 15 Modelos 100C-0D antes y después del vuelo	29
Figura 16 Modelo 75C-25D antes y después del vuelo	30
Figura 17 Modelo 50C-50D antes y después del vuelo	30
Figura 18 Modelo 25C-75D antes y después de la falla	30
Figura 19 Empaque donde venia el caolín	33
Figura 20 Imagen de caolín y diatomeas.....	33
Figura 21 Resultado Análisis Diatomeas	34
Figura 22 Resultados Análisis Diatomeas.....	34
Figura 23 Resultados Análisis Diatomeas.....	34
Figura 24 Atomizador, espátula y recipiente de porcelana.....	40
Figura 25 Cazuela de Casagrande antes de los golpes.....	40
Figura 26 Cazuela de Casagrande después de dar los golpes necesarios para cerrar la línea	40

Figura 27 Proceso para realizar los límites plásticos	41
Figura 28 Rollitos	41
Figura 29 Muestras luego de secar al horno y pesar en balanza	42
Figura 30 Modelo 100C inicial de consolidación para 100C.....	43
Figura 31 Modelo 100C luego de recibir 7 kg de carga	43
Figura 32 Modelo inicial de consolidación para 75C-25D.....	48
Figura 33 Modelo luego de recibir 7 kg de carga.....	48
Figura 34 Modelo inicial de consolidación para 50C-50D	53
Figura 35 Modelo luego de recibir 7 kg de carga . 50C-50D.....	53
Figura 36 Modelo inicial de consolidación para 25C-75D.....	58
Figura 37 Modelo luego de recibir 7 kg de carga.....	58
Figura 38 Cajas de consolidación con el papel filtro y arena	63
Figura 39 Arena y papel filtro encima del tubo	63
Figura 40 Mezcladora.....	64
Figura 41 forma de echar el material en la mezcladora.....	64
Figura 42 A la izquierda mezcla en proceso al lado derecho mezcla lista.....	65
Figura 43 Mezcla lista vertida en las cajas de los Consolidómetros	65
Figura 44 caja de consolidación con 250 g de carga	66
Figura 45 Cajas de consolidación con 500g de carga	66
Figura 46 caja de consolidación con 1 kg de carga	67
Figura 47 Cajas con 5 kg de carga	67
Figura 48 Cajas de consolidación con 7.5 kg de carga	68
Figura 49 Consolidómetros Funcionando	68
Figura 50 Datos de Calibración para picnómetro 20	69
Figura 51 Datos de Calibración de picnómetro 4	70
Figura 52 Picnómetro con embudo para echar el agua y el suelo.....	72
Figura 53 Picnómetro con el material listo para bombear y sacar el aire.....	73
Figura 54 Sacando las partículas de aire de la muestra	73
Figura 55 Picnómetro, atomizador y embudo.....	74
Figura 56 Muestra después de que sale del horno.....	74
Figura 57 Centrifuga de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito	75
Figura 58 Marcando las Líneas en el modelo	75
Figura 59 Modelo dentro de la cámara de la centrifuga de la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito.....	76

Tablas

Tabla 1 Propiedades Índice de una mezcla de suelo con diatomeas Diaz-Rodríguez (2011). <i>Diatomaceous soils: monotonic behavior</i>	9
Tabla 2 Leyes de modelación de centrifuga geotécnica. Fuente: Caicedo, B. [Tabla]. Modelación Física en centrifuga. Recuperado de https://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer_ent/modelacion_fisica_centrifuga_problemas.pdf	14
Tabla 3 Abreviaturas para cada uno de los ensayos	16
Tabla 4 Cronograma.....	17
Tabla 5 Resultados de Límites de Atterberg.....	18
Tabla 6 Resumen de Resultados de Gravedad Específica	19
Tabla 7 Resumen de los coeficientes de consolidación para cada uno de los casos	21

Tabla 8 Resumen de curva compresibilidad para 100C	23
Tabla 9 Resumen curva de compresibilidad para 75C-25D.....	23
Tabla 10 Resumen compresibilidad 50C-50D.....	23
Tabla 11 Resumen compresibilidad para 25C-75D	24
Tabla 12 Resumen compresibilidad de todos los ensayos	24
Tabla 13 Resultados de Índice de Compresibilidad	25
Tabla 14 Datos tomados en laboratorio para hallar limite liquido de 75C-25D.....	35
Tabla 15 Datos tomados en laboratorio para hallar limite plástico de 75C-25D	35
Tabla 16 Resultados de los limites e índice de plasticidad para 75C-25D.....	35
Tabla 17 Datos tomados en laboratorio para hallar limite liquido de 50C-50D.....	36
Tabla 18 Datos tomados en laboratorio para hallar limite plástico de 50C-50D	36
Tabla 19 Resultados de los limites e índice de plasticidad para 50C-50D.....	36
Tabla 20 Datos tomados en laboratorio para hallar limite liquido de 100C	37
Tabla 21 Datos tomados en laboratorio para hallar limite plástico de 100C	37
Tabla 22 Resultados de los limites e índice de plasticidad para 100C	37
Tabla 23 Datos tomados en laboratorio para hallar limite liquido de 25C-75D.....	38
Tabla 24 Datos tomados en laboratorio para hallar limite plástico de 25C-75D	38
Tabla 25 Resultados de los limites e índice de plasticidad para 25C-75D.....	38
Tabla 26 Datos tomados en laboratorio para hallar limite liquido de 100D	39
Tabla 27 Datos tomados en laboratorio para hallar limite plástico de 100D.....	39
Tabla 28 Resultados de los limites e índice de plasticidad para 100D.....	39
Tabla 29 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 100C carga 10kg	44
Tabla 30 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 100C carga 10kg.....	44
Tabla 31 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 100C carga 20kg.....	45
Tabla 32 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 100C carga 20kg	45
Tabla 33 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 100C carga 40 kg.....	46
Tabla 34 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 100C carga 40 kg	46
Tabla 35 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 100C carga 80kg.....	47
Tabla 36 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 100C carga 80kg	47
Tabla 37 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 75C-25D carga 10kg	49
Tabla 38 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 75C-25D carga 10kg.....	49
Tabla 39 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 75C-25D carga 20kg	50
Tabla 40 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 75C-25D carga 20kg.....	50
Tabla 41 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 75C-25D carga 40kg	51
Tabla 42 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 75C-25D carga 40kg.....	51
Tabla 43 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 75C-25D carga 80kg	52
Tabla 44 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 75C-25D carga 80kg.....	52
Tabla 45 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación.50C-50D carga 10kg.....	54
Tabla 46 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 50C-50D carga 10kg	54
Tabla 47 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 50C-50D carga 20kg.....	55
Tabla 48 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 50C-50D carga 20kg	55
Tabla 49 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 50C-50D carga 40kg.....	56
Tabla 50 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 50C-50D carga 40kg	56
Tabla 51 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 50C-50D carga 80kg.....	57
Tabla 52 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 50C-50D carga 80kg	57
Tabla 53 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 25C-75D carga 10kg.....	59
Tabla 54 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 25C-75D carga 10kg	59
Tabla 55 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 25C-75D carga 20kg.....	60

Tabla 56 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 25C-75D carga 20kg	60
Tabla 57 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 25C-75D carga 40kg.....	61
Tabla 58 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 25C-75D carga 40kg	61
Tabla 59 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 25C-75D carga 80kg.....	62
Tabla 60 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 25C-75D carga 80kg	62
Tabla 61 Datos y cálculo de la gravedad específica para 25C-75D	71
Tabla 62 Datos y cálculo de la gravedad específica para 50C-50D	71
Tabla 63 Datos y cálculo de la gravedad específica para 75C-25D	72

Graficas

Grafica 1 Resultados de 82 ensayos edométricos de suelos de la ciudad de Bogotá (Caicedo, B., Mendoza, C., López, F., y Lizcano, A. (2018).....	10
Grafica 2 Curvas de Compresibilidad Típicas del suelo de la ciudad de México (Diaz Rodríguez , 2006)	12
Grafica 3 a) Curvas de Tensión - Deformación b) Trayectorias de Tensiones Diaz-Rodríguez y López – Molina. Cyclic behavior of diatomaceous soils[Articulo]	13
Grafica 4 Limite Liquido vs Porcentaje de Diatomeas.....	18
Grafica 5 Gravedad Específica vs porcentaje de Diatomeas	19
Grafica 6 Coeficientes de consolidación versus carga	21
Grafica 7 Grafica de las Curvas de Compresibilidad de todos los ensayos	25
Grafica 8 Contenido de humedad versus número de golpes.....	35
Grafica 9 Contenido de humedad versus número de golpes.....	36
Grafica 10 Contenido de humedad versus número de golpes	37
Grafica 11 Contenido de humedad versus número de golpes	38
Grafica 12 Contenido de humedad versus número de golpes	39
Grafica 13 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 100C carga 10kg.	44
Grafica 14 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 100C carga 20 kg.	45
Grafica 15 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 100C carga 40 kg	46
Grafica 16 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 100C carga 80kg	47
Grafica 17 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 75C-25D carga 10kg	49
Grafica 18 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 75C-25D carga 20kg	50
Grafica 19 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 75C-25D carga 40kg	51
Grafica 20 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 75C-25D carga 80kg	52
Grafica 21 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 50C-50D carga 10kg	54
Grafica 22 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 50C-50D carga 20kg	55
Grafica 23 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 50C-50D carga 40kg	56
Grafica 24 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 50C-50D carga 80kg	57
Grafica 25 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 25C-75D carga 10kg	59
Grafica 26 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 25C-75D carga 20kg	60
Grafica 27 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 25C-75D carga 40kg	61
Grafica 28 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 25C-75D carga 80kg	62

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de la consolidación de un suelo diatomáceo con diferentes porcentajes de diatomeas. El objetivo fue encontrar diferencias considerables en cuatro suelos reconstituidos con 0, 25, 50, y 75% de diatomeas, a través de ensayos como, límites de Atterberg, gravedad específica y consolidación usando los Consolidómetros edométricos automatizados de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Además de estos ensayos se realizaron cuatro vuelos en la centrífuga a 200 gravedades a un talud de 45 grados modelado en las cajas de consolidación de los cuatro suelos. Los resultados mostraron que en los límites líquido y en la gravedad específica hubo variaciones a medida que aumentaba el porcentaje de diatomeas, por otro lado, con respecto a las características de compresibilidad del suelo, el índice de compresibilidad no tuvo cambios considerables y los vuelos en la centrífuga no mostraron un plano de falla definido.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, el estudio de la composición del suelo ha sido importante para entender las variaciones en el comportamiento de la mecánica de suelos clásica. Uno de los componentes de algunos suelos en el mundo que modifican considerablemente las propiedades del mismo son las diatomeas. Las diatomeas son un material que se encuentra en depósitos lacustres que son realmente microalgas fosilizadas que se depositaron en los suelos de origen lacustre o marino. Estos suelos se han venido estudiando en los últimos años en diferentes partes del mundo como en México, Japón, Estados Unidos (Díaz, Rodríguez, 2011), España y en Bogotá Colombia.

A pesar de que la literatura relacionada con este tipo de suelos es muy escasa, los resultados que se encuentran con relación a las propiedades físicas y mecánicas han mostrado que cambian considerablemente cuando los suelos contienen diatomeas. Investigaciones indican que mayores valores de límites de Atterberg están relacionados con la cantidad de diatomeas en el suelo, generando una menor densidad y una mayor resistencia (Caicedo, Mendoza, López y Lizcano, 2018).

La gran oportunidad de emprender investigaciones al tener la literatura escasa sobre suelos diatomáceos aplicados en la ingeniería es un factor importante al encontrar ciudades en Colombia y en el mundo donde se encuentran este tipo de suelos. Ya que si se logra tener la suficiente información se podría tratar de forma diferente este suelo.

En este trabajo se llevaron a cabo ensayos con suelos reconstituidos con diferentes porcentajes de diatomeas con los cuales se analizaron las propiedades índice y principalmente se estudiaron los cambios en la curva de compresibilidad.

Adicionalmente, se aprovechó la consolidación para realizar los vuelos en la centrífuga a 200 G de un talud a 45 grados que falla por peso propio y estudiar el tipo de falla que se presentó.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Las diatomeas son organismos eucariontes, unicelulares cuyo tamaño puede variar entre más o menos 10 y 200 μm (0.01 a 0.2 mm). Dado que son organismos acuáticos y fotosintéticos, son generalmente consideradas como algos. La característica principal que distingue a las diatomeas es que sus células tienen una cubierta silíceo resistente a la degradación que se llama frústulo (Caballero, s.f).

La ciudad de Bogotá se ha caracterizado por ser un suelo lacustre con presencia de microfósiles (Diatomeas) como lo evidencian estudios como (Díaz-Quirós y Rivera-Rondón, 2004). Además, hay otros países en el mundo donde se han detectado la presencia de estos microfósiles en suelos lacustres como en México, Ecuador y Japón, como lo muestran investigaciones de la Universidad Nacional autónoma de México UNAM (Díaz-Rodríguez, 2006) (Canizal-Silahua, 2006).

Los suelos diatomáceos se han investigado como indicadores muy precisos de las condiciones ambientales y por eso es de gran interés la investigación de estos suelos como lo muestra el artículo (Uriza y Sanjurjo, 2008). Además, se ha demostrado que no solo sirven como indicadores ambientales si no que las diatomeas también son ejemplo sobresaliente de materiales naturales de tamaño diminuto con una estructura capaz de afectar las propiedades hidráulicas, mecánicas y físico químicas de los suelos como se evidencia en el artículo (Díaz-Rodríguez, 2011).

En la ciudad de Bogotá se han realizado estudios en donde se evidencia el cambio del comportamiento del suelo debido al efecto de las diatomeas donde “el límite líquido y el Angulo de fricción aumenta a mayor contenido de diatomeas en el suelo, estos resultados están en desacuerdo con la literatura clásica de la mecánica de suelos que sugiere que a más bajos ángulos de fricción los suelos tienen altos niveles de plasticidad”. “Además el suelo de Bogotá presenta alta compresibilidad y alta relación de vacíos los cuales están relacionados con los límites líquidos” (Caicedo, Mendoza, López y Lizcano, 2018).

Las diatomeas han sido investigadas con suelos reconstituidos en el laboratorio y se ha encontrado que el caolín con adición de diatomeas aumenta la resistencia del terreno a medida que el porcentaje de diatomeas aumenta (Díaz Rodríguez, 2014).

Es de interés de este trabajo estudiar el efecto del porcentaje de diatomeas en suelos reconstituidos en la compresibilidad.

3. MARCO TEORICO

3.1. Comportamiento en las propiedades Índice de un suelo diatomáceo

Las imágenes de la estructura de las diatomeas se pueden obtener únicamente usando técnicas avanzadas de microscopía, específicamente, microscopía de barrido electrónico. En la Figura 1 se muestra una imagen de diatomeas del área de Chivatá en Boyacá (Naranjo et al., 2001)

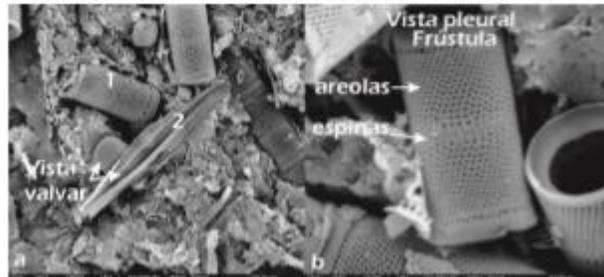


Figura 1 Imágenes en el microscopio electrónico de barrido (MEB) de diatomeas fósiles del área de Chivatá. Fuente: Mineralogía y geoquímica de diatomitas (Boyacá, Colombia), Naranjo-Merchán, W., Gaviria-Melo, S., Manosalva-Sánchez, S. (2007)

Algunos de los comportamientos de las propiedades índice encontrados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1 Propiedades Índice de una mezcla de suelo con diatomeas Diaz-Rodríguez (2011).
Diatomaceous soils: monotonic behavior

Mixture	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	γ_d (kN/m ³)	Activity
D+K					
100K	56.4	28.9	27.5	11.06	0.42
20D+80K	58.9	33.7	25.2	10.98	0.48
40D+60K	68.6	46.8	21.8	10.43	0.53
60D+40K	75.5	56.7	18.8	9.48	0.65

En la anterior tabla se puede ver que el límite líquido (w_L) aumenta a medida que el porcentaje de diatomeas aumenta en el suelo con diatomeas y caolín (D + K). Además, la Actividad que es la relación entre el índice de plasticidad (I_p) y el tamaño de partícula de la arcilla, igual que el límite líquido aumenta a medida que aumenta el porcentaje de diatomeas en el suelo (Diaz Rodríguez, 2011).

3.2. Compresibilidad de suelos arcillosos

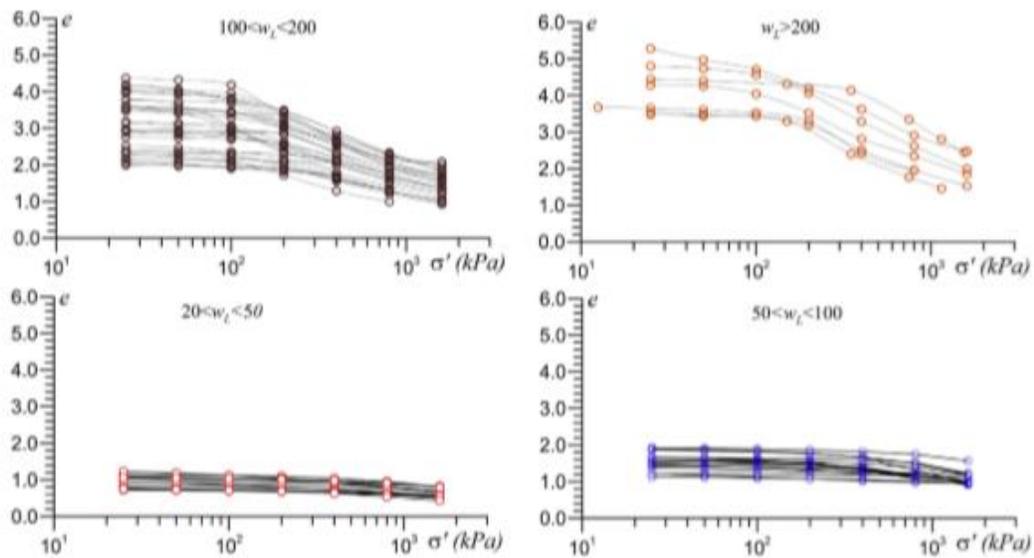
Curva de compresibilidad

La curva de compresibilidad o curva esfuerzo relación de vacíos se obtiene a través de un ensayo de consolidación. Esta curva se obtiene graficando los resultados del ensayo de consolidación, en el eje x el esfuerzo efectivo vertical de forma logarítmica y en el eje y el valor de la relación de vacíos para cada escalón de carga, permitiendo diferenciar las partes de la curva como el esfuerzo de preconsolidación y el índice de compresibilidad.

En la rama normalmente consolidada la pendiente se denomina índice de compresión (C_c) la cual está representado por:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log(\sigma')}$$

En algunos de los estudios relacionados con los suelos diatomáceos de Bogotá se encontraron algunas curvas de estos suelos para diferentes valores de límite líquido. En las siguientes imágenes se presentan las curvas de compresibilidad en donde se observa que a mayor límite líquido el valor de C_c tiende a aumentar (Caicedo, B., Mendoza, C., López, F., y Lizcano, A. 2018)



Grafica 1 Resultados de 82 ensayos edométricos de suelos de la ciudad de Bogotá (Caicedo, B., Mendoza, C., López, F., y Lizcano, A. (2018))

Curva de consolidación Método de Taylor

Para determinar experimentalmente el tiempo necesario para consolidar una muestra en el laboratorio, Taylor propuso un método para determinar una consolidación aproximada para un grado de consolidación promedio U_{AV} del 90%. El método consta de los siguientes pasos:

- I. Se dibuja una línea recta desde la parte más recta de la curva (línea # 1)
- II. Se dibuja la línea # 4 que es 1.15 veces la línea número # 1.
- III. La intersección entre la línea # 4 y la curva de consolidación es el punto para una consolidación del 90%.
- IV. De ese punto se baja perpendicular al eje x y se halla el t_{90}

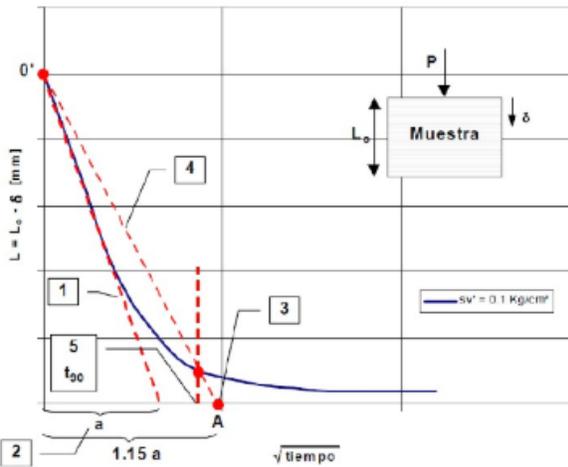


Figura 2 Gráfica deformación - Raíz del tiempo Método Taylor Fuente: Mecánica de Suelos II.(2016). [Figura]. Método de Casagrande y Taylor Recuperado de <https://dokumen.tips/documents/metodo-casagrande-y-taylor.html>.

Curva de consolidación Método de Casagrande

Otro método establecido para determinar el grado de consolidación en el laboratorio es el método de Casagrande. Este es un método aproximado para determinar la consolidación de un suelo. En la siguiente grafica se muestra el procedimiento resumido:

La ordenada del punto E es d_{100} y es la deformación de una consolidación del 100%.

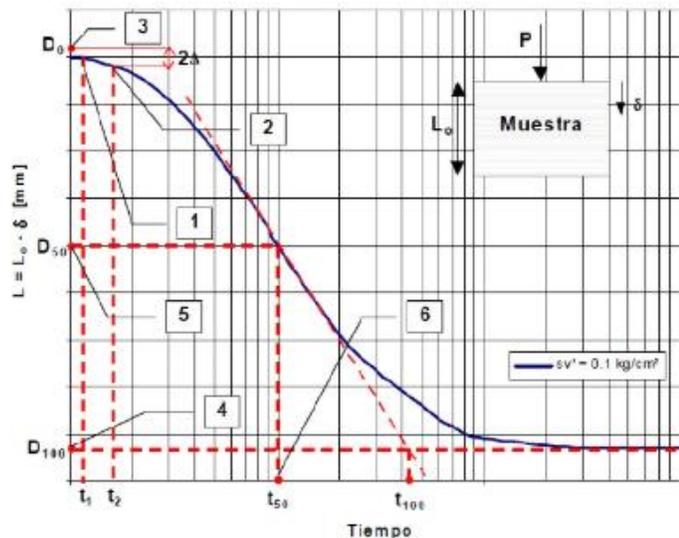


Figura 3 Gráfica deformación- Log(tiempo) Método de Casagrande Fuente: Fuente: Mecánica de Suelos II.(2016). [Figura]. Método de Casagrande y Taylor Recuperado de <https://dokumen.tips/documents/metodo-casagrande-y-taylor.html>

3.3. Ciudades en el mundo con suelos con diatomeas

Colombia

A pesar de que los estudios de los suelos diatomáceos son escasos y difíciles de encontrar en Colombia se tiene conocimiento de la existencia de este material en los departamentos de Putumayo, Nariño, Valle del Cauca, Caldas, Tolima y Boyacá. En Boyacá se han ubicado manifestaciones en: Tunja, La Uvita, Chinavita y Oicatá. (Merchán, W. N., Melo, S. G., & Sánchez, S. M., 2007).

México

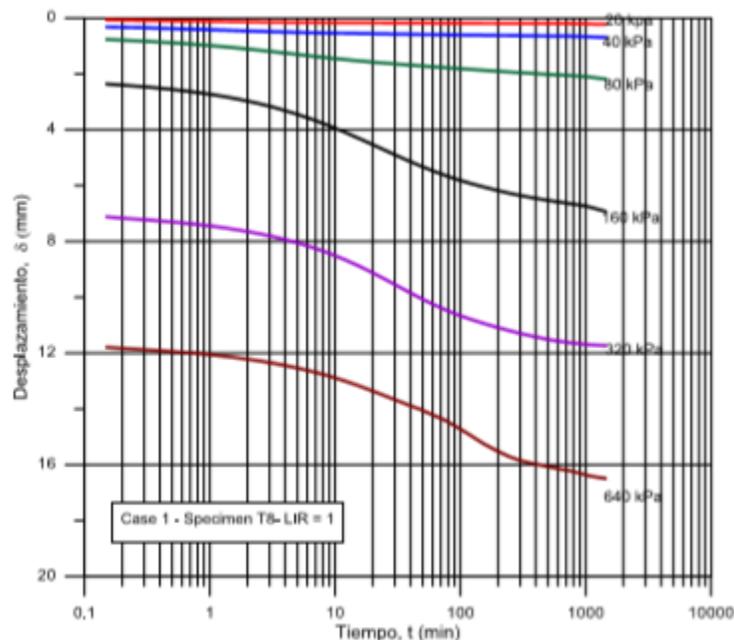
México se encuentra situada en la cuenca de México que ocupa 9600 km cuadrados , donde predomina una planicie lacustre localizada a 2250 metros sobre el nivel del mar. Los suelos de la ciudad de México son suelos volcánico-lacustres heterogéneos con una gran variedad de microfósiles. Donde su presencia influye bastante en el comportamiento de ingeniería de la ciudad(Diaz-Rodriguez,2006).

España

En Valencia – España se encontraron varios tipos de diatomeas en el mar de Oliva-Pego a pesar de que los estudios realizados fueron más para labores agropecuarias y no ingenieriles (Cantoral - Uriza y Aboal-Santurjo,2008).

3.4. Efecto de las diatomeas en la compresibilidad del suelo.

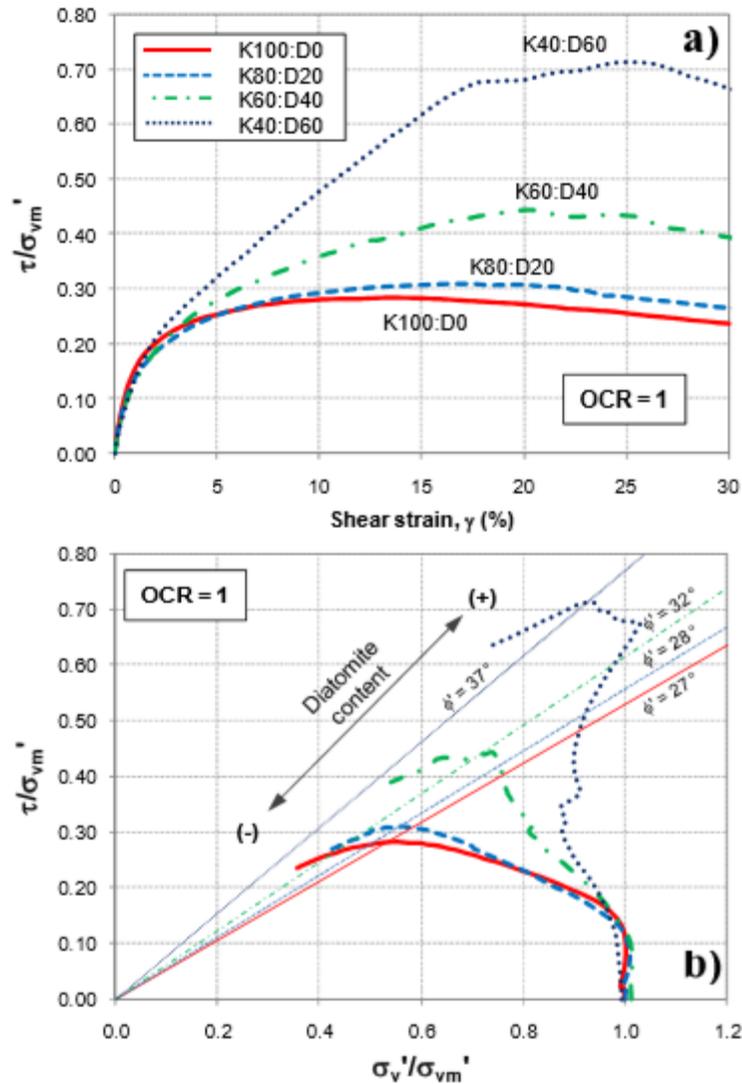
La siguiente grafica muestra las curvas típicas de compresibilidad de un suelo diatomáceo (desplazamiento (mm) versus tiempo (minutos)) en donde se pueden ver distintos comportamientos a medida que incrementa el esfuerzo. En las primeras curvas se puede ver que son casi rectas(entre 20 y 80 kPa) y luego empiezan a dar forma de S(entre 100 y 640 kPa).



Gráfica 2 Curvas de Compresibilidad Típicas del suelo de la ciudad de México (Diaz Rodríguez , 2006)

3.5. Efecto de las diatomeas en la resistencia al corte de los suelos.

Algunos resultados que muestra el comportamiento de las diatomeas en un ensayo de corte simple se presentan a continuación:



Grafica 3 a) Curvas de Tensión - Deformación b) Trayectorias de Tensiones Diaz-Rodríguez y López – Molina. Cyclic behavior of diatomaceous soils [Artículo]

Las anteriores graficas muestran que a porcentajes de diatomeas mayores al 20 por ciento en un suelo aumenta su resistencia. Contrario a la resistencia, la presión de poros disminuye con el aumento del contenido de diatomeas y mayor contenido de diatomeas el ángulo de fricción aumenta (Diaz-Rodríguez, López-Molina, 2009).

3.6. Modelación en Centrífuga

La modelación en centrifuga geotécnica es una manera de predecir el comportamiento que sufrirá un prototipo mediante la simulación de un modelo a escala reducida con propiedades físicas y mecánicas muy similares a las naturales.

Es importante tener presente las leyes de escala al realizar un modelo ya que estas establecen una similitud entre el estado de esfuerzos del modelo y el estado de esfuerzos del prototipo para poder realizar un análisis adecuado del modelo.

A continuación, se presentan algunas de las leyes de modelación en centrífuga geotécnica:

Tabla 2 Leyes de modelación de centrífuga geotécnica. Fuente: Caicedo, B. [Tabla]. Modelación Física en centrífuga. Recuperado de https://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer_ent/modelacion_fisica_centrifuga_problemas.pdf

	<u>Dimensión del modelo</u> Dimensión del prototipo
Densidad	1
Longitud	1/N
Desplazamiento	1/N
Deformación	1
Esfuerzo	1
Velocidad	1
Aceleración	N
Tiempo	1/N (problema dinámico)
Tiempo	1/N ² (problema de difusión)

4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo el porcentaje de diatomeas en un suelo afecta la curva de compresibilidad de un suelo arcilloso?

Hoy en día se hace necesario que en la ingeniería Civil se determinen las características del suelo a través de ensayos de laboratorio para conocer sus propiedades mecánicas y analizar qué tan conveniente es su uso para la construcción de diferentes obras geotécnicas.

Al ser Bogotá una zona lacustre con contenido de diatomeas, es de interés el estudio del comportamiento mecánico de este suelo, del cual no se tiene un gran conocimiento. Es por esto que en el presente trabajo se realizarán los ensayos de suelos reconstituidos con diferentes porcentajes de diatomeas con el fin de determinar el efecto en la curva de compresibilidad del suelo. Los resultados de estos ensayos darán información acerca de la influencia de las diatomeas en la compresibilidad de un suelo arcilloso.

5. OBJETIVO

5.1. Objetivo General

Determinar el efecto del porcentaje de diatomeas en la compresibilidad de un suelo arcilloso reconstituido.

5.2. Objetivos Específico

- Determinar el efecto del porcentaje de diatomeas en la plasticidad de un suelo reconstituido.
- Determinar el efecto del porcentaje de diatomeas en la compresibilidad de un suelo reconstituido.
- Determinar por medio de un análisis de imagen la influencia de las diatomeas en la estabilidad de un talud modelado en centrífuga geotécnica.

6. METODOLOGIA

Para lograr cumplir con los objetivos propuestos, se fabricó un suelo reconstituido con una mezcla de caolín y diatomeas en porcentajes de masa seca según se muestra en la siguiente tabla, a los cuales se les realizaron ensayos de límite líquido y de límite plástico.

Posteriormente, partiendo de una humedad correspondiente a 1.5 veces el límite líquido se realizó la curva de compresibilidad (en la carga). Para la elaboración de la curva de compresibilidad del suelo, se consolidó el suelo en los Consolidómetros automatizados utilizando el método de Taylor. El proceso de reconstitución de las muestras se muestra en la Figura 4.

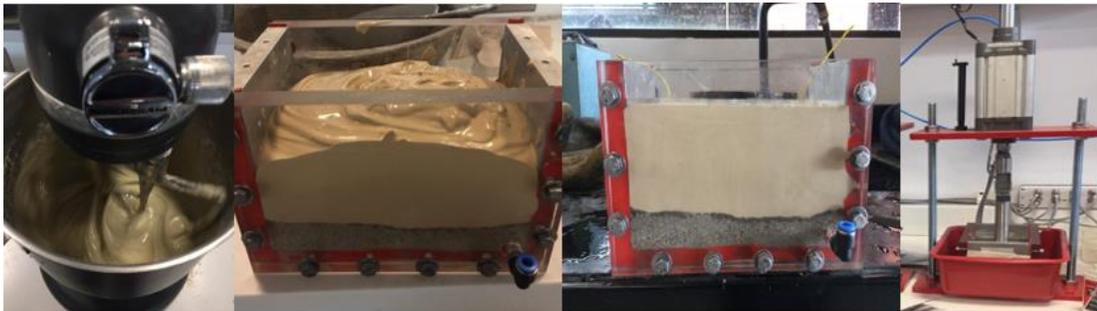


Figura 4 Proceso con el que se llevó a cabo la consolidación

Tabla 3 Abreviaturas para cada uno de los ensayos

Caolín (%)	Diatomeas (%)	Límite líquido	Límite plástico	Compresibilidad
100	0	LL 100-0	LP 100-0	C 100-0
75	25	LL 75-25	LP 75-25	C 75-25
50	50	LL 50-50	LP 50-50	C 50-50
25	75	LL 25-75	LP 25-75	C 25-75
0	100	LL 0-100	LP 0-100	C 0-100

Posteriormente, se realizó la modelación de un talud con una pendiente de 45° en la centrífuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito con el fin de determinar a través de un análisis de imagen el efecto del porcentaje de diatomeas en la estabilidad del talud.

7. SECUENCIA Y TIPO DE ACTIVIDADES QUE SE DESARROLLARÁN

1. Organizar los materiales y los equipos necesarios para realizar las mezclas.
2. Realizar los ensayos de límite líquido y límite plástico para 5 combinaciones de caolín y diatomeas.
3. Realizar los ensayos de compresibilidad para cada una de las mezclas de caolín y diatomeas.

4. Realizar ensayos en centrifuga geotécnica de estabilidad de un talud sobre las muestras de suelo con diferentes porcentajes de diatomeas.
5. Realizar el informe final y un artículo de investigación.

Cronograma:

Tabla 4 Cronograma

Actividad/semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Organización de materiales																
Límites líquidos y plásticos																
Curvas de compresibilidad y modelos en centrifuga																
Informe final y artículo																

Instalaciones y equipos:

Laboratorio de suelos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

- Cazuela de Casagrande para límite líquido
- Hornos
- Basculas
- Mezcladora
- Cajas para consolidación
- Consolidómetros edométricos.
- Centrifuga geotécnica
- Picnómetros para la determinación de la gravedad específica
- Taladro
- Bomba de vacío
- Termómetro

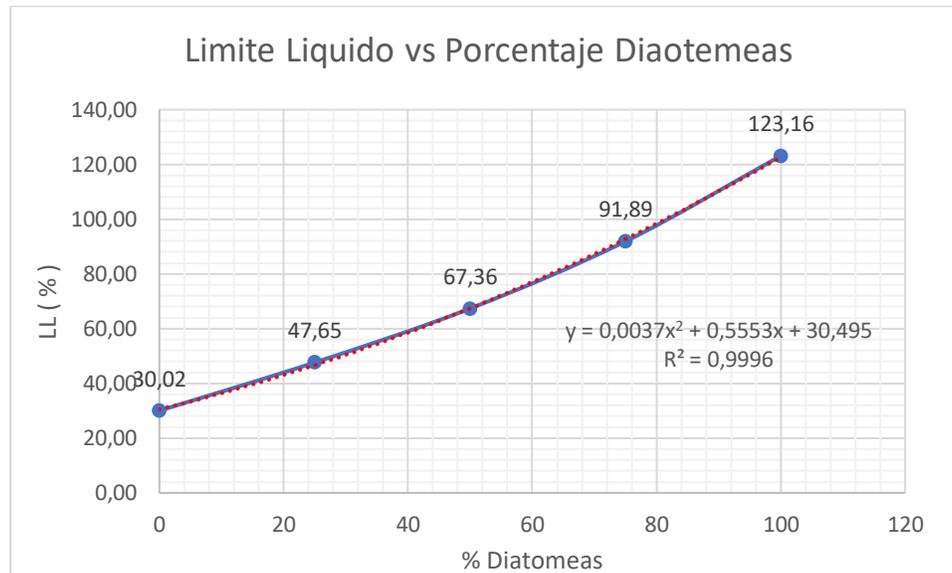
8. Efecto de las Diatomeas en la Compresibilidad

8.1. Efecto del porcentaje de diatomeas en el valor del Límite Líquido

Teniendo en cuenta la norma INVE 125 para la determinación del límite líquido de los suelos y la norma INVE 126 para límite Plástico e índice de plasticidad de los suelos se presentan las siguientes tablas de resultados para cada tipo de mezcla de suelo.

Tabla 5 Resultados de Límites de Atterberg

	% Diatomeas	LL	LP	IP
LL-LP 100C 0D	0	30,02	9,72	20,30
LL-LP 75C 25D	25	47,65	12,54	35,11
LL-LP 50C 50D	50	67,36	19,32	48,04
LL-LP 25C 75D	75	91,89	30,14	61,74
LL-LP 0C 100D	100	123,16	32,24	90,92



Gráfica 4 Límite Líquido vs Porcentaje de Diatomeas

Se puede observar de la gráfica anterior que a medida que se aumenta el porcentaje de diatomeas en el suelo el límite líquido también aumenta. La ecuación que permite ajustar los resultados es una ecuación de segundo grado con un coeficiente de correlación $R=0,9996$.

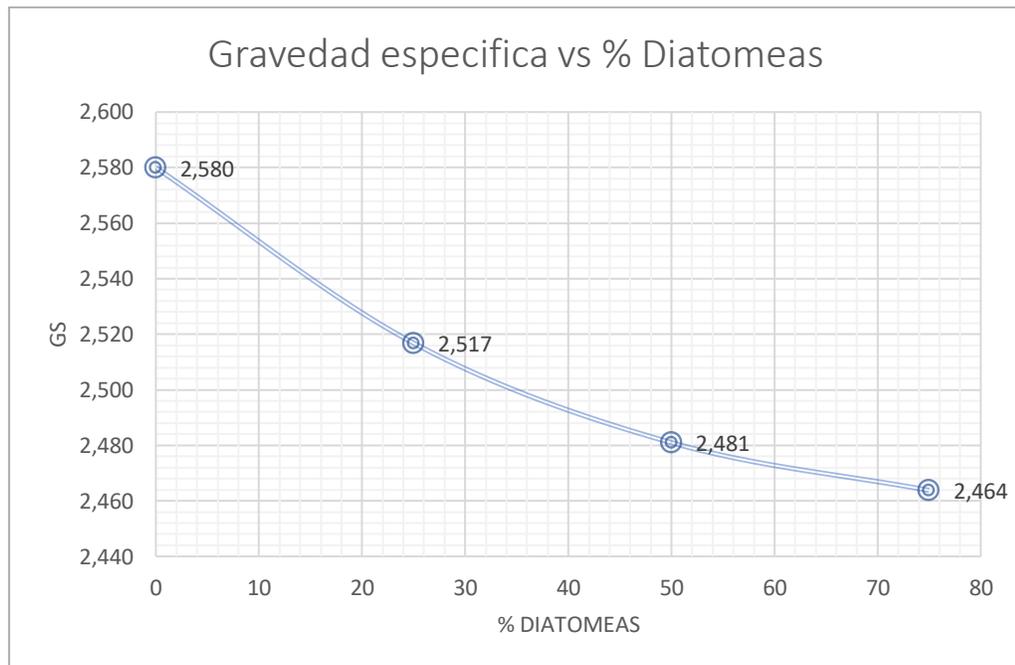
Nota: Para más detalle en los resultados de laboratorio ir al Anexo 2

8.2. Gravedad Especifica

A continuación, se presentan los resultados de la gravedad específica. En el anexo 4 se presenta los datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla 6 Resumen de Resultados de Gravedad Especifica

% Diatomeas	Gs
75	2,464
50	2,481
25	2,517
0	2,580



Grafica 5 Gravedad Específica vs porcentaje de Diatomeas

De la gráfica anterior se puede observar que a medida que porcentaje de diatomeas aumenta, la gravedad específica disminuye es decir que la densidad del suelo disminuye a medida que el contenido de diatomeas aumenta, esto se explica por la alta porosidad de la estructura de las diatomeas.

8.3. Curvas de Consolidación

A continuación, se presentan los resultados de la consolidación calculados con los datos suministrados por el programa de los consolidómetros edométricos y usando el método de Taylor. Los Consolidómetros permitieron adquirir 1 dato cada minuto con el fin de tener suficiente información para analizar los resultados. El ensayo de consolidación tuvo una duración de cuatro días en los consolidómetros y 7 días preconsolidando hasta 7,5 Kg.

En las siguientes tablas se presentan los resultados de interés y en el anexo 3 se encuentran más información de este.



Figura 5 Consolidómetros edométricos

Coefficiente de Consolidación

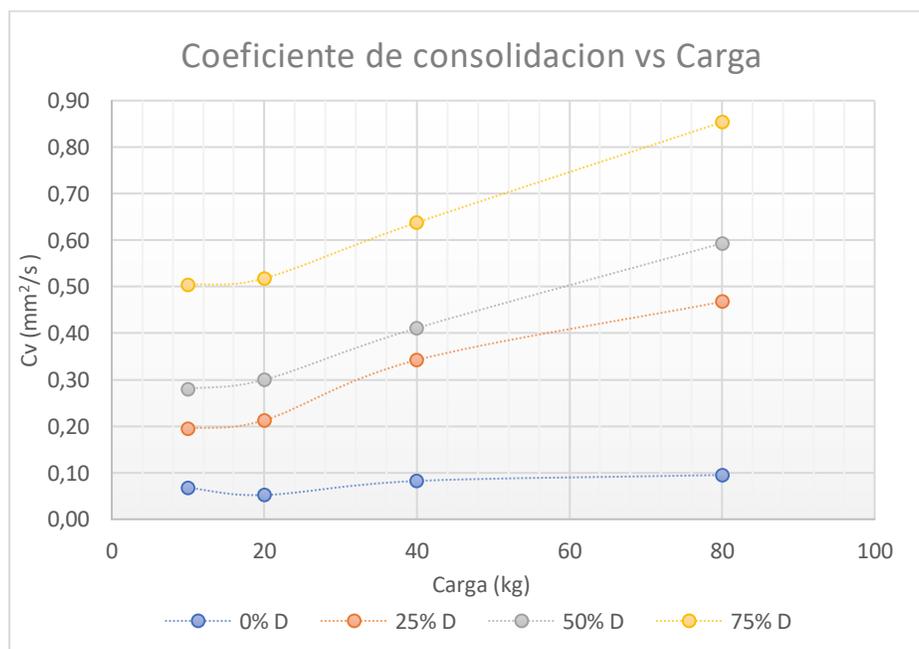
El coeficiente de consolidación para cada muestra de suelo se obtuvo para cada escalón de carga usando el método de Taylor para el 90% de consolidación. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos para todas las muestras de suelo y para cada escalón de carga.

Tabla 7 Resumen de los coeficientes de consolidación para cada uno de los casos

	100C-0D	75C-25D	50C-50D	25C-75D
Carga(kg)	Cv(mm²/s)			
10	0,07	0,19	0,28	0,5
20	0,05	0,21	0,3	0,52
40	0,08	0,34	0,41	0,64
80	0,1	0,47	0,59	0,85

La siguiente grafica presenta el valor del Cv para cada muestra y escalón de carga. Se observa que a medida que el porcentaje de diatomeas aumenta, el coeficiente de consolidación Cv aumenta, esto indica que el tiempo de consolidación disminuye al aumentar el contenido de diatomeas.

El aumento de la carga de cada uno de los consolidómetros se realizó prácticamente en el mismo tiempo, por lo cual, debido al cambio en el Cv, se puede indicar que algunas muestras pudieron estar sometidas a compresión secundaria o creep y otras no.



Grafica 6 Coeficientes de consolidación versus carga

El anterior análisis se puede justificar con la siguiente ecuación:

$$Cv = \frac{Tv H^2}{t_{90}} \quad [1]$$

Cv = Coeficiente de consolidación.

t_{90} = tiempo para el cual ocurre el porcentaje de consolidación determinado en el ensayo.

H = Máxima distancia que recorre el agua.

Tv = Factor de tiempo correspondiente a las condiciones de drenaje del problema. Para este trabajo se tomó un factor de 0,848 como la consolidación es del 90% (Consolidación por el método de Taylor).

$$t_{90} = \frac{Tv H^2}{Cv} \quad [2]$$

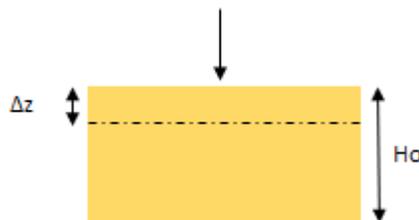
Cuando el coeficiente de consolidación aumenta el tiempo de consolidación disminuye. Lo que reafirma el análisis de la gráfica anterior.

8.4. Curvas de compresibilidad

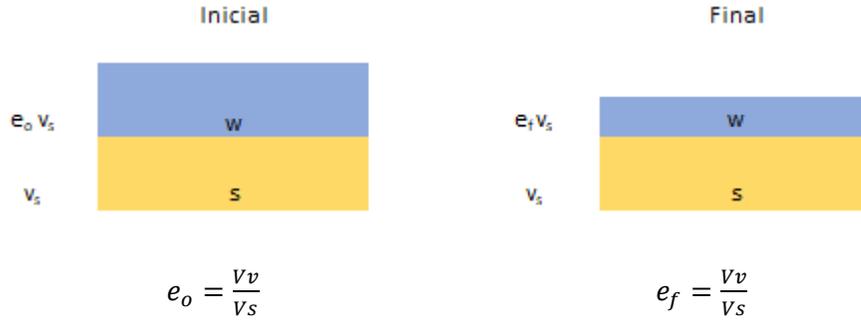
Una de las constantes más importantes que determinan la forma de la curva de compresibilidad es la relación de vacíos. Por lo tanto, para cada uno de los porcentajes de cada una de las mezclas y para cada escalón de carga se realizó el cálculo de la relación de vacíos inicial partiendo de la relación de vacíos final de la consolidación con una carga aplicada de 80 kg.

A continuación, se presentan los cálculos realizados para cada una de las mezclas en la carga de 80 Kg de tal forma que la relación de vacíos inicial para 80 kg fue la relación de vacíos final de la carga de 40 kg y así sucesivamente hasta llegar a 10 kg.

Para determinar la ecuación que permite relacionar la relación de vacíos del suelo con la altura inicial y el asentamiento final de la muestra para cada escalón de carga, se realizó un diagrama de fases el cual se muestra a continuación.



$$\varepsilon_z = \frac{\Delta z}{H_o}$$



$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_o} = \frac{(e_o V_s + V_s) - (e_f V_s + V_s)}{V_s(e_o + 1)} \quad [3]$$

$$\epsilon_v = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad [4]$$

$$\frac{\Delta z}{H_o} = \frac{e_o - e_f}{1 + e_o} \quad [5]$$

La relación de vacíos inicial (e_o) se calcula finalmente con la anterior ecuación

$$e_o = \frac{e_f + (\Delta z / H_o)}{1 - (\Delta z / H_o)} \quad [6]$$

A continuación, se muestran las tablas obtenidas que permiten graficar las curvas de compresibilidad para las muestras con diferente porcentaje de diatomeas.

Tabla 8 Resumen de curva compresibilidad para 100C

Carga(kg)	ϵ_z	e_f	e_o	$\delta(\text{kg/cm}^2)$
10	0,028	0,785	0,836	0,059
20	0,021	0,748	0,785	0,118
40	0,032	0,691	0,748	0,235
80	0,039	0,626	0,691	0,471

Tabla 9 Resumen curva de compresibilidad para 75C-25D

Carga(kg)	ϵ_z	e_f	e_o	$\delta(\text{kg/cm}^2)$
10	0,012	1,338	1,366	0,06
20	0,020	1,290	1,338	0,12
40	0,037	1,207	1,290	0,24
80	0,031	1,137	1,207	0,47

Tabla 10 Resumen compresibilidad 50C-50D

Carga(kg)	ϵ_z	e_f	e_o	$\delta(\text{kg/cm}^2)$
10	0,015	2,101	2,243	0,06
20	0,056	2,015	2,194	0,12
40	0,030	1,924	2,015	0,24
80	0,037	1,815	1,924	0,47

Tabla 11 Resumen compresibilidad para 25C-75D

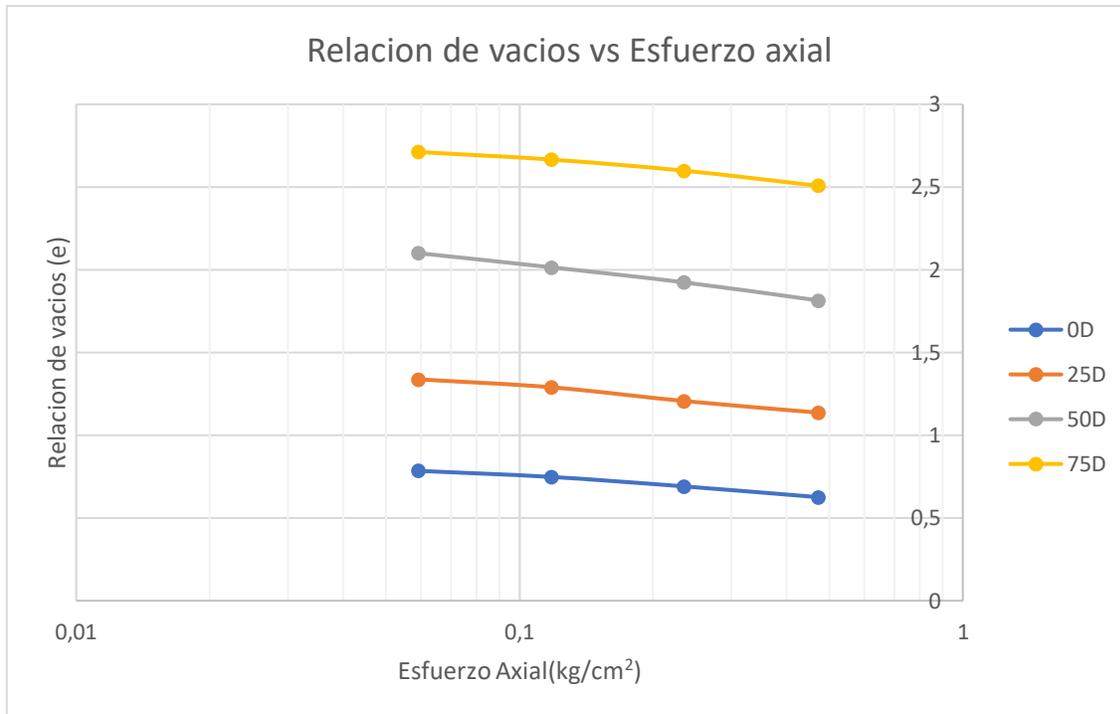
Carga(kg)	ϵ_z	e_f	e_0	$\delta(\text{kg/m}^2)$
10	0,013	2,712	2,762	0,06
20	0,012	2,666	2,712	0,12
40	0,018	2,599	2,666	0,24
80	0,025	2,508	2,599	0,47

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los cuatro ensayos realizados.

Tabla 12 Resumen compresibilidad de todos los ensayos

	0D	25D	50D	75D
$\delta(\text{kg/cm}^2)$	e_f	e_f	e_f	e_f
0,059	0,785	1,338	2,101	2,712
0,118	0,748	1,29	2,015	2,666
0,235	0,691	1,207	1,924	2,599
0,471	0,626	1,137	1,815	2,508

La grafica 10 muestra las curvas de compresibilidad obtenidas para las muestras con diferentes porcentajes de diatomeas. En esta grafica se evidencia que las líneas son paralelas entre sí, presentando aproximadamente el mismo valor del índice de compresibilidad C_c . En esta grafica también se evidencia que, a mayor contenido de diatomeas, la relación de vacíos inicial de la muestra aumenta, esto indica una mayor cantidad de vacíos en el suelo con relación al volumen de sólidos. Esta condición se obtuvo debido a la alta porosidad en la estructura de las diatomeas lo cual aumenta los vacíos de la muestra.



Grafica 7 Grafica de las Curvas de Compresibilidad de todos los ensayos

De la anterior grafica se puede visualizar que las pendientes son muy parecidas entre ellas. En la siguiente tabla se muestra el índice de compresibilidad para cada una de las curvas y la ecuación con la que se determinó:

$$Cc = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)} \quad [7]$$

Tabla 13 Resultados de Índice de Compresibilidad

% Diatomeas	Cc
0	0,1762
25	0,2227
50	0,2217
75	0,2261

De la anterior grafica se puede ver que el índice de compresibilidad no tiene un cambio considerable a medida que el porcentaje de diatomeas aumenta.

9. Efecto de las diatomeas en la estabilidad de un Talud en Centrifuga

9.1. Modelos a 200 gravedades

En las muestras analizadas anteriormente, posterior al proceso de consolidación, se realizaron ensayos en centrifuga geotécnica para determinar el efecto del porcentaje de diatomeas en la estabilidad de un talud. La centrifuga geotécnica de la Escuela Colombiana

de Ingeniería Julio Garavito se muestra en la Figura 6. Según la revisión bibliográfica realizada, se espera que a mayor contenido de diatomeas la resistencia al corte no drenado sea mayor y el factor de seguridad del talud aumente.

En las siguientes imágenes se presentan los modelos antes y después del ensayo en la centrifuga geotécnica realizado a 200 gravedades. Las líneas que se ven en cada uno de los modelos fueron realizadas con un tinte llamado Iris y se trazaron con ayuda de un hilo. Los taludes se cortaron a 45 grados a la mitad de cada uno de los modelos.

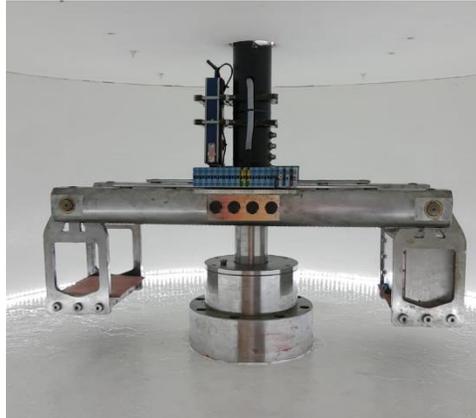


Figura 6 Centrifuga Geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Las siguientes figuras muestran las fotos tomadas antes y después de cada ensayo para cada muestra de suelo. En las figuras no es notoria la superficie de falla del talud, sin embargo, se evidencia un mayor movimiento en la muestra realizada únicamente con caolín, evidenciado principalmente en la pata del talud. Esto afirma la hipótesis inicial de una menor resistencia al corte del suelo para menor cantidad de diatomeas.

Modelo 100C-0D



Figura 7 Modelo 100C-0D antes y después del vuelo.

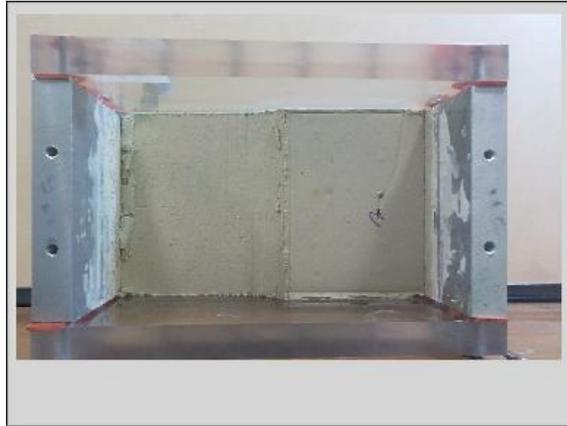


Figura 8 Vista en planta de modelo 100C-0D después del vuelo

Modelo 75C-25D



Figura 9 Modelo 75C-25D de Centrifuga antes y después del vuelo

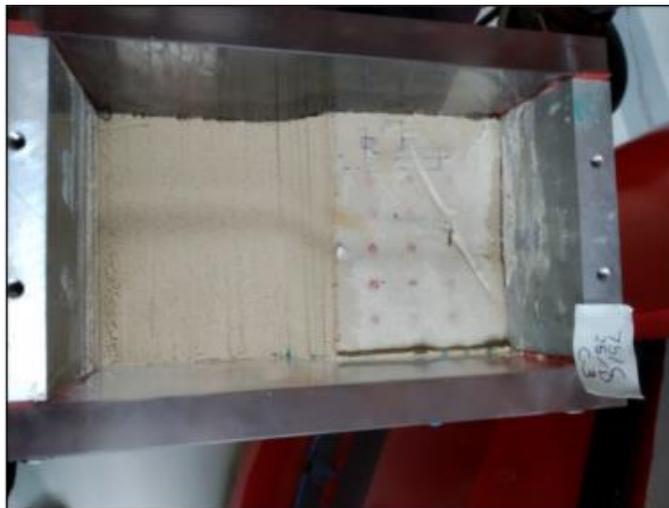


Figura 10 Vista en planta de Modelo 75C-25D después del vuelo

Modela 50C-50D



Figura 11 Modelo 50C-50D de Centrifuga entes y después del vuelo

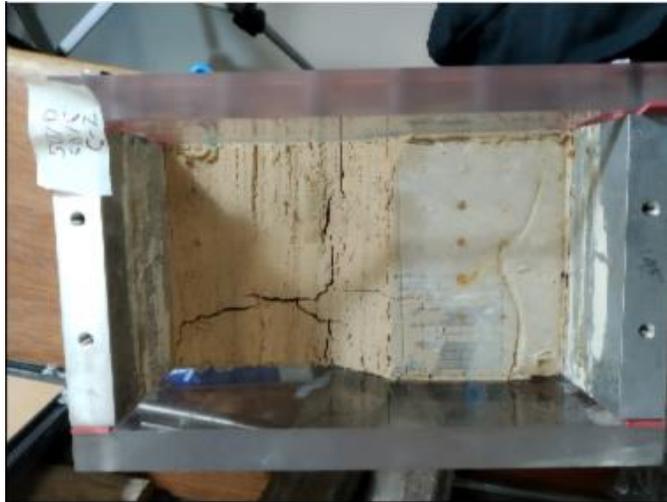


Figura 12 Vista en planta de modelo 50C-50D después del vuelo

Modelo 25C-75D



Figura 13 Modelo 25C-75D de Centrifuga entes y después del vuelo

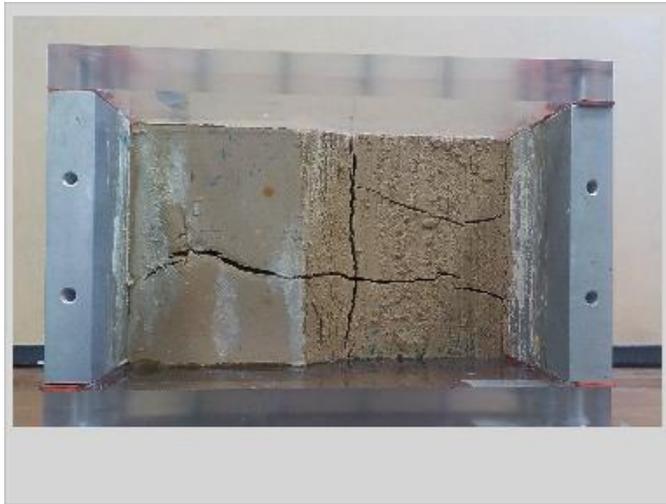


Figura 14 Vista en planta de modelo 25C-75D después del vuelo

9.2. Superficie de Falla

Para analizar con un mayor detalle el comportamiento de los modelos antes y después del vuelo en centrífuga, se tomaron las fotografías y se importaron al programa AutoCAD con el fin de visualizar el movimiento de las líneas y la visualización de una posible superficie de falla. Esto se logró dibujando el trazado de la cuadrícula que tenía tinta antes del vuelo y luego sobreponiendo esta cuadrícula sobre el modelo después del vuelo.

Las líneas negras son el modelo antes del vuelo y las líneas rojas los cambios que sufrió el modelo después del vuelo.

Modelo 100C-0D

Para el modelo que contiene únicamente caolín, se logró visualizar una posible falla del suelo la cual se muestra en la figura con color azul.

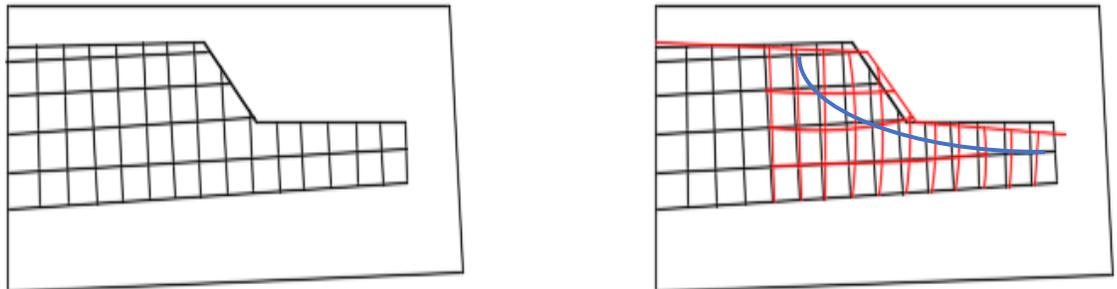


Figura 15 Modelos 100C-0D antes y después del vuelo

Modelo 75C-25D

En el modelo que contiene un 25% de diatomeas no se logra ver un posible plano de falla en el suelo, sin embargo, se observa un movimiento considerable del talud.

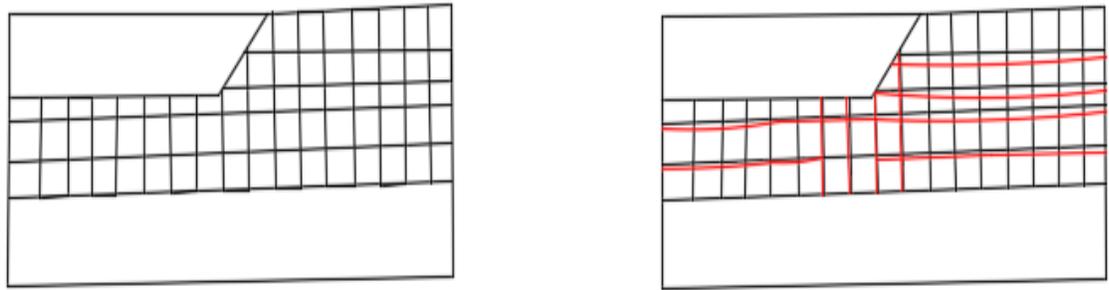


Figura 16 Modelo 75C-25D antes y despues del vuelo

Modelo 50C-50D

Para el modelo que contiene un 50% de diatomeas no se logra evidenciar un posible plano de falla en el suelo, sin embargo, se observa un pequeño movimiento del terreno. Este movimiento puede deberse a las grietas evidenciadas en la superficie del suelo, las cuales pueden ocasionar contracción del mismo.

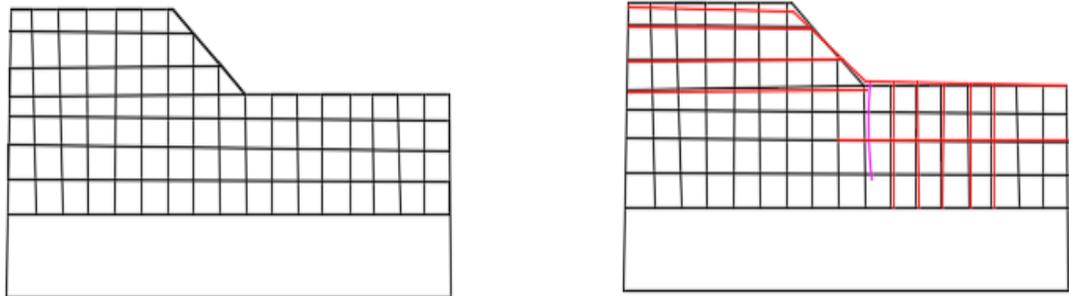


Figura 17 Modelo 50C-50D antes y después del vuelo

Modelo 25C-75D

Para el modelo que contiene 75% de diatomeas no se logra realizar un posible plano de falla en el suelo. Se evidencia movimiento del talud principalmente en la dirección vertical, esto puede deberse al igual que en modelo anterior a las grietas generadas durante el vuelo en centrífuga.

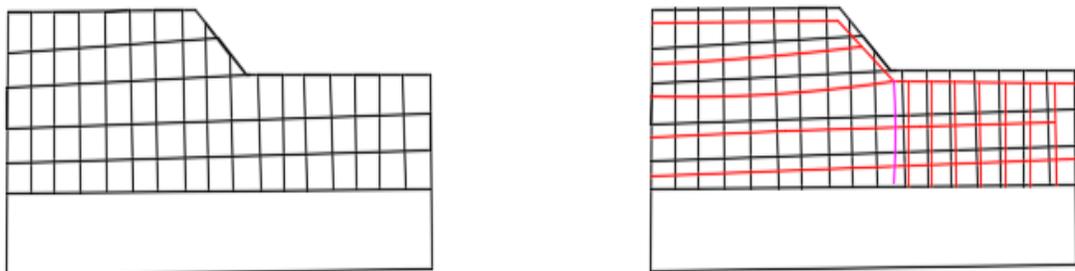


Figura 18 Modelo 25C-75D antes y después de la falla

Luego de revisar todos los modelos se puede ver que a medida que el porcentaje de diatomeas va aumentando los modelos empiezan a presentar un agrietamiento común en el pie del talud. Y para el único modelo que se le pudo realizar un posible plano de falla fue al que no contenía diatomeas.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con los resultados de límites líquidos se observó que a medida que el contenido de diatomeas en el suelo aumenta, el límite líquido también aumenta de forma polinómica de segundo grado. Tal como se muestra en la gráfica 3. Este comportamiento se encontró en otros estudios realizados en México y en Bogotá.
- La gravedad específica en cada uno de los casos disminuye a medida que el porcentaje de diatomeas aumenta, lo que indica que el suelo es menos denso a medida que el porcentaje de diatomeas aumenta. Otra propiedad que también habían encontrado en este tipo de suelos en estudios hechos en Bogotá.
- Para el coeficiente de consolidación se encontró que a medida que el contenido de diatomeas en el suelo aumenta el coeficiente de consolidación C_v aumenta, lo que quiere decir que el tiempo de consolidación en suelos diatomáceos disminuye a mayor contenido de diatomeas.
- A pesar de que no se realizó la curva completa de compresibilidad, porque se hizo solo con los datos de carga, se encontró que el índice de compresibilidad no cambia con el contenido de diatomeas.
- En los modelos en centrífuga se evidenció un plano de falla en el análisis de imagen en el modelo que contiene únicamente caolín, lo cual indica un aumento en la resistencia al corte con el aumento del porcentaje de diatomeas.
- Para los modelos de centrífuga a 200 gravedades se encontró que los modelos que contenían diatomeas parecían que hubieran sufrido una falla por tracción, lo que deja una incógnita y la posibilidad de seguir realizando más ensayos como el de corte directo para ver el comportamiento de estos suelos a esfuerzos cortantes. Y así, poder interpretar este tipo de fallas que se presentaron.
- En este trabajo se realizaron ensayos con caolín y con diatomeas de Oicata Boyacá. La investigación en este tipo de suelos sigue siendo importante y es por esto por lo que se hace necesario seguir realizando ensayos de laboratorio con diatomeas y arcillas para conocer un poco más de este tipo de suelos.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Díaz-Rodríguez, J. A. (2011). Comportamiento monotónico de suelos diatomáceos. *Revista Investigación de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 27-34.
- Díaz-Quirós, C., y Rivera-Rondón, C. A. (2004). Diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales. *Caldasia*, 26(2), 381-394.
- Merchán, W. N., Melo, S. G., & Sánchez, S. M. (2007). Mineralogía y geoquímica de diatomitas (Boyacá, Colombia). *Geología Colombiana*, 32, 77-88.
- Díaz-Rodríguez, J. A. (2006). Los suelos Volcánico-lacustres de la ciudad de México. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6, (44).
- Díaz-Rodríguez Jorge Abraham (2014). *Mecánica de suelos: Naturaleza y propiedades*. México D.F., Editorial Trillas S.A.
- Uriza, E. A. C., y Sanjurjo, H. M. A. (2008). Diatomeas (Bacillariophyceae) del marjal Oliva-Pego (Comunidad Valenciana, España). In *Anales del Jardín Botánico de Madrid* (Vol. 65, No. 1, pp. 111-128). Real Jardín Botánico.
- Canizal-Silahua Ariel (2009). *Catálogo de diatomeas dulceacuicolas mexicanas*. (Reporte de investigación). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Caballero Margarita (s.f). Diatomeas: División Bacillariophyta. Laboratorio de Paleolimnología: Geofísica UNAM. http://www.geofisica.unam.mx/iframes/laboratorios/institucionales/paleolimnologia/sitio_web/diatomeas.html.
- Caicedo, B., Mendoza, C., López, F., y Lizcano, A. (2018). Behavior of diatomaceous soil in lacustrine deposits of Bogotá, Colombia. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 10(2), 367-379.
- Díaz-Rodríguez, J. A., & López-Molina, J. A. (2009). Cyclic behavior of diatomaceous soils. In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt, 5-9 October 2009, Volume 1* (pp. 159-162). IOS Press.
- Avila, L. X. G. (2010). *Modelación en centrífuga de túneles poco profundos con variación espacial del suelo* (Doctoral dissertation, Uniandes).

Anexo 1 Caracterización del Material

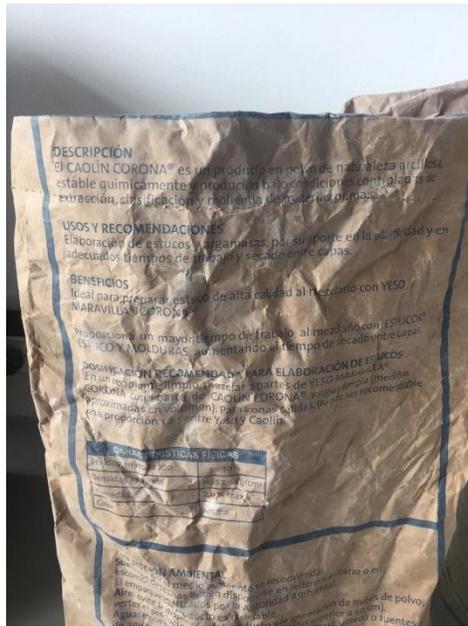


Figura 19 Empaque donde venia el caolín



Figura 20 Imagen de caolín y diatomeas

Para las diatomeas La mina Oicata nos facilitó algunos de las caracterizaciones y la ubicación de estas. Datos que también se encuentra en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi

IGAC										RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO – ELEMENTOS TOTALES Q-31		FECHA	
GESTIÓN AGROLÓGICA										AAAA-MM-DD		2019-06-12	
NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO CAOLINES SUPERIOR BOYACÁ S.A.S.										TIPO DE MUESTRA SUELO		No. SOLICITUD 3744_1	
DEPARTAMENTO / MUNICIPIO / LOCALIZACIÓN Boyaca - Oicatá													
SUPLEMENTO DE RESULTADOS <input type="checkbox"/> DE FECHA _____ DIRECCIÓN DEL CLIENTE KM 11 VIA TUNJA - PAIPA													
No. DE LABORATORIO	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	PROFUNDIDAD (cm)	CALCIO (%)		MAGNESIO (%)		POTASIO (%)		SODIO (%)				
			Ca	CaO	Mg	MgO	K	K2O	Na	Na2O			
MQ1-36488	DIATOMEAS MINA OICATA	0-200	0.01	0.01	0.0078	0.0130	0.99	1.20	0.12	0.16			
ALUMINIO (%)		SILICIO (%)		HIERRO (%)		MANGANESO		ZINC		COBRE			
Al	Al2O3	Si	SiO2	Fe	Fe2O3	Mn (mg/kg)	MnO (%)	Zn (mg/kg)	ZnO (%)	Cu (mg/kg)			
5.51	10.41	38.23	79.60	2.74	3.91	11.88	0.0015	53.97	0.0100	29.69			
COBRE		Sumatoria de óxidos											
CuO (%)		0.0037 96.30											
Observaciones:													

Figura 21 Resultado Análisis Diatomeas

IGAC										INFORME Y RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO Q-35		FECHA	
GESTIÓN AGROLÓGICA										AAAA-MM-DD		2019-06-12	
NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO CAOLINES SUPERIOR BOYACÁ S.A.S.										TIPO DE MUESTRA SUELO		No. SOLICITUD 3744_1	
DEPARTAMENTO / MUNICIPIO / LOCALIZACIÓN Boyaca - Oicatá													
SUPLEMENTO DE RESULTADOS <input type="checkbox"/> DE FECHA _____ DIRECCIÓN DEL CLIENTE KM 11 VIA TUNJA - PAIPA													
No. DE LABORATORIO	TIPO DE MUESTRA	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	pH										
MQ1-36488	SUELO	DIATOMEAS MINA OICATA	3.960										

Figura 22 Resultados Análisis Diatomeas

IGAC										INFORME Y RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO Q-35		FECHA	
GESTIÓN AGROLÓGICA										AAAA-MM-DD		2019-06-12	
NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO DIEGO RODRIGUEZ										TIPO DE MUESTRA SUELO		No. SOLICITUD 3744_1	
DEPARTAMENTO / MUNICIPIO / LOCALIZACIÓN Boyaca - Oicatá													
SUPLEMENTO DE RESULTADOS <input type="checkbox"/> DE FECHA _____ DIRECCIÓN DEL CLIENTE CALLE 69 B No. 17J-24 SUR													
Condición de la muestra		Explicación:											
APROBADA		N/A											
Fecha de recepción de la muestra		Fecha de pago de la muestra		Fecha de ejecución de los análisis									
2019-05-30		2019-05-30		2019-06-05									
Método	Condiciones específicas o ambientales del método			Incertidumbre estimada (si aplica)	Limite de detección (si aplica)		Limite de cuantificación (si aplica)						
pH: Potenciométrico en relación suelo:agua 1:1*	Temperatura: 10-40 °C y Humedad relativa no superior al 85%.			0.42 Unidades pH	N/A		N/A						
CONVERSIÓN DE UNIDADES(CUANDO SE REQUIERA)													
N/A													
Cualquier inquietud puede comunicarse con:													
Alexander Bustos extensión 91134													

Figura 23 Resultados Análisis Diatomeas

Anexo 2 Limites Atterberg

NORMA I.N.V.E – 125 DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS NORMA I.N.V.E – 126 LIMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS.

Anexo 2.1 75C – 25D

Tabla 14 Datos tomados en laboratorio para hallar limite liquido de 75C-25D

LL						
# Golpes	Recipiente(g)	Rec + Muestra(g)	Rec + Mues seca	Peso agua	Peso Seco	w(%)
19	6,88	18,1	14,46	3,64	7,58	48,02
26	7,43	16,81	13,77	3,04	6,34	47,95
34	7,19	19,84	15,82	4,02	8,63	46,58

Tabla 15 Datos tomados en laboratorio para hallar limite plástico de 75C-25D

LP					
Recipiente(g)	Rec + Muestra(g)	Rec + Mues seca	Peso agua	Peso Seco	w(%)
7,27	13,62	12,25	1,37	10,88	12,59
7	13,01	11,71	1,30	10,41	12,49

Tabla 16 Resultados de los limites e índice de plasticidad para 75C-25D

LL	47,65
LP	12,54
IP	35,11



Gráfica 8 Contenido de humedad versus número de golpes

Anexo 2.2 50C – 50D

Tabla 17 Datos tomados en laboratorio para hallar limite liquido de 50C-50D

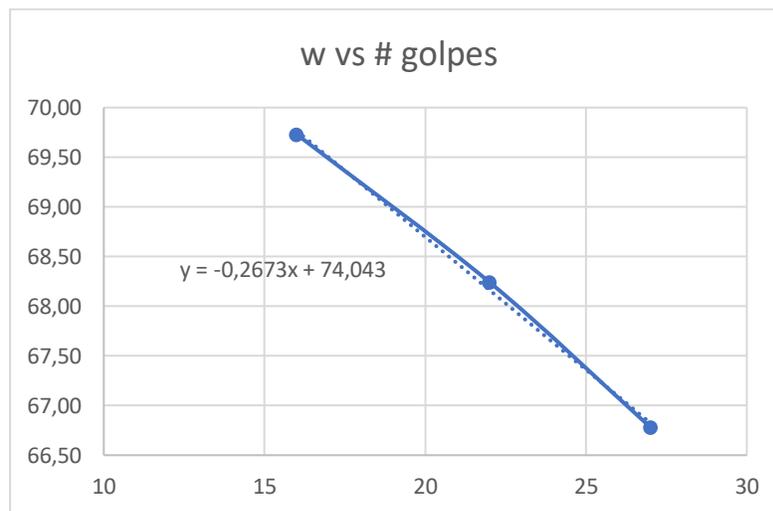
LL						
# Golpes	Recipiente(g)	Rec + Muestra(g)	Rec + Mues seca	Peso agua	Peso Seco	w(%)
27	12,04	21,68	17,82	3,86	5,78	66,78
22	4,24	14,57	10,38	4,19	6,14	68,24
16	3,97	16,53	11,37	5,16	7,4	69,73

Tabla 18 Datos tomados en laboratorio para hallar limite plástico de 50C-50D

LP					
Recipiente(g)	Rec + Muestra(g)	Rec + Mues seca	Peso agua	Peso Seco	w(%)
7,6	13,92	12,06	1,86	10,20	18,24
7,45	14,63	12,51	2,12	10,39	20,40

Tabla 19 Resultados de los limites e índice de plasticidad para 50C-50D

LL	67,36
LP	19,32
IP	48,04



Grafica 9 Contenido de humedad versus número de golpes

Anexo 2.3 100C

Tabla 20 Datos tomados en laboratorio para hallar limite liquido de 100C

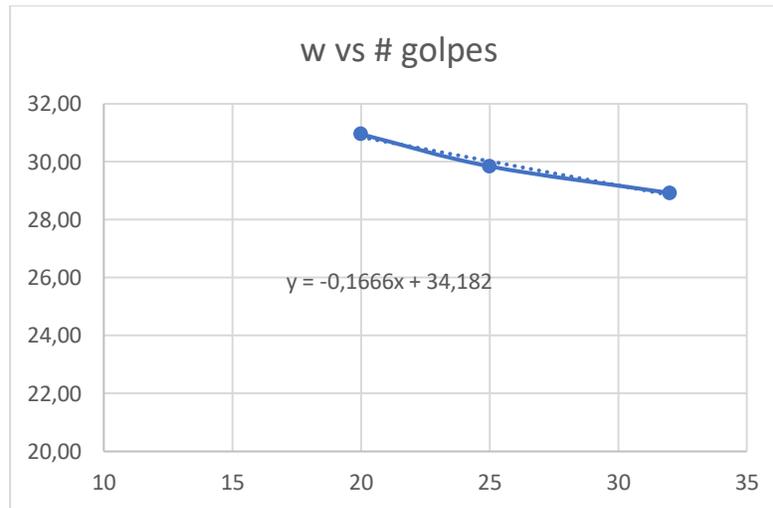
LL						
# Golpes	Recipiente(g)	Rec + Muestra(g)	Rec + Mues seca	Peso agua	Peso Seco	w(%)
20	7,25	20,45	17,33	3,12	10,08	30,95
25	11,2	21,86	19,41	2,45	8,21	29,84
32	7,1	18,6	16,02	2,58	8,92	28,92

Tabla 21 Datos tomados en laboratorio para hallar limite plástico de 100C

LP					
Recipiente(g)	Rec + Muestra(g)	Rec + Mues seca	Peso agua	Peso Seco	w(%)
3,99	10,48	9,46	1,02	8,44	12,09
11,37	18,71	17,51	1,20	16,31	7,36

Tabla 22 Resultados de los limites e índice de plasticidad para 100C

LL	30,02
LP	9,72
IP	20,30



Grafica 10 Contenido de humedad versus número de golpes

Anexo 2.4 25C -75D

Tabla 23 Datos tomados en laboratorio para hallar limite liquido de 25C-75D

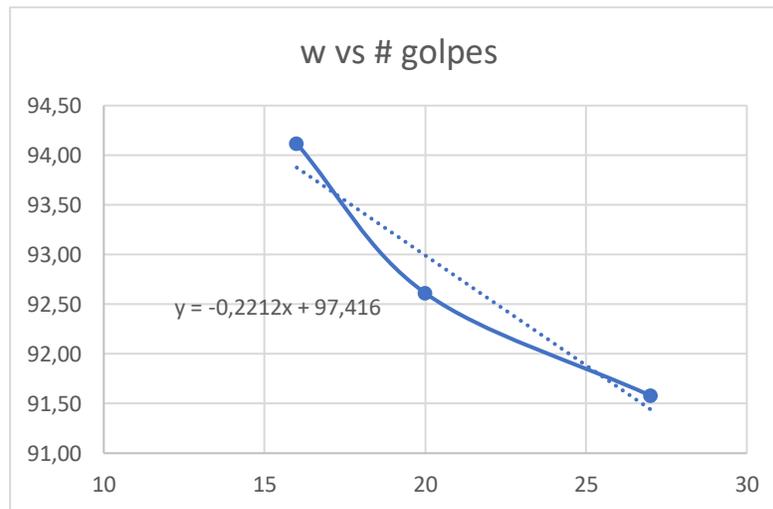
LL						
# Golpes	Recipiente(g)	Rec + Muestra(g)	Rec + Mues seca	Peso agua	Peso Seco	w(%)
27	7,13	20,1	13,9	6,20	6,77	91,58
20	10,52	21,73	16,34	5,39	5,82	92,61
16	10,98	22,53	16,93	5,60	5,95	94,12

Tabla 24 Datos tomados en laboratorio para hallar limite plástico de 25C-75D

LP					
Recipiente(g)	Rec + Muestra(g)	Rec + Mues seca	Peso agua	Peso Seco	w(%)
6,7	13,24	10,93	2,31	8,62	26,80
4,7	10,97	8,77	2,20	6,57	33,49

Tabla 25 Resultados de los limites e índice de plasticidad para 25C-75D

LL	91,89
LP	30,14
IP	61,74



Grafica 11 Contenido de humedad versus número de golpes

Anexo 2.5 100D

Tabla 26 Datos tomados en laboratorio para hallar limite liquido de 100D

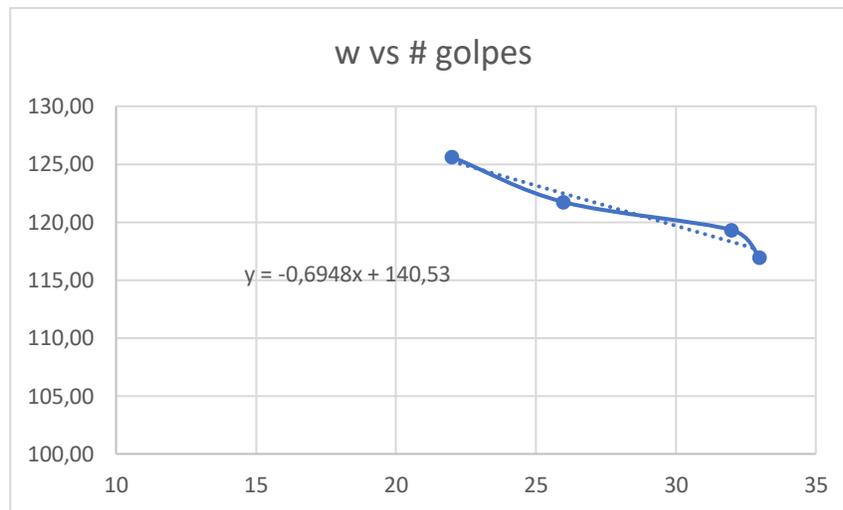
LL						
# Golpes	Recipiente(g)	Rec + Muestra(g)	Rec + Mues seca	Peso agua	Peso Seco	w(%)
22	7,1	16,26	11,16	5,10	4,06	125,62
26	7,22	16,71	11,5	5,21	4,28	121,73
32	11	19,97	15,09	4,88	4,09	119,32
33	10,77	20,12	15,08	5,04	4,31	116,94

Tabla 27 Datos tomados en laboratorio para hallar limite plástico de 100D

LP					
Recipiente(g)	Rec + Muestra(g)	Rec + Mues seca	Peso agua	Peso Seco	w(%)
7,07	13,68	10,93	2,75	8,18	33,62
7,35	13,47	10,9	2,57	8,33	30,85

Tabla 28 Resultados de los limites e índice de plasticidad para 100D

LL	123,16
LP	32,24
IP	90,92



Grafica 12 Contenido de humedad versus número de golpes

Anexo 2.6 Registro Fotográfico



Figura 24 Atomizador, espátula y recipiente de porcelana



Figura 25 Cazuela de Casagrande antes de los golpes



Figura 26 Cazuela de Casagrande después de dar los golpes necesarios para cerrar la línea



Figura 27 Proceso para realizar los limites plásticos



Figura 28 Rollitos



Figura 29 Muestras luego de secar al horno y pesar en bascula

Anexo 3 Consolidación

Anexo 3.1 Resultados Consolidación 100C

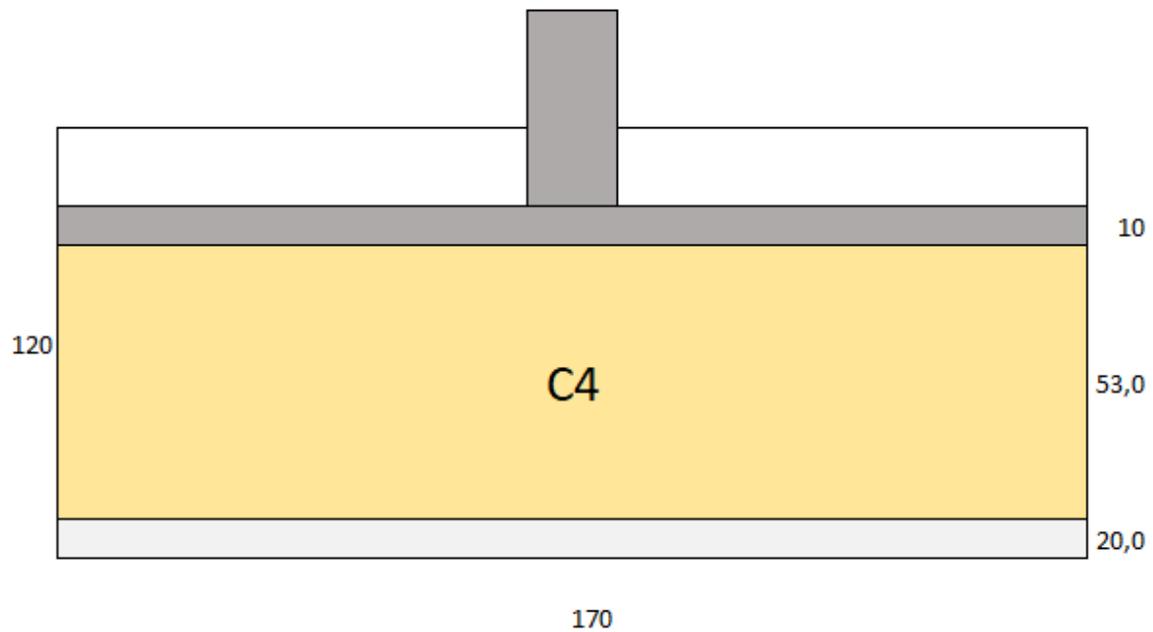


Figura 30 Modelo 100C inicial de consolidación para 100C

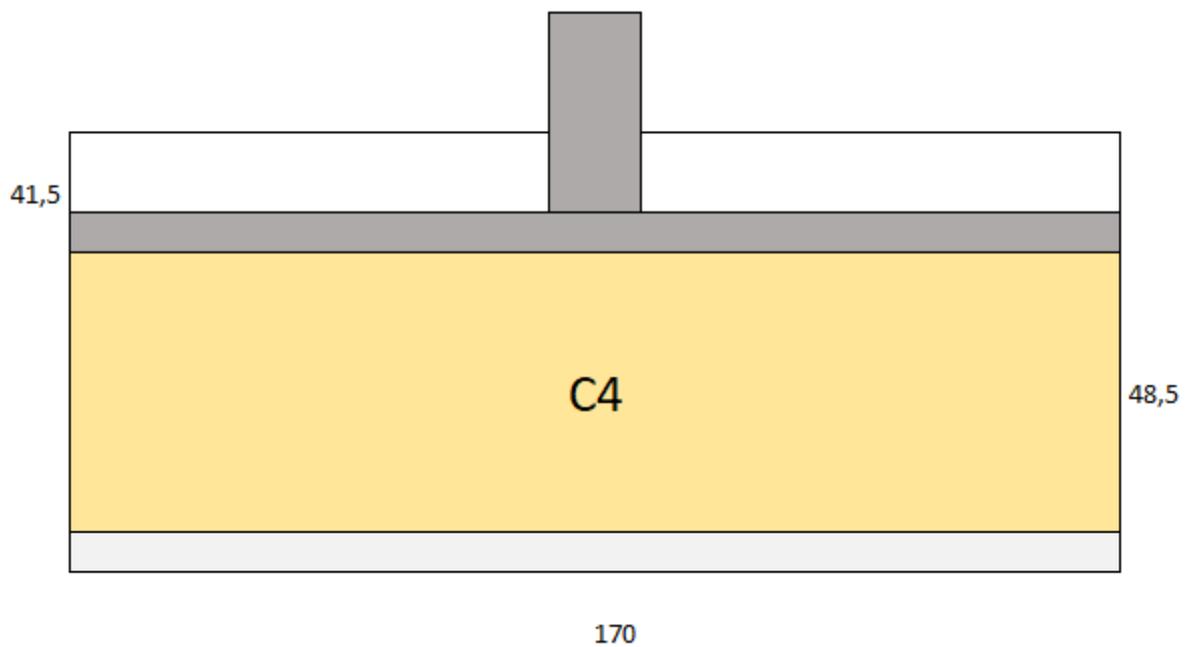
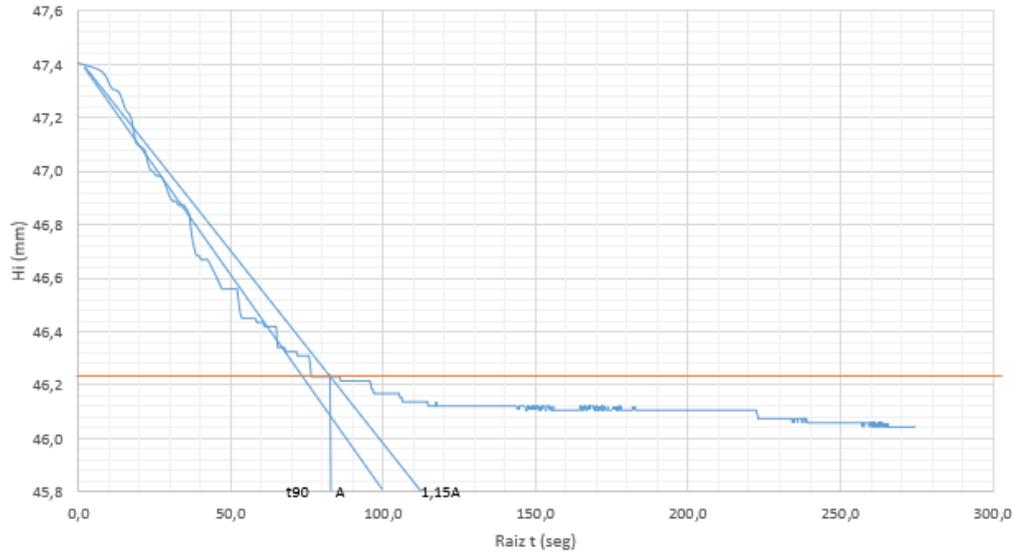


Figura 31 Modelo 100C luego de recibir 7 kg de carga

Para 10 Kg



Gráfica 13 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 100C carga 10kg.

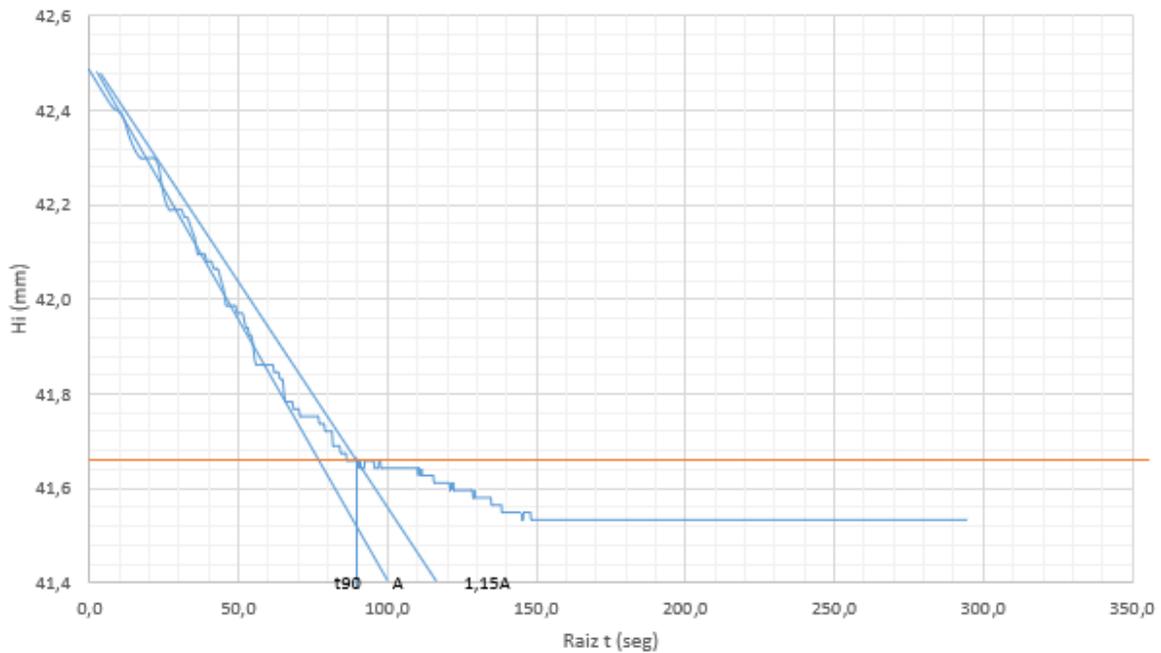
Tabla 29 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 100C carga 10kg

A	98
1.15A	112,7
Raíz t90	84
t90 seg	7056
H fin	46,24
H prom	47,37
Hdr	23,69
Tv	0,848
Cv(mm2/seg)	0,067

Tabla 30 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 100C carga 10kg

Ho(mm)	48,50
ΔZ(mm)	1,36
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	10
ϵ_z	0,028
e_f	0,78
e_0	0,84
δ(kg/m²)	588,2

Para 20 kg



Gráfica 14 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 100C carga 20 kg.

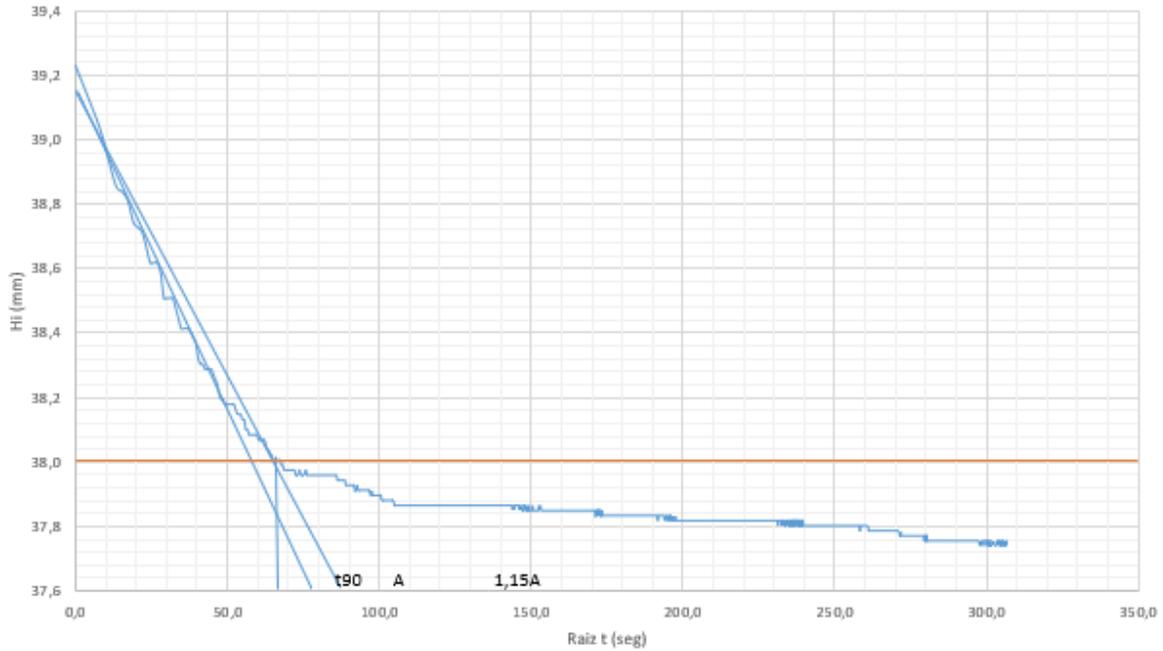
Tabla 31 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 100C carga 20kg

Ho(mm)	46,59
ΔZ (mm)	0,96
Área(mm ²)	0,017
Carga(kg)	20
ϵ_z	0,021
e_f	0,75
e_0	0,78
δ (kg/m ²)	1176,5

Tabla 32 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 100C carga 20kg

A	100
1.15A	115
Raíz t90	89
t90 seg	7921
H fin	41,65
H prom	44,119801
Hdr	22,06
Tv	0,848
Cv(mm ² /seg)	0,052

Para 40 kg



Gráfica 15 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 100C carga 40 kg

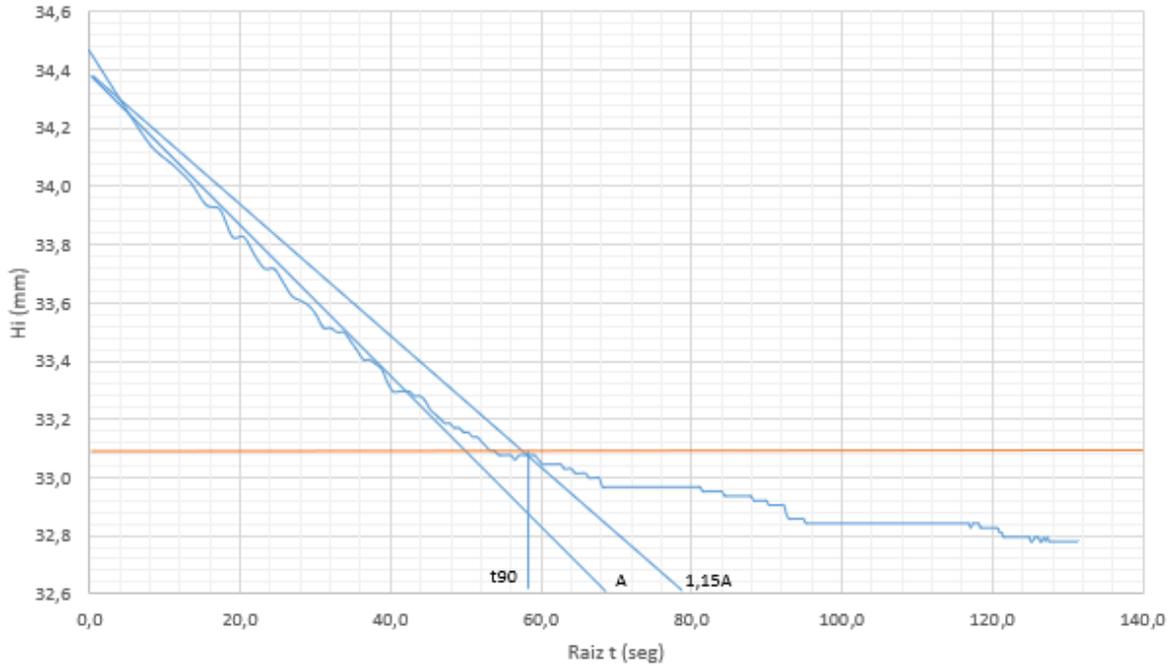
Tabla 33 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 100C carga 40 kg

Ho(mm)	45,49
ΔZ(mm)	1,47
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	40
ϵ_z	0,032
e_f	0,69
e_0	0,75
δ(kg/m²)	2352,9

Tabla 34 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 100C carga 40 kg

A	78
1.15A	89,7
Raíz t90	67
t90 seg	4489
H fin	38
H prom	41,746736
Hdr	20,87
Tv	0,848
Cv(mm²/seg)	0,082

Para 80 kg



Gráfica 16 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 100C carga 80kg

Tabla 35 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 100C carga 80kg

Ho(mm)	43,90
ΔZ (mm)	1,69
ω_f (%)	24,27%
Gs	2,58
Área(mm ²)	0,017
Carga(kg)	80
ϵ_z	0,039
e_f	0,63
e_0	0,69
δ (kg/m ²)	4705,9

Tabla 36 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 100C carga 80kg

A	68,5
1.15A	78,775
Raíz t90	58
t90 seg	3364
H fin	33,8
H prom	38,848127
Hdr	19,42
Tv	0,848
Cv(mm ² /seg)	0,095

Anexo 3.2 Resultado Consolidación 75C-25D

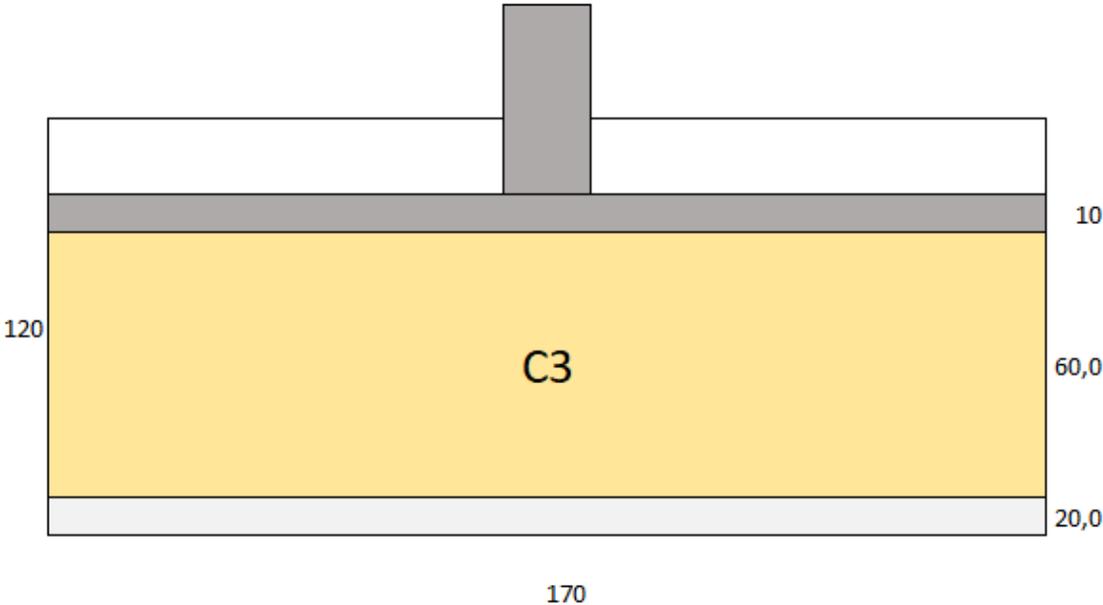


Figura 32 Modelo inicial de consolidación para 75C-25D

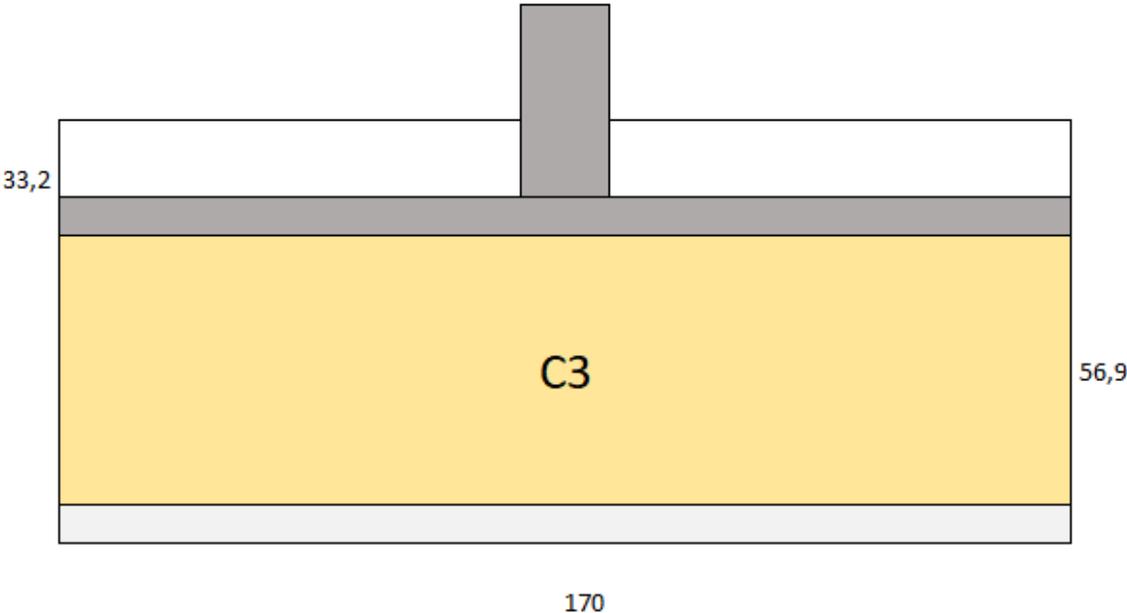
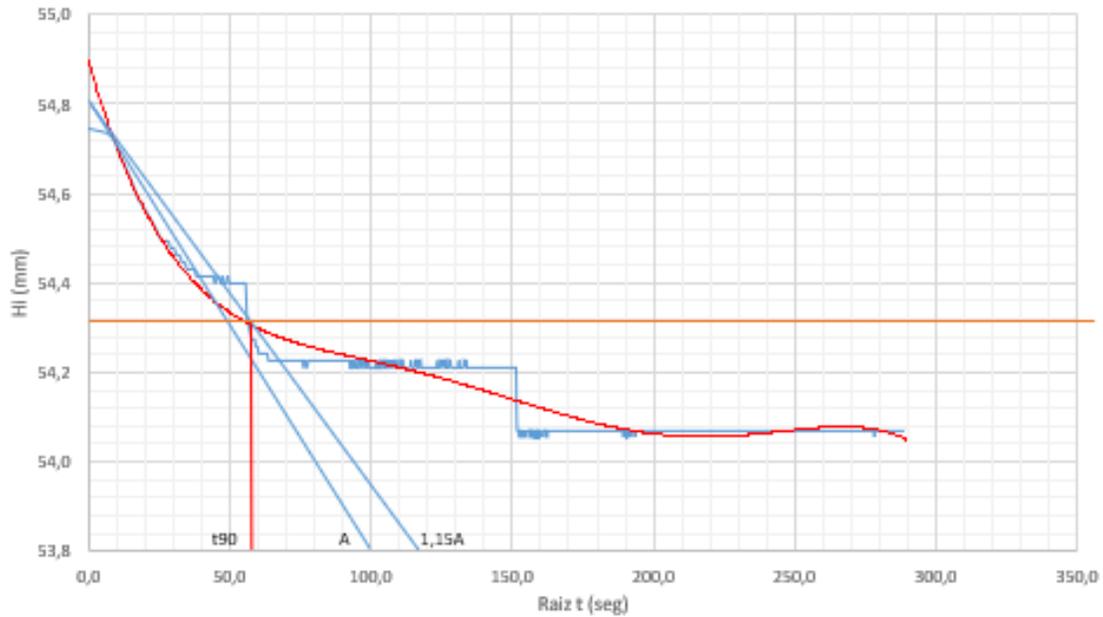


Figura 33 Modelo luego de recibir 7 kg de carga

10 kg



Gráfica 17 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 75C-25D carga 10kg

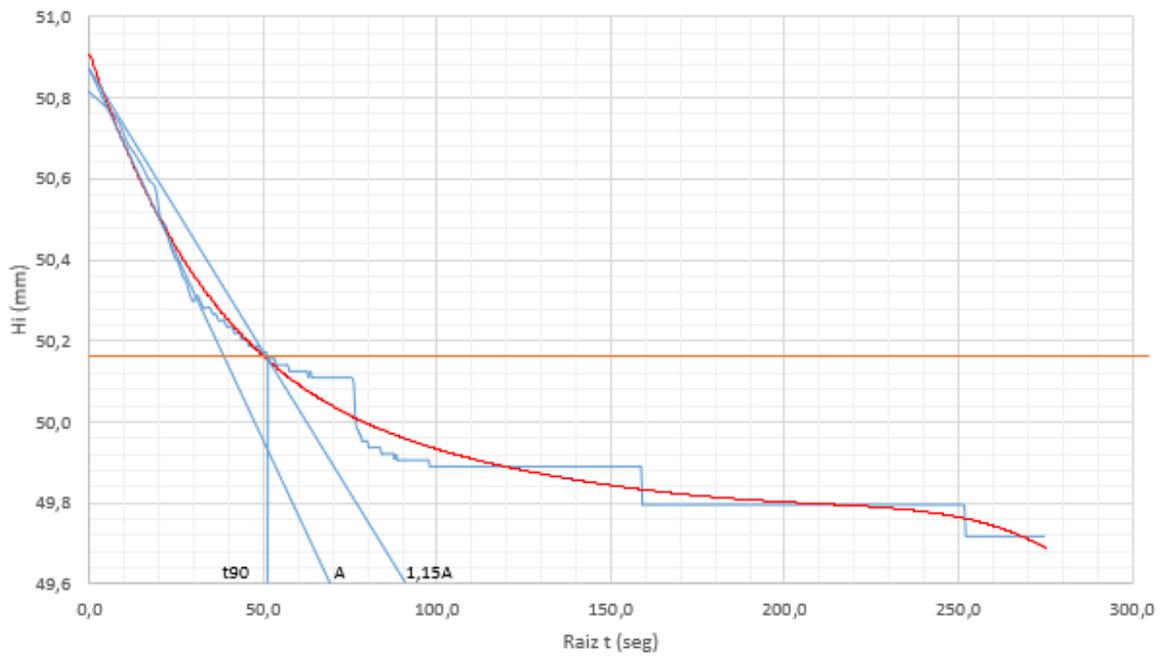
Tabla 37 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 75C-25D carga 10kg

Ho(mm)	56,85
ΔZ(mm)	0,68
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	10
ϵ_z	0,012
e_f	1,34
e_0	1,37
δ(kg/m²)	588,2

Tabla 38 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 75C-25D carga 10kg

A	100
1.15A	115
Raíz t90	58
t90 seg	3364
H fin	54,27
H prom	55,56
Hdr	27,78
Tv	0,848
Cv(mm²/seg)	0,195

20kg



Gráfica 18 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 75C-25D carga 20kg

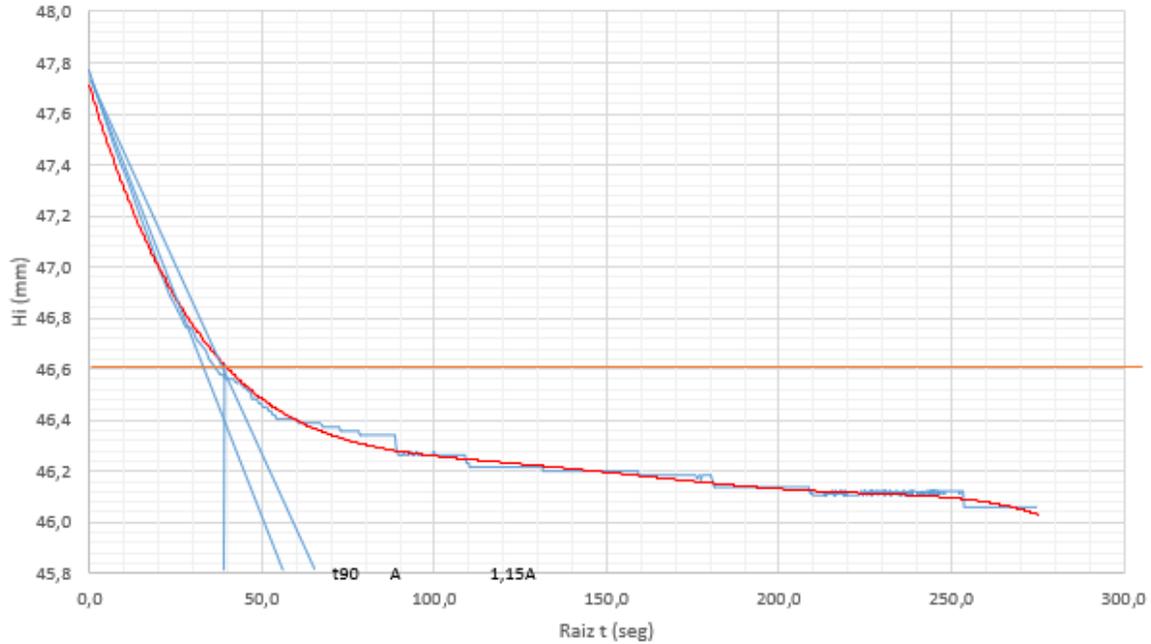
Tabla 39 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 75C-25D carga 20kg

Ho(mm)	54,07
ΔZ(mm)	1,10
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	20
ϵ_z	0,020
e_f	1,29
e_0	1,34
δ(kg/m²)	1176,5

Tabla 40 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 75C-25D carga 20kg

A	79
1.15A	90,85
Raíz t90	52
t90 seg	2704
H fin	50,16
H prom	52,1145765
Hdr	26,06
Tv	0,848
Cv(mm²/seg)	0,213

40 kg



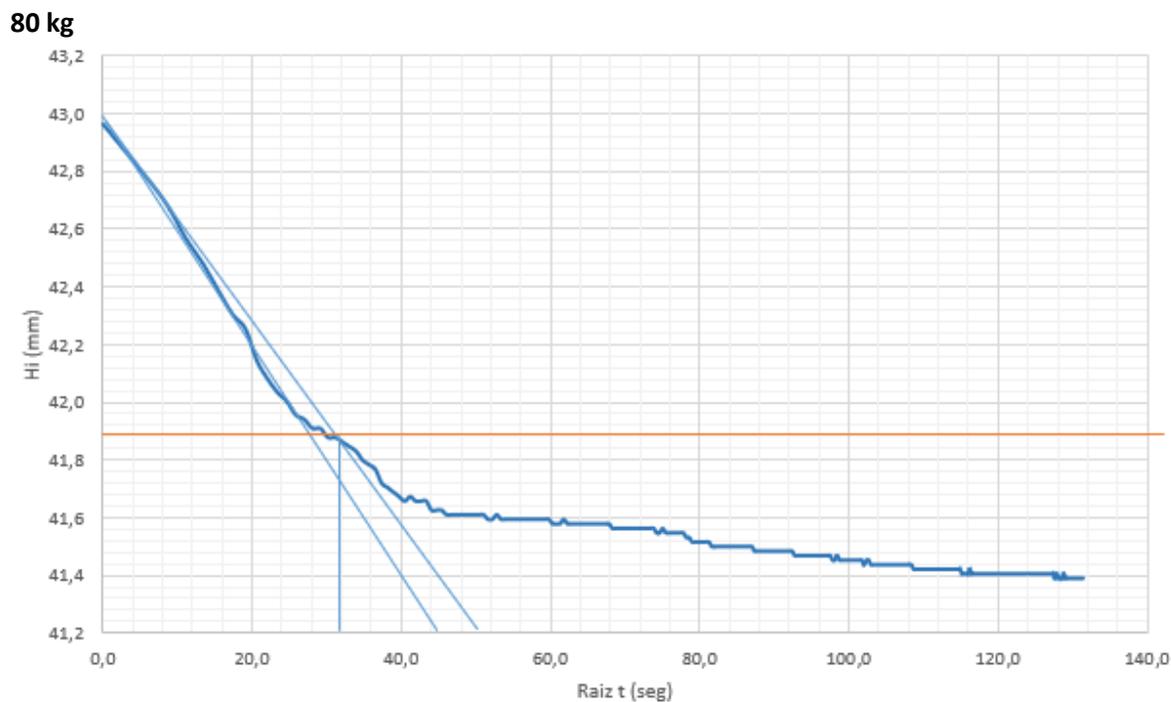
Gráfica 19 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 75C-25D carga 40kg

Tabla 41 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 75C-25D carga 40kg

Ho(mm)	52,50
ΔZ(mm)	1,92
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	40
ϵ_z	0,037
e_f	1,21
e_0	1,29
δ(kg/m²)	2352,9

Tabla 42 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 75C-25D carga 40kg

A	55
1.15A	63,25
Raíz t90	39
t90 seg	1521
H fin	46,61
H prom	49,5540265
Hdr	24,78
Tv	0,848
Cv(mm²/seg)	0,342



Grafica 20 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 75C-25D carga 80kg

Tabla 43 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 75C-25D carga 80kg

Ho(mm)	50,20
ΔZ(mm)	1,57
ω_f(%)	45,20%
Gs	2,517
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	80
ϵ_z	0,031
e_f	1,14
e_0	1,21
δ(kg/m²)	4705,9

Tabla 44 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 75C-25D carga 80kg

A	45
1.15A	51,75
Raíz t90	31
t90 seg	961
H fin	41,88
H prom	46,0421235
Hdr	23,02
Tv	0,848
Cv(mm²/seg)	0,468

Anexo 3.3 Resultado Consolidación 50C-50D

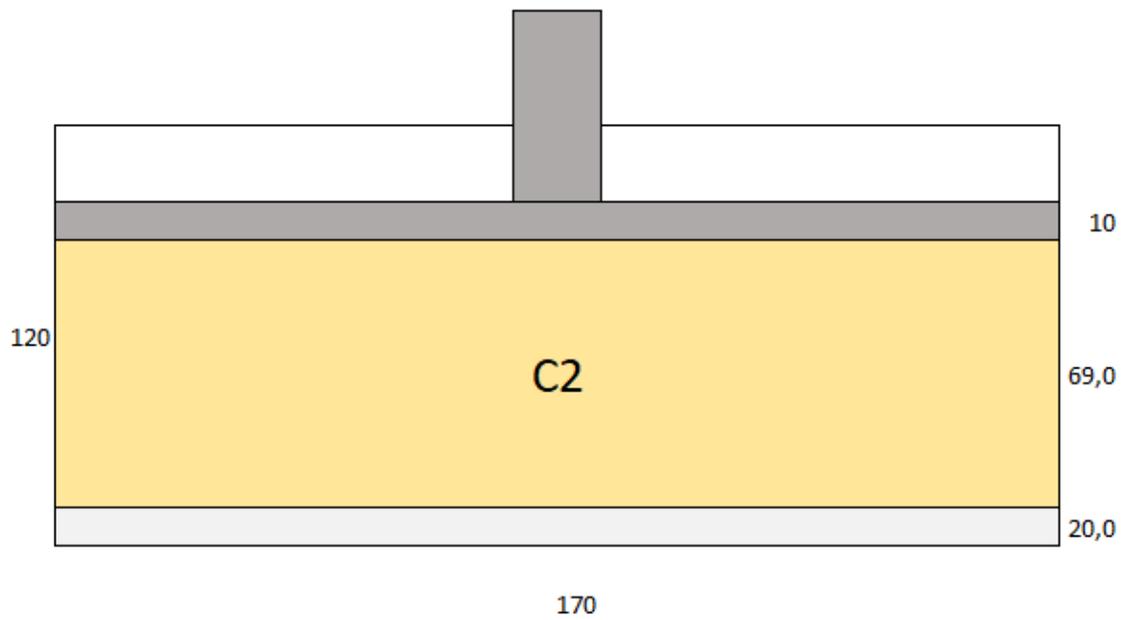


Figura 34 Modelo inicial de consolidación para 50C-50D

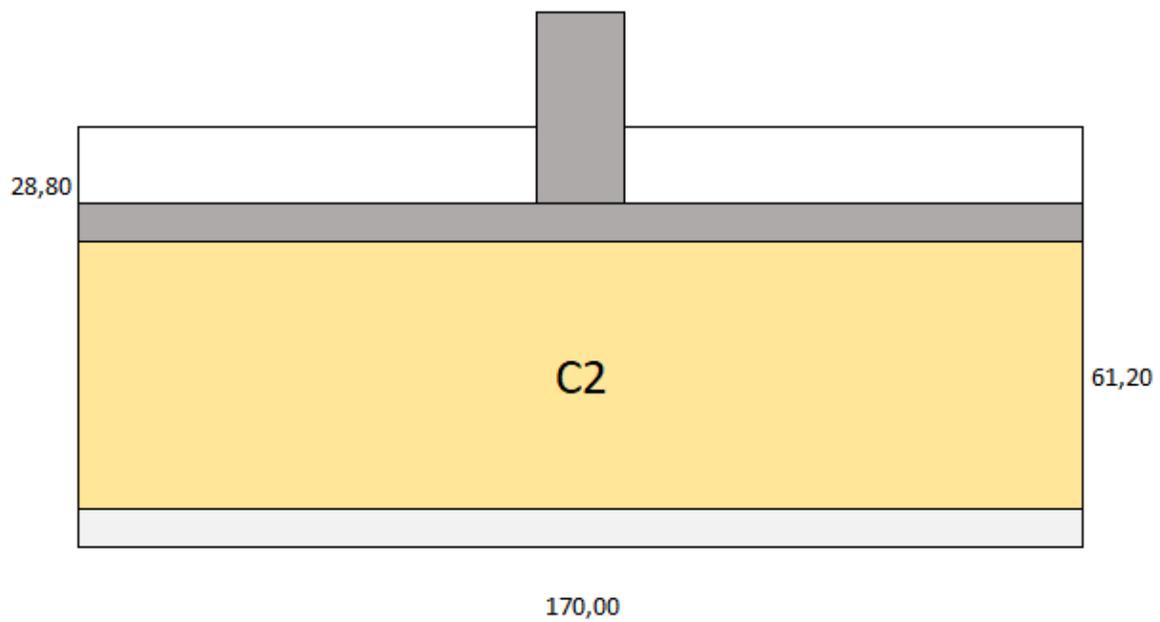
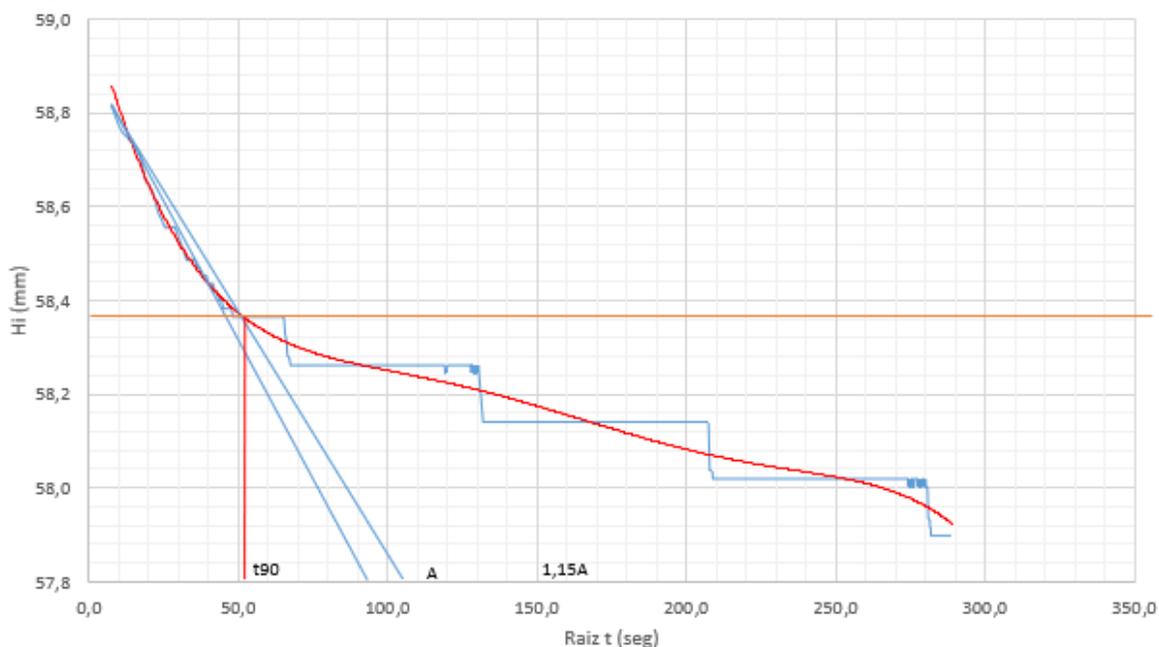


Figura 35 Modelo luego de recibir 7 kg de carga . 50C-50D

10 kg



Gráfica 21 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 50C-50D carga 10kg

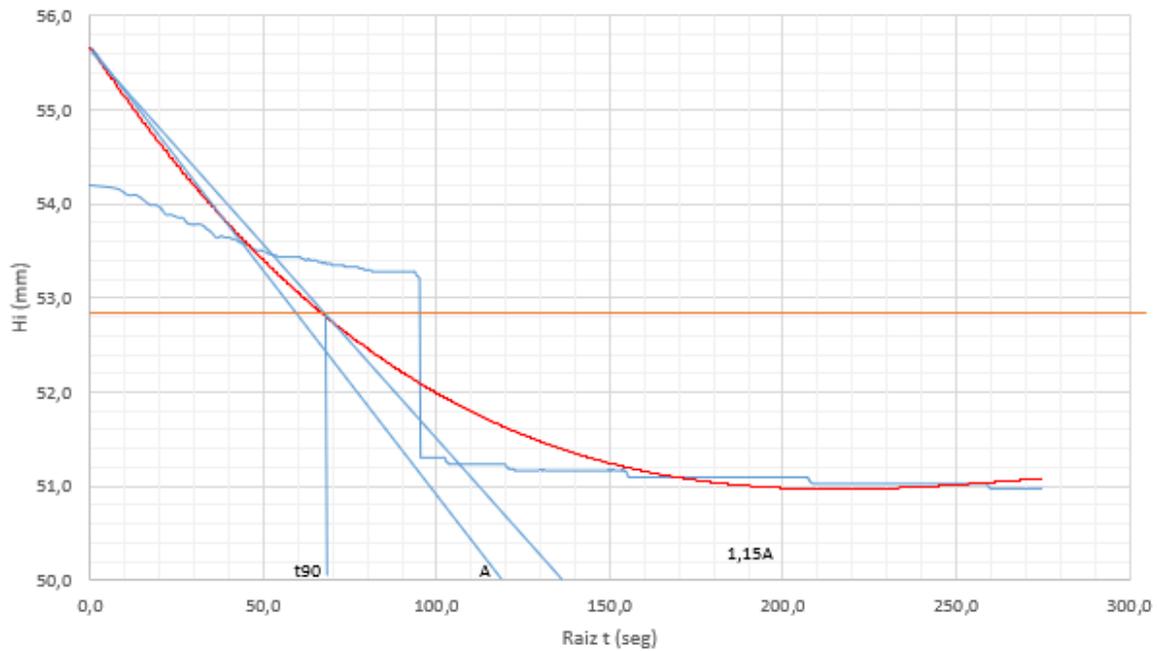
Tabla 45 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación.50C-50D carga 10kg

A	93
1.15A	106,95
Raíz t90	52
t90 seg	2704
H fin	58,36
H prom	59,78
Hdr	29,89
Tv	0,848
Cv(mm2/seg)	0,280

Tabla 46 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 50C-50D carga 10kg

Ho(mm)	61,20
ΔZ(mm)	0,92
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	10
ε_z	0,015
e_f	2,19
e₀	2,24
δ(kg/m²)	588,2

20kg



Gráfica 22 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 50C-50D carga 20kg

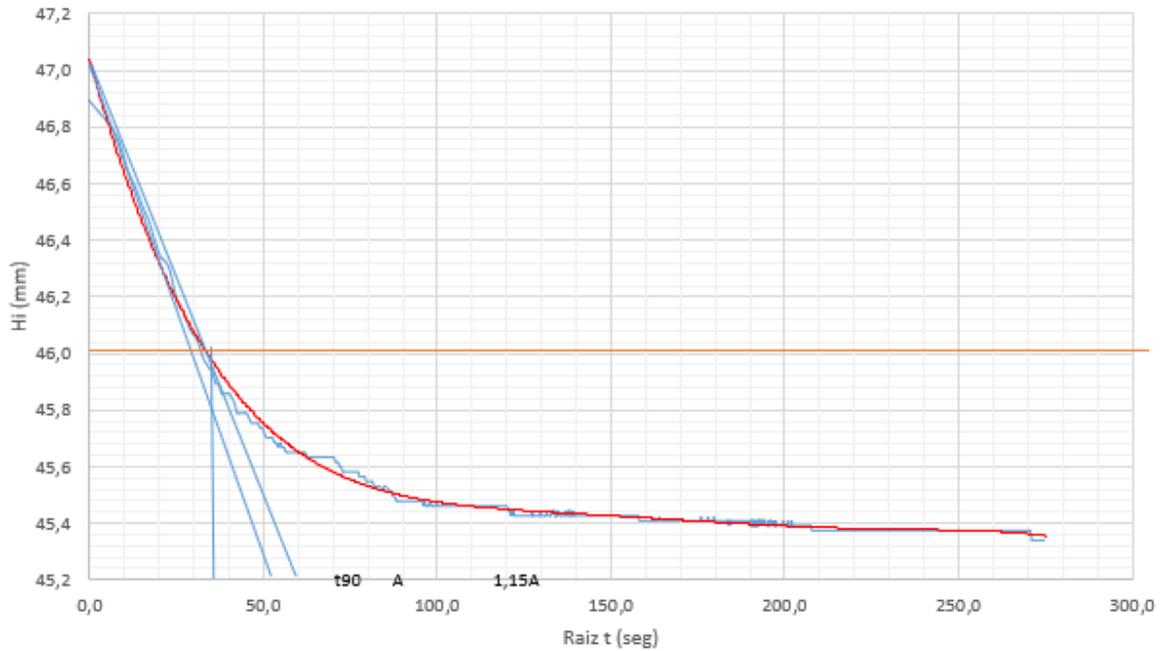
Tabla 47 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 50C-50D carga 20kg

A	118
1.15A	135,7
Raíz t90	68
t90 seg	4624
H fin	52,6
H prom	55,248423
Hdr	27,62
Tv	0,848
Cv(mm2/seg)	0,140

Tabla 48 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 50C-50D carga 20kg

Ho(mm)	57,90
ΔZ(mm)	3,25
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	20
ϵ_z	0,056
e_f	2,01
e_0	2,19
δ(kg/m²)	1176,5

40 kg



Grafica 23 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 50C-50D carga 40kg

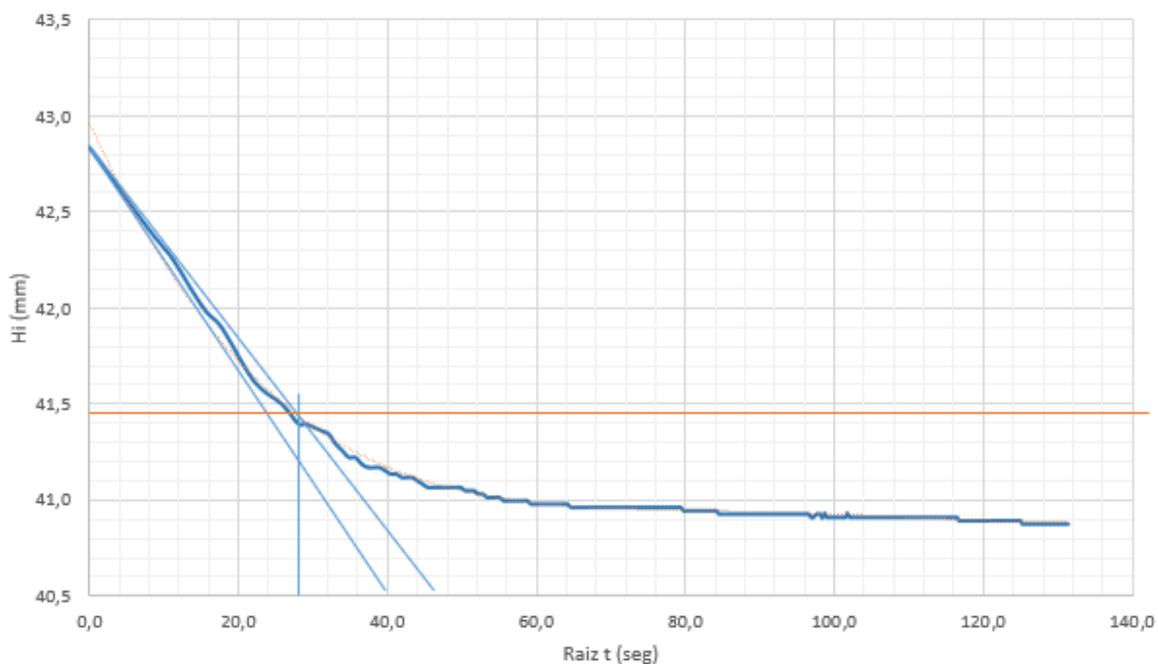
Tabla 49 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 50C-50D carga 40kg

A	52
1.15A	59,8
Raíz t90	36
t90 seg	1296
H fin	46
H prom	50,123906
Hdr	25,06
Tv	0,848
Cv(mm2/seg)	0,411

Tabla 50 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 50C-50D carga 40kg

Ho(mm)	54,25
ΔZ(mm)	1,63
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	40
ϵ_z	0,030
e_f	1,92
e_0	2,01
δ(kg/m²)	2352,9

80 kg



Gráfica 24 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 50C-50D carga 80kg

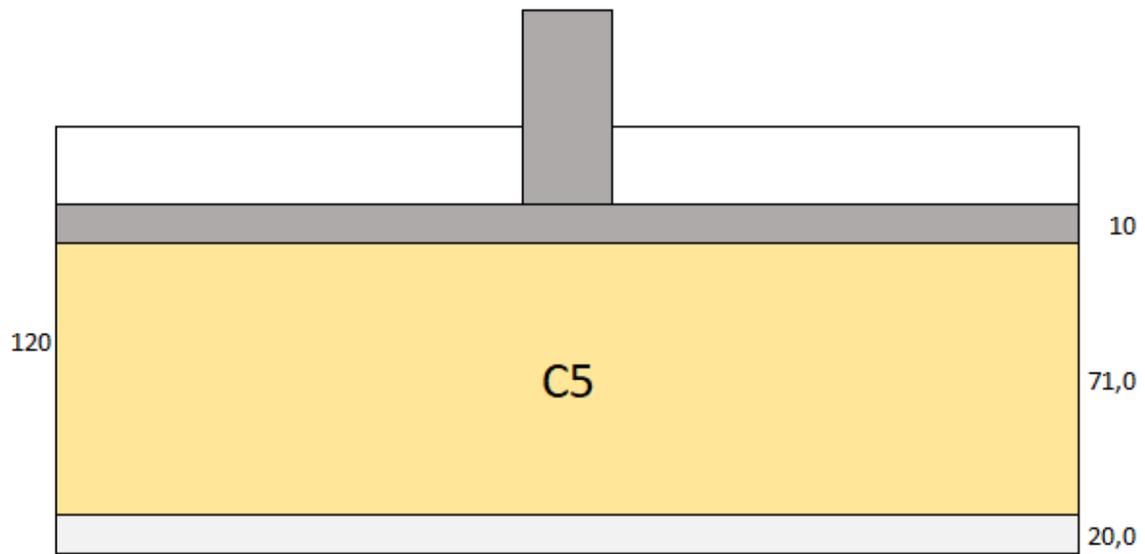
Tabla 51 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 50C-50D carga 80kg

A	40
1.15A	46
Raíz t90	28
t90 seg	784
H fin	41,45
H prom	46,837207
Hdr	23,42
Tv	0,848
Cv(mm2/seg)	0,593

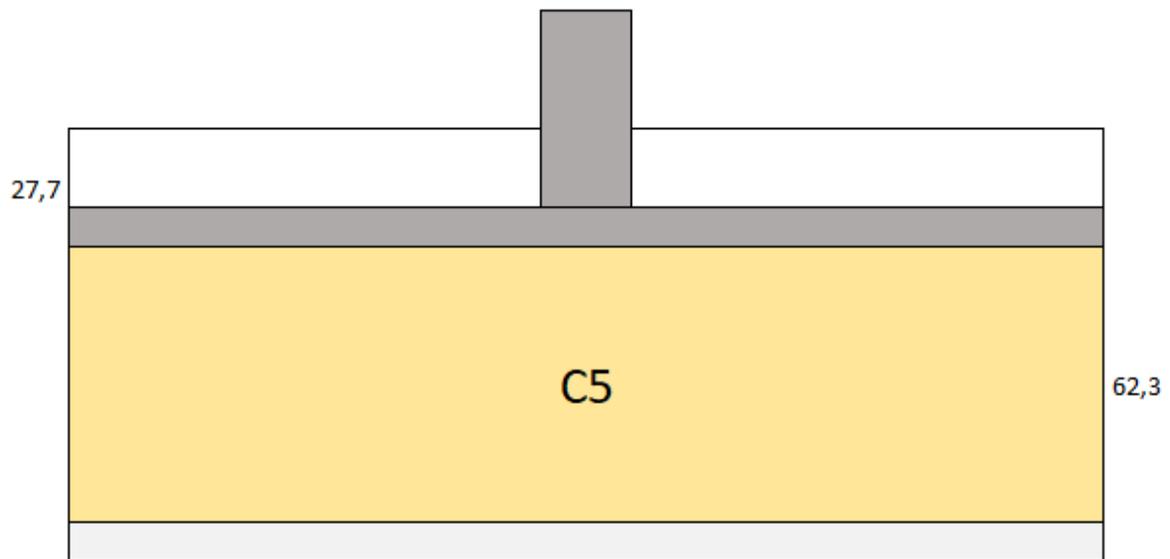
Tabla 52 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 50C-50D carga 80kg

Ho(mm)	52,22
ΔZ(mm)	1,95
ω_f(%)	73,15%
Gs	2,481
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	80
ε_z	0,037
e_f	1,81
e₀	1,92
δ(kg/m²)	4705,9

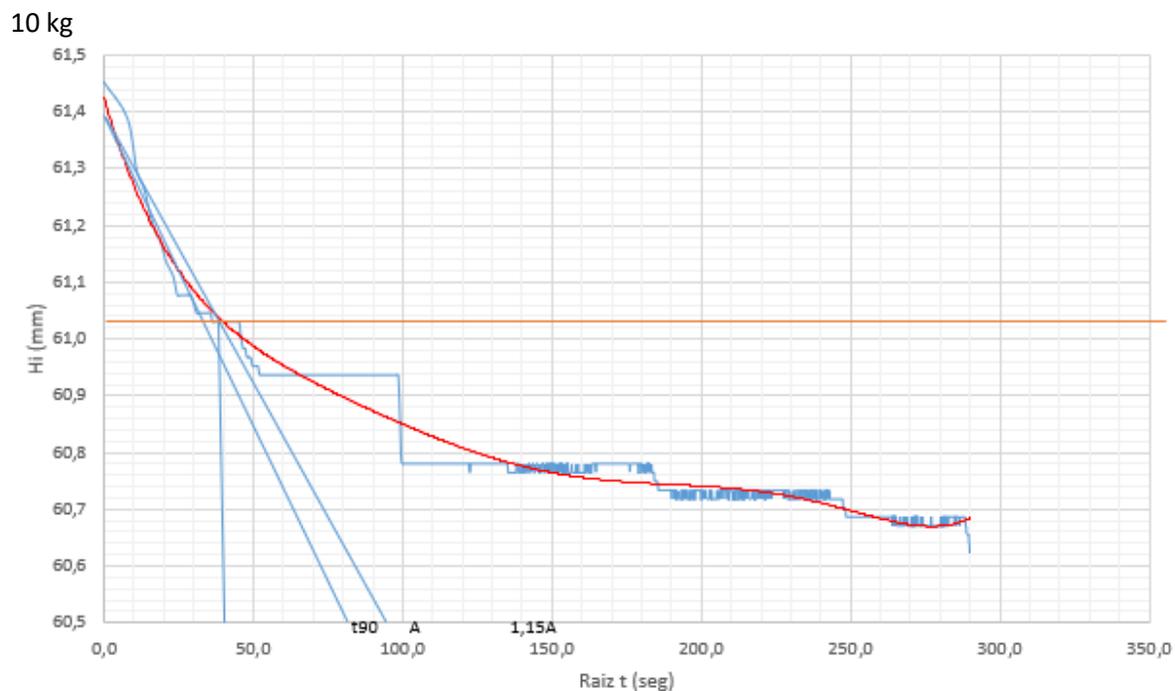
Anexo 3.4 Resultado Consolidación 25C-75D



170
Figura 36 Modelo inicial de consolidación para 25C-75D



170
Figura 37 Modelo luego de recibir 7 kg de carga



Grafica 25 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 25C-75D carga 10kg

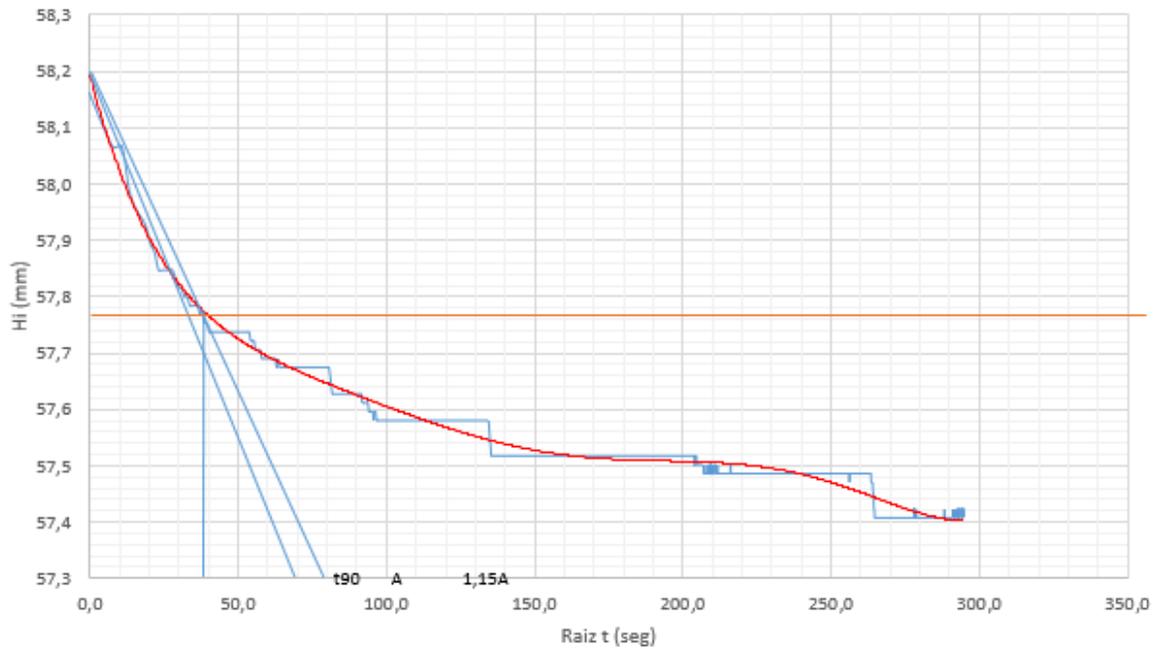
Tabla 53 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 25C-75D carga 10kg

A	82
1.15A	94,3
Raíz t90	40
t90 seg	1600
H fin	61,03
H prom	61,665
Hdr	30,83
Tv	0,848
Cv(mm2/seg)	0,504

Tabla 54 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 25C-75D carga 10kg

Ho(mm)	62,30
ΔZ(mm)	0,83
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	10
ϵ_z	0,013
e_f	2,71
e_0	2,76
δ(kg/m²)	588,2

20 kg



Gráfica 26 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 25C-75D carga 20kg

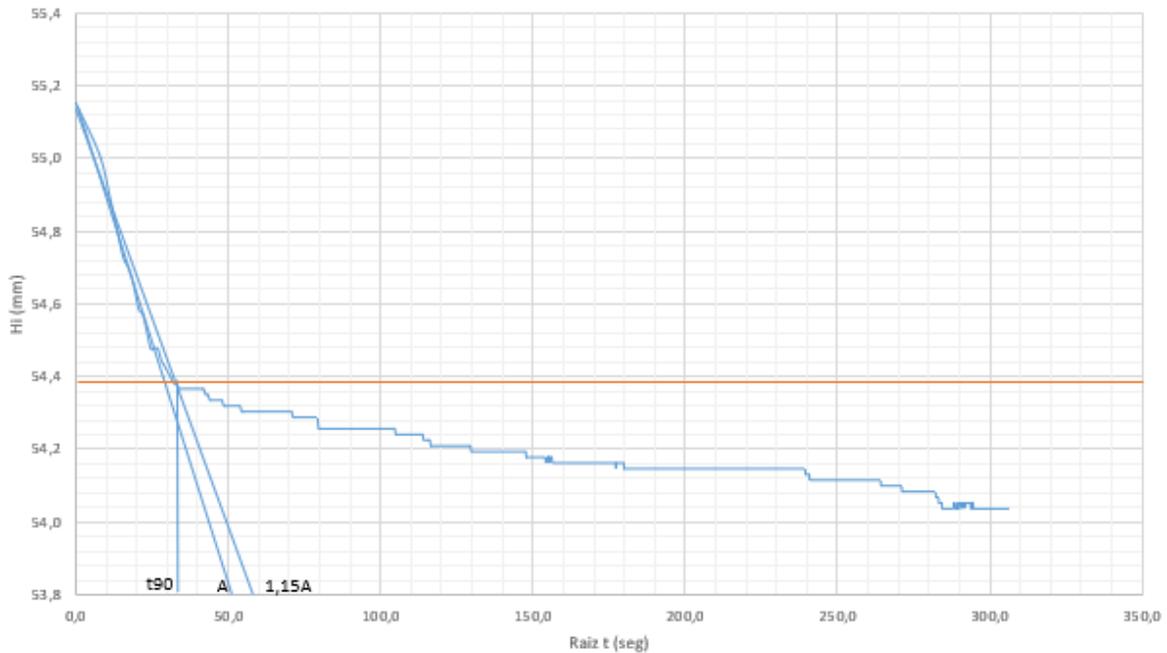
Tabla 55 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 25C-75D carga 20kg

A	69
1.15A	79,35
Raíz t90	38
t90 seg	1444
H fin	57,76
H prom	59,40284
Hdr	29,70
Tv	0,848
Cv(mm2/seg)	0,518

Tabla 56 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 25C-75D carga 20kg

Ho(mm)	61,05
ΔZ(mm)	0,75
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	20
ϵ_z	0,012
e_f	2,67
e_0	2,71
δ(kg/m²)	1176,5

40 kg



Gráfica 27 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 25C-75D carga 40kg

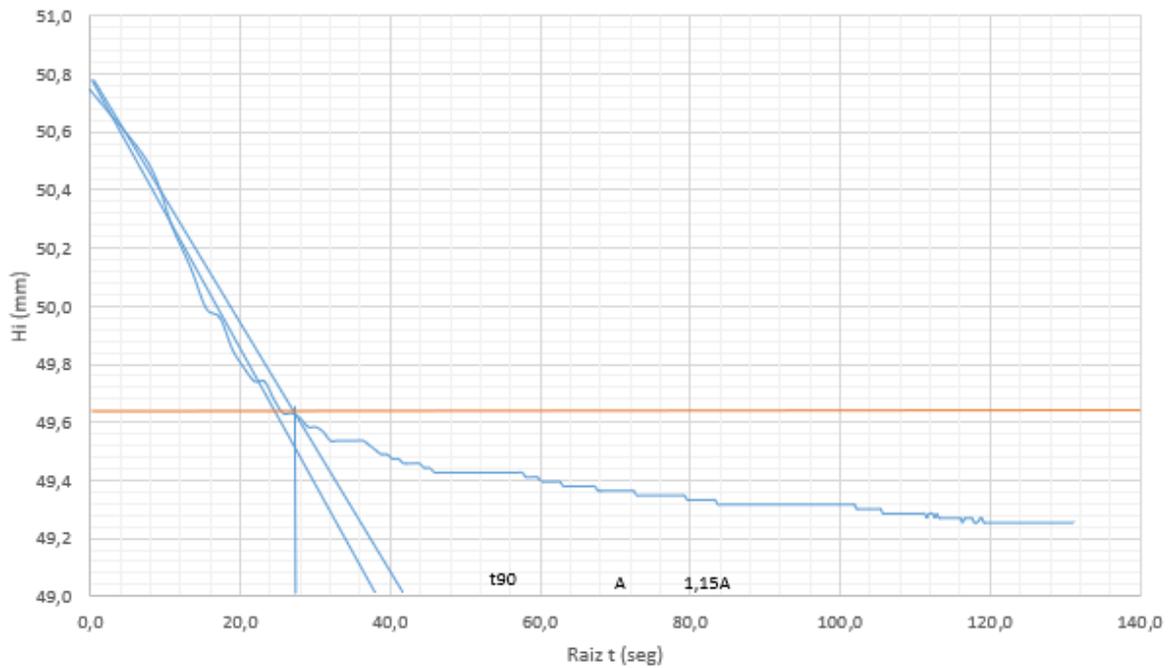
Tabla 57 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 25C-75D carga 40kg

A	50
1.15A	57,5
Raíz t90	33
t90 seg	1089
H fin	54,37
H prom	57,24
Hdr	28,62
Tv	0,848
Cv(mm2/seg)	0,638

Tabla 58 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 25C-75D carga 40kg

Ho(mm)	60,10
ΔZ(mm)	1,10
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	40
ϵ_z	0,018
e_f	2,60
e_0	2,67
δ(kg/m²)	2352,9

80 kg



Grafica 28 Método de Taylor para determinar 90% de consolidación. 25C-75D carga 80kg

Tabla 59 Datos para el cálculo del coeficiente de consolidación. 25C-75D carga 80kg

A	38
1.15A	43,7
Raíz t90	27
t90 seg	729
H fin	49,64
H prom	54,1747545
Hdr	27,09
Tv	0,848
Cv(mm2/seg)	0,853

Tabla 60 Datos para el cálculo de esfuerzo y relación de vacíos. 25C-75D carga 80kg

Ho(mm)	58,71
ΔZ(mm)	1,49
ω_f(%)	101,8%
Gs	2,464
Área(mm²)	0,017
Carga(kg)	80
ϵ_z	0,025
e_f	2,51
e_0	2,60
δ(kg/m²)	4705,9

Anexo 3.5 Registro Fotográfico

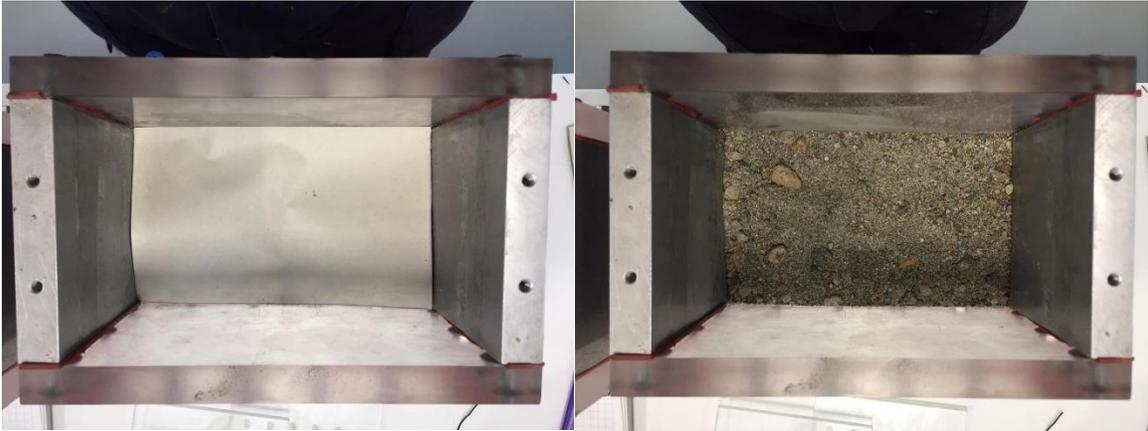


Figura 38 Cajas de consolidación con el papel filtro y arena



Figura 39 Arena y papel filtro encima del tubo



Figura 40 Mezcladora



Figura 41 forma de echar el material en la mezcladora



Figura 42 A la izquierda mezcla en proceso al lado derecho mezcla lista.



Figura 43 Mezcla lista vertida en las cajas de los Consolidómetros

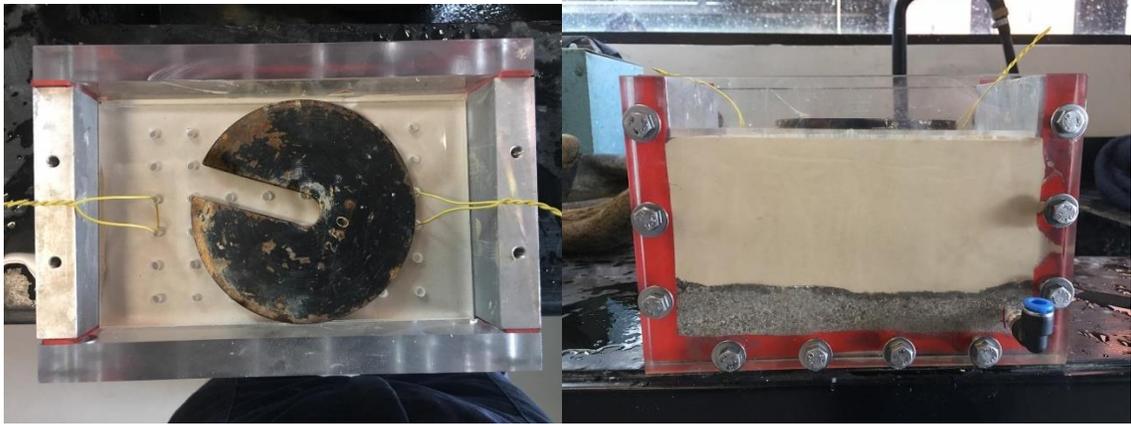


Figura 44 caja de consolidación con 250 g de carga

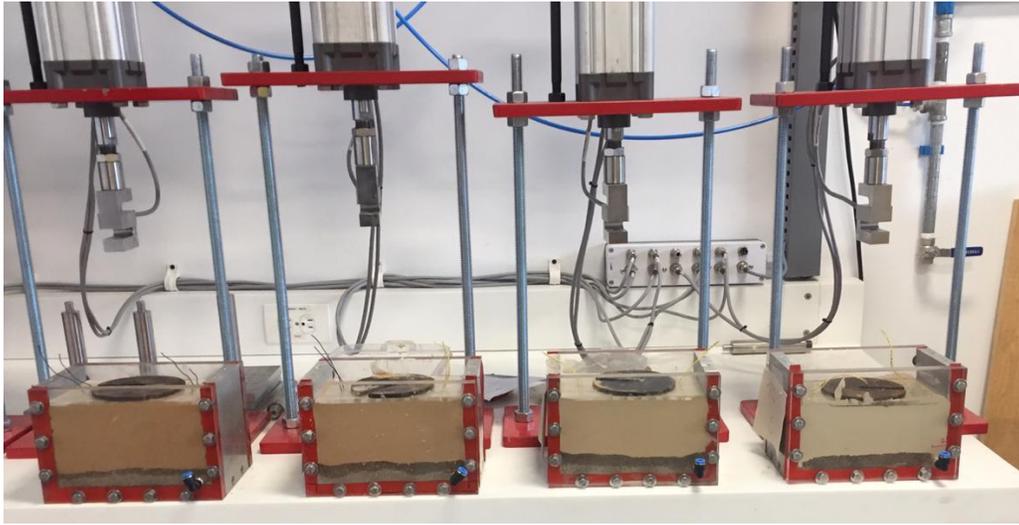


Figura 45 Cajas de consolidación con 500g de carga



Figura 46 caja de consolidación con 1 kg de carga

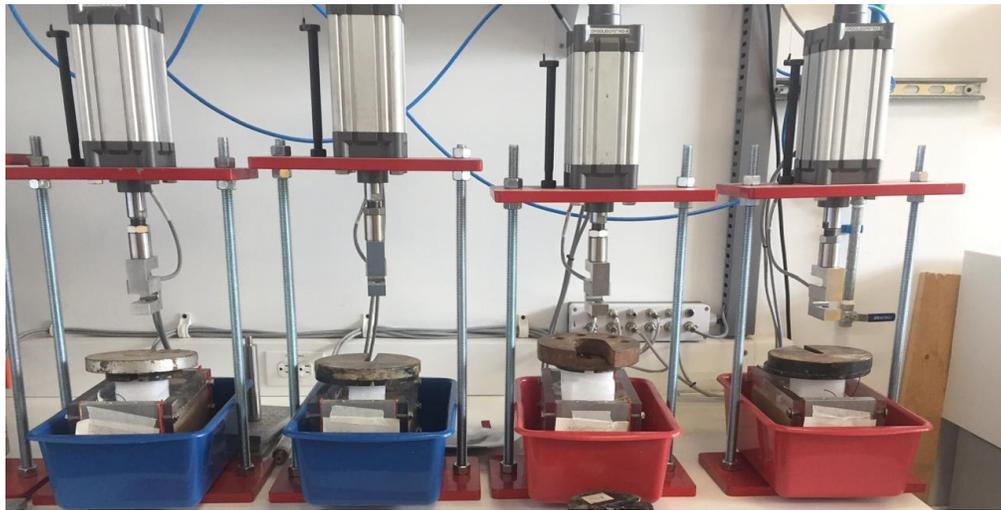


Figura 47 Cajas con 5 kg de carga



Figura 48 Cajas de consolidación con 7.5 kg de carga

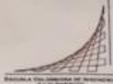


Figura 49 Consolidómetros Funcionando

Anexo 4 Gravedad Especifica

I.N.V.E - 128 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE LAS PARTÍCULAS , SOLIDAS DE LOS SUELOS Y DEL LLENANTE MINERAL EMPLEANDO UN PICNÓMETRO CON AGUA

Anexo 4.1 Calibración



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA
JULIO GARAVITO
LABORATORIO SUELOS Y PAVIMENTOS
GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS EMPLEANDO UN PICNÓMETRO
INV E - 128 -13



Empresa: Calibración picnometro ECI Fecha: 02/08/2018

Descripción del material: Picnometro #20

0). CALIBRACIÓN DEL PICNÓMETRO

No. ENSAYO (N)	1	2	3	4	5
No. PICNÓMETRO	3	3	3	3	3
M PICNÓMETRO (0,01g) (xi)	174,11	174,12	174,11	174,11	174,11
M _P PROMEDIO DEL PICNÓMETRO (0,01g) (MP)	174,11				
DM DESVIACION MASA DEL PICNÓMETRO (0,01g) <=0,02g	0,00				
M _{pw,c} PICNÓMETRO + AGUA A LA TEMPERATURA DE CALIBRACIÓN (0,1g)	672,21	672,31	672,89	672,84	672,87
T° CALIBRACIÓN DE PICNÓMETRO + AGUA (0,1°C)	23,4	21,4	16,6	16,4	16,8
P _{w,c} AGUA A LA TEMPERATURA DE CALIBRACIÓN (g/cm³)	0,99745	0,99791	0,99885	0,99888	0,99881
V CALIBRADO DEL PICNÓMETRO (cm³)	499,37	499,24	499,35	499,29	499,35
V PROMEDIO DEL PICNÓMETRO (0,01g) (Mpp)	499,32				
DM DESVIACION MASA DEL PICNÓMETRO (0,01g) <=0,05cm³	0,05				

llenar este valor en el formato de entrega de datos

Cumple ✓ llenar este valor en el formato de entrega de datos

1). DETERMINACION DEL METODO

Metodo A (preferido)	Metodo B
Muestras húmedas	Muestras secas

2) CALCULO DE LA MASA METODO A

MASA SECA RECOMENDADA METODO A Y B (Ws) (g)		
TIPO DE SUELO	PICNÓMETRO 250 ml	PICNÓMETRO 500 ml
SP, SP-SM	60 ± 10	100 ± 10
SP-SC, SM, SC	45 ± 10	75 ± 10
LIMO O ARCILLA	35 ± 5	50 ± 10

CÁLCULO DE HUMEDAD METODO A

No. PLATÓN	
M PLATÓN (M _p) (1g)	
M PLATÓN + SUELO HÚMEDO (M _h) (1g)	
M PLATÓN + SUELO SECO (M _s) (1g)	
HUMEDAD INICIAL (W _{fe}) (0,1%)	$W_s = \frac{M_h - M_p}{M_s} \cdot 100$
M SECA PARA EL ENSAYO (M _{fi}) (g)	$M_s = (1 + W_s) \cdot M_p$

3) ENSAYO

METODO	
No. PICNÓMETRO	
M PICNÓMETRO M = ±0,06g (MP) (0,1g)	
M _{pw,c} PICNÓMETRO + AGUA + SUELO (0,1g)	
T ENSAYO (0,1°C)	

4) MASA DEL SUELO SECO

No. PLATÓN	
M _s PLATÓN (0,01g)	
M _s PLATÓN + SUELO SECO (0,01g)	
M SUELO SECO (0,01g)	$M_s - M_p$

Observaciones:

Valores densidad del agua					
T(°C)	Dens (g/cm³)	T(°C)	Dens (g/cm³)	T(°C)	Dens (g/cm³)
18	0,9981	20,4	0,99822	22,7	0,99847
18,1	0,99806	20,5	0,99817	22,8	0,99844
18,2	0,99801	20,6	0,99808	22,9	0,99841
18,3	0,99796	20,7	0,99804	23	0,99838
18,4	0,99791	20,8	0,99801	23,1	0,99835
18,5	0,99786	20,9	0,99797	23,2	0,99832
18,6	0,99781	21	0,99793	23,3	0,99829
18,7	0,99776	21,1	0,99789	23,4	0,99826
18,8	0,99771	21,2	0,99785	23,5	0,99823
18,9	0,99766	21,3	0,99781	23,6	0,9982
19	0,99761	21,4	0,99777	23,7	0,99817
19,1	0,99756	21,5	0,99773	23,8	0,99814
19,2	0,99751	21,6	0,99769	23,9	0,99811
19,3	0,99746	21,7	0,99765	24	0,99808
19,4	0,99741	21,8	0,99761	24,1	0,99805
19,5	0,99736	21,9	0,99757	24,2	0,99802
19,6	0,99731	22	0,99753	24,3	0,99799
19,7	0,99726	22,1	0,99749	24,4	0,99796
19,8	0,99721	22,2	0,99745	24,5	0,99793
19,9	0,99716	22,3	0,99741	24,6	0,9979
20	0,99711	22,4	0,99737	24,7	0,99787
20,1	0,99706	22,5	0,99733	24,8	0,99784
20,2	0,99701	22,6	0,99729	24,9	0,99781
20,3	0,99696	22,7	0,99725	25	0,99778
20,4	0,99691	22,8	0,99721	25,1	0,99775
20,5	0,99686	22,9	0,99717	25,2	0,99772
20,6	0,99681	23	0,99713	25,3	0,99769
20,7	0,99676	23,1	0,99709	25,4	0,99766
20,8	0,99671	23,2	0,99705	25,5	0,99763
20,9	0,99666	23,3	0,99701	25,6	0,9976
21	0,99661	23,4	0,99697	25,7	0,99757
21,1	0,99656	23,5	0,99693	25,8	0,99754
21,2	0,99651	23,6	0,99689	25,9	0,99751
21,3	0,99646	23,7	0,99685	26	0,99748
21,4	0,99641	23,8	0,99681	26,1	0,99745
21,5	0,99636	23,9	0,99677	26,2	0,99742
21,6	0,99631	24	0,99673	26,3	0,99739
21,7	0,99626	24,1	0,99669	26,4	0,99736
21,8	0,99621	24,2	0,99665	26,5	0,99733
21,9	0,99616	24,3	0,99661	26,6	0,9973
22	0,99611	24,4	0,99657	26,7	0,99727
22,1	0,99606	24,5	0,99653	26,8	0,99724
22,2	0,99601	24,6	0,99649	26,9	0,99721
22,3	0,99596	24,7	0,99645	27	0,99718
22,4	0,99591	24,8	0,99641	27,1	0,99715
22,5	0,99586	24,9	0,99637	27,2	0,99712
22,6	0,99581	25	0,99633	27,3	0,99709
22,7	0,99576	25,1	0,99629	27,4	0,99706
22,8	0,99571	25,2	0,99625	27,5	0,99703
22,9	0,99566	25,3	0,99621	27,6	0,997
23	0,99561	25,4	0,99617	27,7	0,99697
23,1	0,99556	25,5	0,99613	27,8	0,99694
23,2	0,99551	25,6	0,99609	27,9	0,99691
23,3	0,99546	25,7	0,99605	28	0,99688
23,4	0,99541	25,8	0,99601	28,1	0,99685
23,5	0,99536	25,9	0,99597	28,2	0,99682
23,6	0,99531	26	0,99593	28,3	0,99679
23,7	0,99526	26,1	0,99589	28,4	0,99676
23,8	0,99521	26,2	0,99585	28,5	0,99673
23,9	0,99516	26,3	0,99581	28,6	0,9967
24	0,99511	26,4	0,99577	28,7	0,99667
24,1	0,99506	26,5	0,99573	28,8	0,99664
24,2	0,99501	26,6	0,99569	28,9	0,99661
24,3	0,99496	26,7	0,99565	29	0,99658
24,4	0,99491	26,8	0,99561	29,1	0,99655
24,5	0,99486	26,9	0,99557	29,2	0,99652
24,6	0,99481	27	0,99553	29,3	0,99649
24,7	0,99476	27,1	0,99549	29,4	0,99646
24,8	0,99471	27,2	0,99545	29,5	0,99643
24,9	0,99466	27,3	0,99541	29,6	0,9964
25	0,99461	27,4	0,99537	29,7	0,99637
25,1	0,99456	27,5	0,99533	29,8	0,99634
25,2	0,99451	27,6	0,99529	29,9	0,99631
25,3	0,99446	27,7	0,99525	30	0,99628
25,4	0,99441	27,8	0,99521	30,1	0,99625
25,5	0,99436	27,9	0,99517	30,2	0,99622
25,6	0,99431	28	0,99513	30,3	0,99619
25,7	0,99426	28,1	0,99509	30,4	0,99616
25,8	0,99421	28,2	0,99505	30,5	0,99613
25,9	0,99416	28,3	0,99501	30,6	0,9961
26	0,99411	28,4	0,99497	30,7	0,99607
26,1	0,99406	28,5	0,99493	30,8	0,99604
26,2	0,99401	28,6	0,99489	30,9	0,99601
26,3	0,99396	28,7	0,99485	31	0,99598

Figura 50 Datos de Calibración para picnómetro 20

0). CALIBRACIÓN DEL PICNÓMETRO

No. ENSAYO (N)	1	2	3	4	5
No. PICNÓMETRO	3	3	3	3	3
M _{PICNÓMETRO} (0,01g) (xi)	143,24	143,24	143,24	143,24	143,24
M _P PROMEDIO DEL PICNÓMETRO (0,01g) (MP)	143,24				
DM DESVIACION MASA DEL PICNÓMETRO (0,01g) <=0,02g	0,00				
M _{PW,C} PICNÓMETRO + AGUA A LA TEMPERATURA DE CALIBRACIÓN (0,1g)	641,53	641,63	642,24	642,25	642,22
T° CALIBRACIÓN DE PICNÓMETRO + AGUA (0,1°C)	23,4	21,4	16,6	16,4	16,8
P _{W,C} AGUA A LA TEMPERATURA DE CALIBRACIÓN (g/cm³)	0,99745	0,99791	0,99885	0,99888	0,99881
V CALIBRADO DEL PICNÓMETRO (cm³)	499,56	499,43	499,57	499,57	499,57
V PROMEDIO DEL PICNÓMETRO (0,01g) (Mpp)	499,54				
DM DESVIACION MASA DEL PICNÓMETRO (0,01g) <=0,05cm³	0,05				

Reisar este valor en el formato de entrega de datos

Cumple

Reisar este valor en el formato de entrega de datos

1). DETERMINACION DEL METODO

Metodo A (preferido)	Metodo B
Muestras húmedas	Muestras secas

2) CALCULO DE LA MASA METODO A

MASA SECA RECOMENDADA METODO A Y B (Ws) (g)		
TIPO DE SUELO	PICNOMETRO 250 ml	PICNOMETRO 500 ml
SP, SP-SM	60 ± 10	100 ± 10
SP-SC, SM, SC	45 ± 10	75 ± 10
LIMO O ARCILLA	35 ± 5	50 ± 10

CÁLCULO DE HUMEDAD METODO A

No. PLATÓN	
M _{PLATÓN} (M _p) (1g)	
M _{PLATÓN + SUELO HÚMEDO} (M _h) (1g)	
M _{PLATÓN + SUELO SECO} (M _s) (1g)	
HUMEDAD INICIAL (W _e) (0,1%)	$\frac{M_h - M_p}{M_s - M_p} \cdot 100$
M SECA PARA EL ENSAYO (M _{fi}) (g)	$W_s + (1 + W_e)M_p$

3) ENSAYO

METODO	
No. PICNÓMETRO	
M _{PICNÓMETRO} M = ±0,06g MP (0,1g)	
M _{PW,S} PICNÓMETRO + AGUA + SUELO (0,1g)	
T _{ENSAYO} (0,1°C)	

4) MASA DEL SUELO SECO

No. PLATÓN	
M _s PLATÓN (0,01g)	
M _s PLATÓN + SUELO SECO (0,01g)	
M SUELO SECO (0,01g)	$M_s - M_p$

Valores densidad del agua

T(°C)	D _{4°C(20-30)}	T(°C)	D _{4°C(20-30)}	T(°C)	D _{4°C(20-30)}
18	0,99921	20,4	0,99812	23,7	0,99697
18,1	0,99920	20,5	0,99811	23,8	0,99694
18,2	0,99919	20,6	0,99810	23,9	0,99691
18,3	0,99918	20,7	0,99809	24	0,99688
18,4	0,99917	20,8	0,99808	24,1	0,99685
18,5	0,99916	20,9	0,99807	24,2	0,99682
18,6	0,99915	21	0,99806	24,3	0,99679
18,7	0,99914	21,1	0,99805	24,4	0,99676
18,8	0,99913	21,2	0,99804	24,5	0,99673
18,9	0,99912	21,3	0,99803	24,6	0,99670
19	0,99911	21,4	0,99802	24,7	0,99667
19,1	0,99910	21,5	0,99801	24,8	0,99664
19,2	0,99909	21,6	0,99800	24,9	0,99661
19,3	0,99908	21,7	0,99799	25	0,99658
19,4	0,99907	21,8	0,99798	25,1	0,99655
19,5	0,99906	21,9	0,99797	25,2	0,99652
19,6	0,99905	22	0,99796	25,3	0,99649
19,7	0,99904	22,1	0,99795	25,4	0,99646
19,8	0,99903	22,2	0,99794	25,5	0,99643
19,9	0,99902	22,3	0,99793	25,6	0,99640
20	0,99901	22,4	0,99792	25,7	0,99637
20,1	0,99900	22,5	0,99791	25,8	0,99634
20,2	0,99899	22,6	0,99790	25,9	0,99631
20,3	0,99898	22,7	0,99789	26	0,99628
20,4	0,99897	22,8	0,99788	26,1	0,99625
20,5	0,99896	22,9	0,99787	26,2	0,99622
20,6	0,99895	23	0,99786	26,3	0,99619
20,7	0,99894	23,1	0,99785	26,4	0,99616
20,8	0,99893	23,2	0,99784	26,5	0,99613
20,9	0,99892	23,3	0,99783	26,6	0,99610
21	0,99891	23,4	0,99782	26,7	0,99607
21,1	0,99890	23,5	0,99781	26,8	0,99604
21,2	0,99889	23,6	0,99780	26,9	0,99601
21,3	0,99888	23,7	0,99779	27	0,99598
21,4	0,99887	23,8	0,99778	27,1	0,99595
21,5	0,99886	23,9	0,99777	27,2	0,99592
21,6	0,99885	24	0,99776	27,3	0,99589
21,7	0,99884	24,1	0,99775	27,4	0,99586
21,8	0,99883	24,2	0,99774	27,5	0,99583
21,9	0,99882	24,3	0,99773	27,6	0,99580
22	0,99881	24,4	0,99772	27,7	0,99577
22,1	0,99880	24,5	0,99771	27,8	0,99574
22,2	0,99879	24,6	0,99770	27,9	0,99571
22,3	0,99878	24,7	0,99769	28	0,99568
22,4	0,99877	24,8	0,99768	28,1	0,99565
22,5	0,99876	24,9	0,99767	28,2	0,99562
22,6	0,99875	25	0,99766	28,3	0,99559
22,7	0,99874	25,1	0,99765	28,4	0,99556
22,8	0,99873	25,2	0,99764	28,5	0,99553
22,9	0,99872	25,3	0,99763	28,6	0,99550
23	0,99871	25,4	0,99762	28,7	0,99547
23,1	0,99870	25,5	0,99761	28,8	0,99544
23,2	0,99869	25,6	0,99760	28,9	0,99541
23,3	0,99868	25,7	0,99759	29	0,99538
23,4	0,99867	25,8	0,99758	29,1	0,99535
23,5	0,99866	25,9	0,99757	29,2	0,99532
23,6	0,99865	26	0,99756	29,3	0,99529
23,7	0,99864	26,1	0,99755	29,4	0,99526
23,8	0,99863	26,2	0,99754	29,5	0,99523
23,9	0,99862	26,3	0,99753	29,6	0,99520
24	0,99861	26,4	0,99752	29,7	0,99517
24,1	0,99860	26,5	0,99751	29,8	0,99514
24,2	0,99859	26,6	0,99750	29,9	0,99511
24,3	0,99858	26,7	0,99749	30	0,99508
24,4	0,99857	26,8	0,99748	30,1	0,99505
24,5	0,99856	26,9	0,99747	30,2	0,99502
24,6	0,99855	27	0,99746	30,3	0,99499
24,7	0,99854	27,1	0,99745	30,4	0,99496
24,8	0,99853	27,2	0,99744	30,5	0,99493
24,9	0,99852	27,3	0,99743	30,6	0,99490
25	0,99851	27,4	0,99742	30,7	0,99487
25,1	0,99850	27,5	0,99741	30,8	0,99484
25,2	0,99849	27,6	0,99740	30,9	0,99481
25,3	0,99848	27,7	0,99739	31	0,99478

Observaciones:

Figura 51 Datos de Calibración de picnómetro 4

Anexo 4.2 25C – 75D

Tabla 61 Datos y cálculo de la gravedad específica para 25C-75D

Calibración Picnómetro	
No Ensayo	75D
No Picnómetro	4
M picnómetro(g)	143,24
V calibrado de picnómetro (cm ³)	499,54

Datos del ensayo	
No Ensayo	75D
No Picnómetro	4
M picnómetro + Agua (g)	641,76
M picnómetro + Agua + Suelo (g)	669,53
T ensayo (°C)	21,2
ρ Agua a temperatura de ensayo (g/cm ³)	0,99795
Coeficiente de corrección	0,99974
No Platón	75
M Platón (g)	107,55
M Platón + Suelo Seco (g)	165,62
Gs Temperatura de Ensayo	1,2015
Gs 20 °C	1,2012

Anexo 4.3 50C – 50D

Tabla 62 Datos y cálculo de la gravedad específica para 50C-50D

Calibración Picnómetro	
No Ensayo	50D
No Picnómetro	4
M picnómetro(g)	143,24
V calibrado de picnómetro (cm ³)	499,54

Datos del ensayo	
No Ensayo	50D
No Picnómetro	4
M picnómetro + Agua (g)	641,67
M picnómetro + Agua + Suelo (g)	670,13
T ensayo (°C)	22
ρ Agua a temperatura de ensayo (g/cm ³)	0,99777
Coeficiente de corrección	0,99957
No Platón	50
M Platón (g)	117,95
M Platón + Suelo Seco (g)	154,29
Gs Temperatura de Ensayo	1,2262
Gs 20 °C	1,2257

Anexo 4.4 75C – 25D

Tabla 63 Datos y cálculo de la gravedad específica para 75C-25D

Calibración Picnómetro	
No Ensayo	25D
No Picnómetro	20
M picnómetro(g)	174,11
V calibrado de picnómetro (cm ³)	499,32

Datos del ensayo	
No Ensayo	25D
No Picnómetro	20
M picnómetro + Agua (g)	672,34
M picnómetro + Agua + Suelo (g)	701,06
T ensayo (°C)	21,8
ρ Agua a temperatura de ensayo (g/cm ³)	0,99782
Coefficiente de corrección	0,99961
No Platón	25
M Platón (g)	106,24
M Platón + Suelo Seco (g)	153,88
Gs Temperatura de Ensayo	1,2295
Gs 20 °C	1,2290

Anexo 4.5 Registro Fotografico



Figura 52 Picnómetro con embudo para echar el agua y el suelo



Figura 53 Picnómetro con el material listo para bombear y sacar el aire

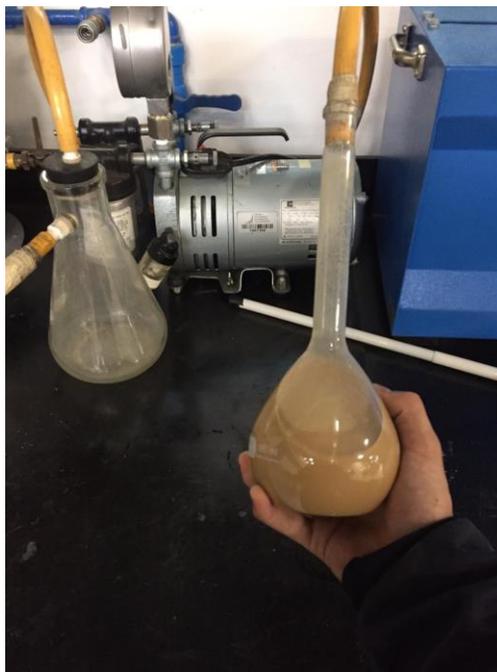


Figura 54 Sacando las partículas de aire de la muestra



Figura 55 Picnómetro, atomizador y embudo



Figura 56 Muestra después de que sale del horno

Anexo 5 Centrifuga

Anexo 5.1 Registro Fotográfico



Figura 57 Centrifuga de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

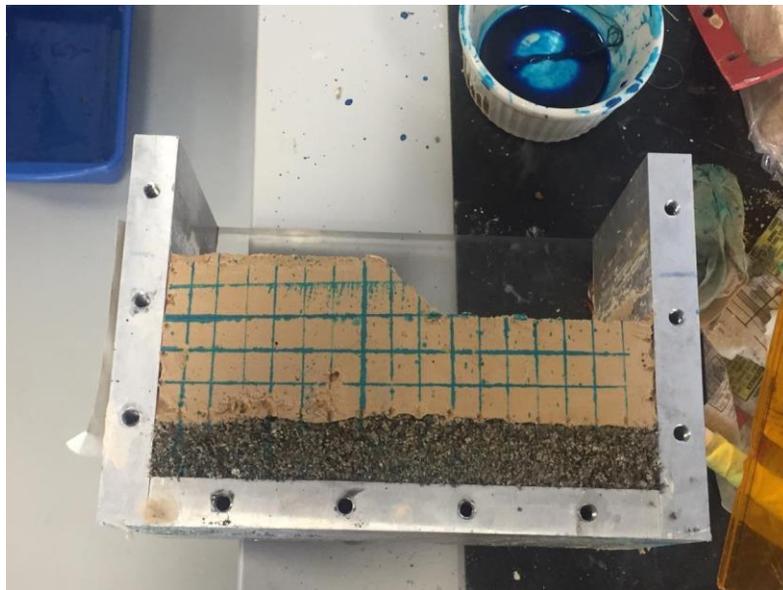


Figura 58 Marcando las Líneas en el modelo



Figura 59 Modelo dentro de la cámara de la centrifuga de la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito