DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ

LINA MARIA GOMEZ RIVEROS

SERGIO IVAN PEDREROS GONZALEZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLOGICA

INGENIERIA CIVIL

BOGOTA D.C

2019

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ

LINA MARIA GOMEZ RIVEROS

SERGIO IVAN PEDREROS GONZALEZ

Monografía para optar por el grado de: Ingeniero Civil

Tutor: Hernando A. Villota Posso

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLOGICA

INGENIERIA CIVIL

BOGOTA D.C

2019

TABLA DE CONTENIDO

RAE 10

INTRODUCCION 11

CAPITULO I 14

1 JUSTIFICACIÓN 14

2 FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA 16

3 OBJETIVOS 17

3.1 OBJETIVO GENERAL 17

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17

CAPITULO II 18

1 MARCO TEÓRICO 18

1.1 BASE TEÓRICA 18

1.1.1 Límites de consistencia 18

1.1.1.1 Límite líquido (LL) 18

1.1.1.2 Límite plástico (LP) 18

1.1.1.3 Límite de contracción (LC) 19

1.1.2 Índice de plasticidad (IP) 19

1.1.3 Índice de liquidez (IL) 20

1.1.4 Química de arcillas y minerales arcillosos 20

1.1.5 Actividad 21

1.1.6 Principio de esfuerzo efectivo 22

1.1.6.1 Saturación de suelos 22

1.1.7 Deformaciones del suelo 22

1.1.7.1 Elástica 23

1.1.7.2 Plástica 23

1.1.7.3 Compresiva 23
1.1.8 Consolidación 23
1.1.8.1 Primaria 23
1.1.8.2 Secundaria 24
1.1.9 Presión de pre consolidación (σ'_c) 25
1.1.10 Arcillas normalmente consolidadas 25
1.1.11 Arcillas pre consolidadas 25
1.1.12 Arcillas sobreconsolidadas 26
1.1.13 Tasa de consolidación 26
1.1.14 Prueba de consolidación unidimensional en el laboratorio 27
1.1.15 Graficas de presión – relación de vacíos 27
1.1.16 Coeficiente de compresibilidad (a_v) 29
1.1.17 Coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v) 30
1.1.18 Índice de compresión (Cc) 32
1.1.18.1 Correlaciones del Cc 32
1.1.19 Coeficiente de consolidación (Cv) 34
1.1.19.1 Cálculo del coeficiente de consolidación 34
1.1.20 Cálculo de asentamientos por consolidación 35
1.1.21 Consolidación y permeabilidad k del suelo compresible 36
1.1.22 Velocidad de consolidación 36
1.2 ANTECEDENTES 38
CAPITULO III 40
1 METODOLOGÍA 40
1.1 Etapa I 40
1.2 Etapa II 40

1.2.1 Método del logaritmo del tiempo 41
1.2.2 Método de la raíz cuadrada del tiempo 42
1.2.3 Método computacional 43
1.2.4 Correlaciones empíricas 44
1.2.5 Método de correlación con el coeficiente de permeabilidad 44
1.2.6 Correlación entre el límite líquido y Cv 46
1.2.7 Método de la hipérbola rectangular 46
1.2.8 Método $\Delta H_t - t / \Delta H_t$ 47
1.2.9 Método de la etapa temprana del logaritmo del tiempo. 48
1.3 Etapa III 48
2 ENSAYOS DE LABORATORIO 49
2.1 Tabulación ensayos de laboratorio 50
2.3 Perfiles estratigráficos obtenidos 52
2.3.1 LFO 13071 52
2.3.2 LFO 15472 53
2.3.3 LFO 15774 54
2.3.4 LFO 15999 54
2.3.5 LFO-16726 55
2.3.6 LFO-16742 56
CAPITULO IV 57
1 OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE CONSOLIDACIÓN 57
1.1 Método logaritmo del tiempo 57
1.2 Método de Taylor 58
1.3 Correlaciones empíricas 59
1.4 Correlación con el coeficiente de permeabilidad 60

1.5 Correlación con el límite liquido 61

1.6 Método computacional 62

1.7 Método de la hipérbola rectangular 63

1.8 Método ΔH_t – t / ΔH_t 64

1.9 Método de la etapa temprana del logaritmo del tiempo. 65

2 RESULTADOS 66

2.1 Análisis de resultados 67

2.2 Descripción grupo 1 67

2.3 Descripción grupo 2 68

2.4 Métodos para hallar el Cv 68

2.4.1 Método del logaritmo del tiempo vs método de Taylor 72

2.4.2 Comparativo con correlaciones empíricas 74

2.4.3 Comparativo con el coeficiente de permeabilidad 79

2.4.4 Comparativo con el límite líquido 83

2.4.5 Comparativo con el método computacional 86

2.4.6 Comparativo método de la hipérbola rectangular 89

2.4.7 Comparativo método delta ΔHT - T / ΔHT 92

2.4.8 Comparativo método de la etapa temprana del logaritmo del tiempo 95

GLOSARIO 97

CONCLUSIONES 98

REFERENCIAS 100

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de deformación 23

Figura 2 Deformación en la función del tiempo 24

Figura 3 Esquema de la disipación del exceso de presión de poros 27

Figura 4 Esquema de diagrama de fases en el ensayo de consolidación 28

Figura 5 Variación de la relación de vacíos con el incremento del esfuerzo efectivo 28

Figura 6 Gráfica esfuerzo efectivo vs relación de vacíos 29

Figura 7 Relación de vacíos para cada incremento de esfuerzo vertical efectivo 29

Figura 8 Curvas relación de vacíos presión vertical 30

Figura 9 Curva asentamiento contra tiempo 34

Figura 10 Diagrama de fase del suelo sometido a consolidación. 36

Figura 11 Variación de la conductividad hidráulica de los minerales de arcilla de sodio 45

Figura 12 Rango de C_v 46

Figura 13 Microzonificación Sísmica de Bogotá 49

Figura 14 Cálculo del Cv método logaritmo del tiempo 57

Figura 15 Cálculo del Cv método raíz del tiempo 58

Figura 16 Cálculo del Cv método correlaciones empíricas 59

Figura 17 Cálculo del Cv método correlación con el coeficiente k 60

Figura 18 Cálculo del Cv método correlación con LL 61

Figura 19 Cálculo del Cv método computacional 62

Figura 20 Cálculo del Cv método hipérbola rectangular 63

Figura 21 Cálculo del Cv método $\Delta Ht - t / \Delta Ht$ 64

Figura 22 Cálculo del Cv método etapa temprana del logaritmo del tiempo 65

Figura 23 LFO 13071 S-2, muestra 1 Log P vs Relación de vacíos (e) 69

Figura 24 LFO 13071 S-2, muestra 1 Log P vs Cv. 69

Figura 25 CV vs profundidad grupo I 70

Figura 26 Cv vs profundidad grupo II 71

Figura 27 CV vs profundidad grupo I método logaritmo 73

Figura 28 CV vs profundidad grupo II método logaritmo 74

Figura 22 Esfuerzo efectivo, límites de consistencia y gravedad específica grupo I 76

Figura 23 Esfuerzo efectivo, límites de consistencia y gravedad específica grupo II 77

Figura 31 Cv vs profundidad vs correlación empíricas grupo I 78

Figura 32 Cv vs profundidad vs correlación empíricas grupo II 79

Figura 33 CV vs profundidad-coeficiente de permeabilidad grupo I 81

Figura 34 CV vs profundidad-coeficiente de permeabilidad grupo II 82

Figura 35 Cv vs profundidad-logaritmo del tiempo vs limite liquido grupo I 84

Figura 36 Cv vs profundidad-logaritmo del tiempo vs limite liquido grupo II 85

Figura 37 Cv vs profundidad – Logaritmo del tiempo vs Computacional grupo I 87

Figura 38 Cv vs profundidad – Logaritmo del tiempo vs Computacional grupo II 88

Figura 39 CV vs profundidad – Hipérbola rectangular grupo I 90

Figura 40 CV vs profundidad – Hipérbola rectangular grupo II 91

Figura 41 CV vs profundidad - ΔHT - T / ΔHT grupo I 93

Figura 42 CV vs profundidad - ΔHT - T / ΔHT grupo II 94

Figura 43 CV vs profundidad – etapa temprana del logaritmo grupo I 95

Figura 44 CV vs profundidad – etapa temprana del logaritmo grupo II 96

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Plasticidad en suelos 19

Tabla 2 Actividad de los tipos de arcilla 21

Tabla 3 Variación del factor de tiempo con el grado de consolidación 31

Tabla 4 Correlaciones del Índice de compresión Cc 33

Tabla 5 Estudios recolectados 50

Tabla 6 Estudios seleccionados 51

Tabla 7 Perfil LFO-1371 S2 52

Tabla 8 Resultados de coeficiente de consolidación 66

Tabla 9 Grupos de microzonificación sísmica 67

RAE

RESUMEN ANALÍTICO ESPECIALIZADO

Tipo de documento:	Trabajo de grado: Monografía
Acceso al documento:	Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Título del documento:	Determinación del coeficiente de consolidación por distintos métodos en arcillas de la ciudad de Bogotá
Autores:	Lina María Gómez Riveros Sergio Iván Pedreros González
Director:	Hernando A. Villota Posso
Palabras claves:	Mecánica de suelos, ingeniería de cimentaciones

El siguiente trabajo describe cómo se logró establecer la variación del tiempo de consolidación unidimensional en suelos arcillosos de la ciudad de Bogotá a partir de la obtención del coeficiente de consolidación por distintos métodos racionales y empíricos desarrollados en la geotecnia; así mismo se estudiaron diferentes métodos establecidos en la teoría de consolidación unidimensional para la obtención del coeficiente de consolidación Cv. Se seleccionó estudios de suelos reales de un sector específico de la ciudad de Bogotá con el fin de obtener modelos geotécnicos e información de ensayos de laboratorio que brindó datos para el cálculo del Cv propios del suelo.

Como resultado se obtuvo un comparativo de los métodos utilizados, que en el transcurso del presente documento se exponen.

INTRODUCCION

Todos los materiales, al ser sujetos a cambios en las condiciones de esfuerzos, experimentan deformaciones, las cuales pueden o no ser dependientes del tiempo. Adicionalmente, existen relaciones entre los esfuerzos, las deformaciones y el tiempo que varían según el material a analizar siendo las más sencillas las que se producen en materiales con comportamientos elásticos lineales en las que el esfuerzo y la deformación son proporcionales e independientes del tiempo.

Para estudiar las características esfuerzo-deformación vs tiempo en un suelo, es necesario conocer su clasificación, consistencia, composición estratigráfica y el tipo de cargas a las que va a ser sometido.

Las deformaciones del suelo debidas a la aplicación de una carga externa son producto de una disminución del volumen total de la masa del suelo y de una reducción del volumen de vacíos, puesto que el volumen de los sólidos se asume como constante. El grado de saturación del suelo dependerá de la cantidad de vacíos que estén llenos de agua, esta al ser incompresible permitiría que el volumen de vacíos disminuya si el volumen de líquido disminuye es decir si se disipa el exceso de presión de poros hacia algún estrato permeable. Por el contrario si el suelo en sus vacíos posee aire y agua (suelo parcialmente saturado) la disminución de la relación de vacíos se produce por una compresión de los gases que posee.

Cuando un depósito saturado se somete a un incremento de esfuerzos totales, como resultado de cargas externas aplicadas, se produce un exceso de presión instersticial (presión neutra). Puesto que el agua no tiene resistencia al corte, la presión neutra se disipa mediante un flujo de lagua al exterior, cuya velocidad de drenaje depende de la permeabilidad del suelo.

Si en cambio el depósito se encuentra parcialmente saturado, la situación resulta más compleja debido a la presencia del gas que puede permitir cierta compresión, como se mencionó, sin que se produzca un flujo de agua.

La disipación de presión intersticial debida al flujo de agua hacia el exterior se denomina consolidación, este proceso tiene dos consecuencias: la reducción del volumen de poros o vacíos, por tanto del volumen total y la presencia de un asentamiento. Se considera que en el proceso de consolidación unidimensional la posición relativa de las partículas sobre un mismo plano horizontal permanece esencialmente igual, el movimiento de las mismas solo puedo ocurrir verticalmente.

Durante la disipación del exceso de presión intersticial, la presión efectiva aumenta y en consecuencia se incrementa la resistencia del suelo. Por lo tanto cuando un suelo se consolida ante la aplicación de una carga, se produce una disminución de la relación de vacíos y un incremento del esfuerzo efectivo.

No obstante, predecir la ocurrencia de asentamientos resulta insuficiente para establecer medidas de control y mitigación de los mismos si no se cuenta con el tiempo probable para la ocurrencia de los mismos, resulta ndispensable conocer el tiempo y la velocidad con la que estos sucederán para dar soluciones efectivas a esta problemática. Para el caso de los suelos arcillosos, el tiempo de consolidación se puede calcular de forma experimental con el ensayo de consolidación unidimensional (norma INV-E-151-14). Sin embargo existen otros métodos que permiten la obtención de este parámetro por medio de correlaciones con otros ensayos de laboratorio como límites de consistencia, permeabilidad entre otros.

El presente trabajo de grado muestra la comparación de los coeficientes de consolidación obtenidos por distintos métodos aplicados a varios estudios de suelos ubicados en el sector oriental de la saban de Bogotá; inicialmente presenta la recopilación de la información consultada; análisis y obtención de Cv, y finalmente establece las posibles relaciones que presenten entre cada uno de los métodos aplicados asi como con otros ensayos de laboratorio

CAPITULO I

1 JUSTIFICACIÓN

El suelo es un material heterogéneo producto de la descomposición de las rocas por factores físicos, químicos, mecánicos, climáticos y/o biológicos, los cuales se pueden clasificar de forma general en suelos granulares o cohesivos. Esta clasificación es de suma importancia debido a que el comportamiento de cada uno distinto y debe ser analizado por el ingeniero geotecnista bajo diferentes parámetros con el fin de predecir su comportamiento ante la aplicación de cargas.

Uno de los parámetros a evaluar en la interacción suelo-estructura son los asentamientos que se puedan generar por la acción de cargas y el tiempo en que estos se presentarán con el fin de determinar si estos se encuentran dentro de los criterios de aceptación y rechazo de la normativa vigente, (para el caso de edificaciones en Colombia, la NSR 10 título H) para así proponer las medidas de mitigación que sean necesarias para el control de los mismos

Ahora bien, los asentamientos pueden ser instantáneos, por consolidación primaria o secundaria. Los asentamientos por consolidación primaria se dan en suelos arcillosos que se encuentren saturados, son producidos por la disipación de la presión de poros del suelo ante un incremento de esfuerzos aplicado al mismo y se pueden calcular con Ensayo de Consolidación Unidimensional de Suelos (INV-E-151-14). En este ensayo bajo condiciones ideales se aplican incrementos de esfuerzo a una muestra de suelo y por medio de la lectura de las deformaciones que esta presenta durante un tiempo determinado se estiman los coeficientes que permiten calcular los asentamientos y tiempos de consolidación respectivamente. Sin embargo no siempre se cuenta con el ensayo de consolidación y por tal motivo no es posible estimar el Cv ni el tiempo de consolidación.

Por tal motivo, otros autores desarrollaron métodos indirectos los cuales por medio de correlaciones con otros parámetros como límites de consistencia, permeabilidad entre otros pretenden calcular el coeficiente de consolidación Cv y el tiempo de consolidación respectivamente. Sin embargo se hace necesaria una comparación de estos métodos con el fin de establecer su nivel de certeza con respecto a los métodos comunmente utilizados.

2 FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA

De acuerdo con lo establecido en la norma INV-E-151-14 el coeficiente de consolidación Cv se puede calcular de dos métodos: el logaritmo el tiempo y la raíz cuadrada del tiempo. No obstante, estos métodos requieren del ensayo de Consolidación Unidimensional de Suelos y muchas veces es posible realizarlo; por tal motivo distintos autores han desarrollado correlaciones y métodos indirectos para calcular el valor de Cv.

Sin embargo el nivel de certeza de estos métodos sigue siendo un interrogante para el geotecnista, iniciativa de cuestionar ¿Existen métodos indirectos confiables que permitan determinar el coeficiente de consolidación?

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el coeficiente de consolidación por distintos métodos en suelos arcillosos del sector nororiental de la ciudad de Bogotá.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

I. Revisar los estudios de suelos para la obtención de perfiles estratigráficos, las condiciones de distancia y tipo de drenaje de una tipología de suelo arcilloso en el sector nororiental de la ciudad de Bogotá.

II. Calcular por distintos métodos el coeficiente de consolidación.

III. Comparar los coeficientes de consolidación obtenidos con los resultados de laboratorio con correlaciones tradicionales estableciendo diferencias y similitudes entre ellos.

IV. Establecer valores de coeficientes de permeabilidad para la estimación de coeficientes de consolidación a partir de parámetros de clasificación como los límites de consistencia y granulometría.

CAPITULO II

1 MARCO TEÓRICO

1.1 BASE TEÓRICA

A continuación, para darle continuidad y referentes al lector se puntualiza en la teoría que se trabaja a lo largo del documento, esto con el fin de dar claridad y fluidez desde diferentes posturas al marco teórico consultado.

1.1.1 Límites de consistencia

El suelo se comporta de diferentes formas de acuerdo a su contenido de humedad; la mezcla de suelo y agua forma la condición física definida como consistencia, donde dependiendo del porcentaje de agua que guarda el suelo hace que este cambie de un estado a otro. Estos cambios de estados en los suelos presentan unos límites entre un estado y otro, que se conocen como los límites de Atterberg.

1.1.1.1 Límite líquido (LL)

El límite liquido es aquel cuando el suelo cambia de estado líquido a plástico y se determina con el ensayo de Casagrande.

En este estado la mezcla se comporta como un fluido viscoso y fluye bajo su propio peso. Por debajo de este contenido de humedad la mezcla se encuentra en estado plástico. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LL produce un cambio en el volumen del suelo.

1.1.1.2 Límite plástico (LP)

Este límite se define como el cambio del estado de plástico a uno semisólido. En este estado la mezcla se deforma a cualquier forma bajo ligera presión. Por debajo de este contenido de

humedad la mezcla está en un estado semi sólido. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LP produce un cambio en el volumen del suelo.

1.1.1.3 Límite de contracción (LC)

Se presenta cuando el suelo pasa de un estado semisólido a uno sólido, en este estado el suelo no experimenta ningún cambio adicional en su volumen con la pérdida de humedad.

1.1.2 Índice de plasticidad (IP)

El índice de plasticidad es la diferencia que hay entre el límite líquido y el límite plástico que refiere al rango de contenido de humedad natural sobre el cual el suelo era plástico, y está dado por la siguiente expresión:

$$IP = LL - LP$$

El índice de plasticidad es muy útil para la clasificación de los suelos de grano fino. También ayuda para conocer algunas de las propiedades del suelo, un suelo con un IP =2 tiene una gama muy estrecha de plasticidad, por el contrario, un suelo con un IP = 30 tiene características plásticas muy elevadas. En la siguiente tabla se definen algunos tipos de suelo de acuerdo al índice de plasticidad.

Tabla 1 *Plasticidad en suelos*
Fuente: Elaboración de los autores

PLASTICIDAD	SUELO	RANGO IP
Nula	Limo	0-3
Baja	Limo con trazas de arcilla	4-15
Media	Limo arcilloso Arcilla limosa Arcillas y limos orgánicos	16-30
Alta	Arcilla limosa Arcilla	>31

1.1.3 Índice de liquidez (IL)

También conocido como la Relación Agua-Plasticidad, el Índice de Liquidez IL es el índice utilizado para medir a escala el contenido de humedad natural de una muestra de suelo, respecto de los límites líquido y plástico (indirectamente sirve para tener una medida aproximada de la resistencia del material), siendo definido como:

$$IL = \frac{\omega_n - LP}{IP}$$

Donde w_n es el contenido de humedad natural

1.1.4 Química de arcillas y minerales arcillosos

Los minerales arcillosos son complejos de silicatos de aluminio compuestos de una o dos unidades de láminas de sílice las cuales son combinadas por medio de enlaces químicos con otros elementos los cuales dan origen a los tres tipos de arcillas más conocidos: caolinitas, ilitas y montmorillonitas.

Las Caolinitas: Principal grupo de arcillas que presenta baja capacidad de intercambio, 10– 12 me (miliequivalentes) cada 100 gr, y con dos capas de cationes, las llamadas arcillas 1:1(capa tetraédrica más capa octaédrica de alúmina hidratada). El arreglo, que se repite indefinidamente da una carga eléctrica neutra del mineral caolinita, cuya estructura no es expansiva, por no admitir agua en su retícula. Estas arcillas son moderadamente plásticas, de mayor permeabilidad y mayor fricción interna.

Illita: Es una arcilla 2:1, compuesta por una lámina de gibsita y dos láminas de sílice su estructura es laminar y se intercala entre sí con iones de potasio hace algo expansiva. La actividad de la illita es 0,9.

Montmorillonita: Arcilla 2:1 compuesta por una lámina de gibsita intercalada entre dos láminas de sílicea, y este arreglo se repite indefinidamente. La unión entre minerales individuales es débil, por lo cual el agua se inserta, introduciendo moléculas para producir el hinchamiento del suelo. Además de ser expansiva, la montmorillonita es muy plástica y se contrae al secarse, mejorando su resistencia y haciéndose impermeable. La actividad de la montmorillonita es 7,2.

1.1.5 Actividad

Es la pendiente de la línea que relaciona el índice plástico de un suelo con su contenido de minerales de tamaño arcilloso, teniendo en cuenta que la plasticidad del suelo depende del agua absorbida por las partículas de arcilla y esta a su vez depende del tipo de arcilla encontrada.

Por lo tanto, el grado de plasticidad que presenta un suelo está relacionado con el tipo y cantidad de minerales arcillosos presentes. Como guía, entonces, el agua absorbida por un suelo brinda algún estimativo de la cantidad de arcilla presente en dicho suelo. En 1953, Skempton definió la actividad A de una arcilla como:

$$Actividad = \frac{IP}{\%\ fraccion\ \ de\ tamaño\ arcilloso\ en\ peso}$$

En la siguiente tabla se describe el tipo de arcilla de acuerdo a la Actividad, índice plástico y límite líquido.

Tabla 2 *Actividad de los tipos de arcilla*
Fuente: Gonzalo y Escobar Geomécanica (2016)

Arcilla	Superficie Específica m^2/gr	Actividad (Skempton)	Índice Plástico	LL
Montmorillonita	500-800	0.5 a 7.2	>>50	(?)Tixotrópico
Illita	60-120	0.3 a 0.9	33-50	60-90
Caoloinita	20-40	0.1 a 0.4	1-40	30-75

1.1.6 Principio de esfuerzo efectivo

El esfuerzo efectivo en cualquier dirección está definido como la diferencia entre el esfuerzo total en dicha dirección y la presión del agua que existe en los vacíos del suelo. El esfuerzo efectivo es por lo tanto una diferencia de esfuerzos.

1.1.6.1 Saturación de suelos

El suelo contiene un volumen de masa y otra de vacíos los cuales pueden estar llenos de aire y otros de agua, donde tanto la masa sólida como el agua son incompresibles, cuando se presentan deformaciones son producto de una disminución del volumen total de la masa del suelo y de una reducción del volumen de vacíos; la deformación también depende del grado de saturación del suelo.

Cuando los espacios vacíos o poros del suelo están ocupados por agua, este se conoce como suelo saturado, donde el agua al ser incompresible solo permitiría que el volumen de vacíos disminuya si el volumen de líquido disminuye; esto solo ocurrirá cuando el flujo de agua se encamine hacia algún estrato permeable.

Por otro lado, si el suelo en sus vacíos posee aire y agua (suelo parcialmente saturado) la disminución de la relación de vacíos se produce por una compresión de los gases que posee.

1.1.7 Deformaciones del suelo

Un suelo puede presentar deformaciones permanentes o no por causa de las cargas que soporta. Las deformaciones pueden ser:

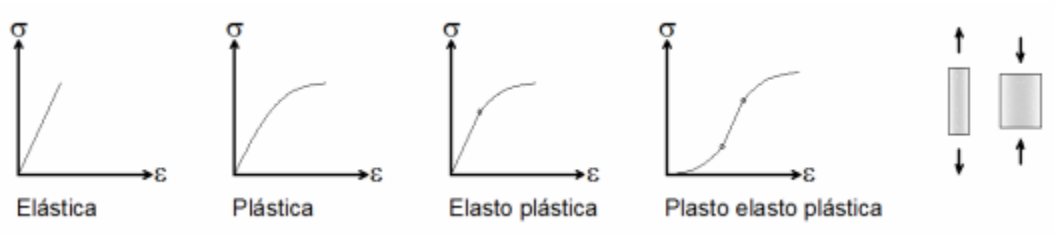


Figura 1 Tipos de deformación
Fuente: Gonzalo y Escobar - Geomécanica (2017)

1.1.7.1 Elástica

Este tipo de deformación en el suelo refiere a que este puede recobrar su forma y dimensiones originales al ser retirada la carga impuesta, es decir, cuando cesa la fuerza de deformación.

1.1.7.2 Plástica

Refiere a las deformaciones no recuperables, es decir, al retirar las cargas el suelo queda deformado, pero su volumen casi se mantiene.

1.1.7.3 Compresiva

En este caso se presenta deformación en el suelo sometido a carga, y esta se conserva después de esa acción. Esta deformación puede ser por consolidación o por compactación.

1.1.8 Consolidación

Es la reorientación de las partículas y la expulsión de aire o agua de los espacios vacíos del suelo, que al ser sometido a cargas externas genera una reducción en el volumen del mismo. La consolidación se clasifica en dos, puede ser primaria o secundaria.

1.1.8.1 Primaria

La consolidación primaria cuando cargado el suelo, la reducción de volumen se debe a la expulsión del agua, fenómeno en el que se transfiere la carga soportada por el agua al esqueleto mineral.

1.1.8.2 Secundaria

La consolidación secundaria cuando la consolidación se da por reajuste del esqueleto mineral y luego de que la carga está casi toda soportada por este y no por el agua. (Gonzalo y Escobar, 2016)

En la siguiente figura se observa la deformación en el tiempo durante la consolidación para un incremento particular de carga.

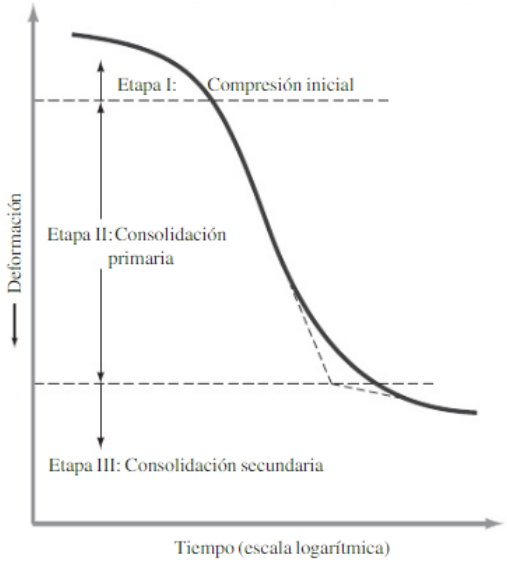


Figura 2 Deformación en la función del tiempo
Fuente: Braja M Das - Fundamentos de ingeniería geotécnica (2013)

En la primera etapa se tiene la compresión inicial, que es dada por la precarga, en segunda etapa esta la consolidación primaria donde se reduce gradualmente la presión efectiva por la expulsión de la presión del agua intersticial y la última etapa corresponde a la consolidación secundaria, que se produce después de la total disipación de presión de poro del agua.

1.1.9 Presión de pre consolidación (σ'_c)

Es la mayor presión a la que se ha sujetado a un suelo, es decir, es la presión de sobre carga máxima después de la efectiva a la que se ha sometido. Se puede determinar utilizando un procedimiento gráfico simple propuesto por Casagrande (1936).

Los depósitos naturales de suelos pueden estar normalmente consolidados o sobre consolidados (o pre consolidados). Si la presión de sobrecarga efectiva presente $\sigma'=\sigma'_0$ es igual a la presión de pre consolidación σ'_c el suelo está normalmente consolidado. Sin embargo, si $\sigma'_0 < \sigma'_c$, el suelo está sobre consolidado. Braja M Das B (2013).

1.1.10 Arcillas normalmente consolidadas

Una arcilla es normalmente consolidada si nunca ha estado bajo una presión mayor que la presión efectiva de sobrecarga existente. Una arcilla en estas condiciones puede ser representada. Si la presión efectiva existente es menor que la máxima presión efectiva a la cual la arcilla ha estado sujeta en el pasado, se dice que esta sobre consolidada.

Según pruebas de laboratorio y experiencias en campo, es bien conocido que la consolidación causada por un incremento en la presión actuante en una arcilla normalmente consolidad, es mucho más grande que la expansión causada por un decremento de igual magnitud en la misma arcilla.

1.1.11 Arcillas pre consolidadas

Es aquella arcilla que estuvo en el pasado cargada por estratos de suelo que fueron posteriormente erosionados, o por cargas de hielo en una época glacial, también existe la pre consolidación por secamiento o por descenso de la capa freática con posterior recuperación.

1.1.12 Arcillas sobreconsolidadas

Cuando el suelo en la actualidad está soportando esfuerzos inferiores a los que sufrió en el pasado se dice que es un suelo *Sobre Consolidado*. Los suelos sobreconsolidados son generalmente rígidos. Cuando el contenido natural de agua en sitio está más cercano al límite plástico entonces el suelo está sobre consolidado; en este caso IL < 0

1.1.13 Tasa de consolidación

La teoría de la tasa de tiempo de consolidación unidimensional fue primero propuesta por Terzaghi (1925). Las suposiciones subyacentes en la derivación de las ecuaciones matemáticas son las siguientes:

1. La capa de arcilla es homogénea.
2. La capa de arcilla está saturada.
3. La compresión de la capa de suelo se debe al cambio en el volumen solo, que a su vez se debe a la extracción de agua de los espacios vacíos.
4. La ley de Darcy es válida.
5. La deformación del suelo ocurre solo en la dirección de la aplicación de la carga.
6. El coeficiente de consolidación C_v es constante durante la consolidación

Con las hipótesis descritas anteriormente, consideremos una capa de arcilla de espesor Ht como se muestra en la figura. La capa está ubicada entre dos altamente capas de arena permeable. Cuando la arcilla se somete a un aumento de la presión, $\Delta\sigma$ vertical, la presión del agua intersticial en cualquier punto A aumentará en u.

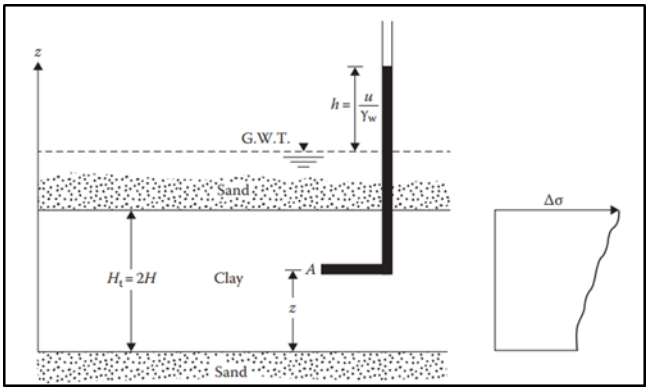


Figura 3 Esquema de la disipación del exceso de presión de poros
Fuente: Braja M Das - Fundamentos de ingeniería geotécnica (2013)

1.1.14 Prueba de consolidación unidimensional en el laboratorio

El procedimiento de prueba de la consolidación unidimensional fue primero sugerido por Terzaghi (1925), la cual se efectúa en un consolidómetro. En esta prueba el espécimen de suelo se coloca dentro de un anillo metálico con dos piedras porosas, una en la parte superior y otra en el fondo. Los especímenes son usualmente de 63,5 mm de diámetro y 25,4 mm de espesor. La carga sobre el espécimen se aplica por medio de un brazo de palanca y la compresión se mide por medio de un micrómetro calibrado, la muestre se mantiene bajo agua durante la prueba para garantizar que se encuentre saturada. Cada carga se mantiene usualmente durante 24 horas. Luego se duplica la presión sobre el espécimen y se continua la medición de compresión. Al final se determina el peso seco del espécimen de la prueba.

1.1.15 Graficas de presión – relación de vacíos

El análisis de la variación de la relación de vacíos que ante la aplicación de cargas se realiza utilizado la teoría de fases del suelo (DAS 2001) teniendo en cuenta que se conocen valores como la altura y área de la muestra además de otros valores como la gravedad específica del suelo y el peso unitario del agua.

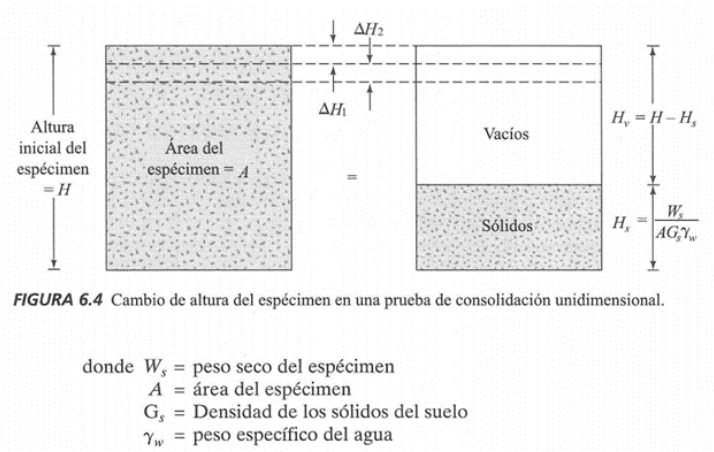


Figura 4 Esquema de diagrama de fases en el ensayo de consolidación
Fuente: Braja M Das - Fundamentos de ingeniería geotécnica (2013)

A partir de la variación de la altura total de la muestra y la altura total de los sólidos que se calcula como se muestra en la figura, es posible obtener las relaciones de vacíos para cada incremento de esfuerzos. El resultado final será una gráfica de presión efectiva vs relación de vacíos como se muestra a continuación

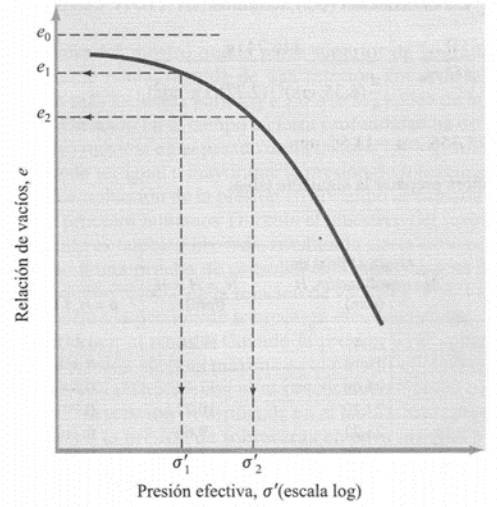


Figura 5 Variación de la relación de vacíos con el incremento del esfuerzo efectivo
Fuente: Braja M Das - Fundamentos de ingeniería geotécnica (2013)

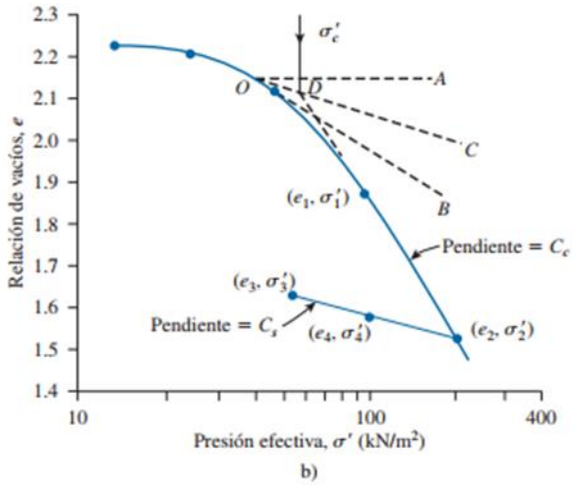


Figura 6 Gráfica esfuerzo efectivo vs relación de vacíos
Fuente: Braja M Das - Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (2013)

1.1.16 Coeficiente de compresibilidad (a_v)

Este coeficiente mide la razón de variación de la relación de vacíos con la presión. El valor de a_v depende de la presión sobre el suelo y no es constante del mismo.

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta P}$$

Este coeficiente se obtiene a partir de la gráfica de Relación de vacíos e vs Esfuerzo vertical efectivo σ'_v

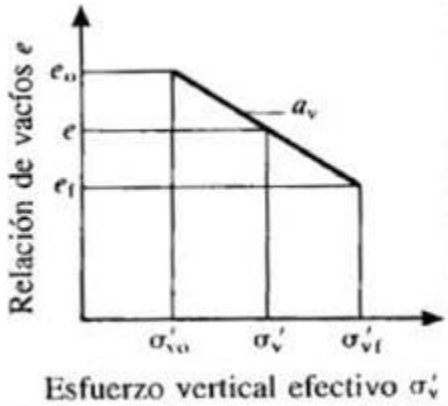


Figura 7 Relación de vacíos para cada incremento de esfuerzo vertical efectivo
Fuente: Gonzalo y Escobar – Geomecánica (2016)

1.1.17 Coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v)

Físicamente expresa la compresibilidad del suelo, relacionándola con su volumen inicial. Tomando en cuenta la siguiente expresión, se tiene que:

$$-\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{a_v}{1+e_0}\frac{\partial u}{\partial t} = -m_v\frac{\partial u}{\partial t}$$

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0} = \frac{\partial u}{\partial t} = c_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Donde Cv=coeficiente de consolidación

$$C_v = \frac{K}{\gamma_w m_v}$$

Y e_0 es la relación de vacíos del suelo antes de un incremento de carga específico.

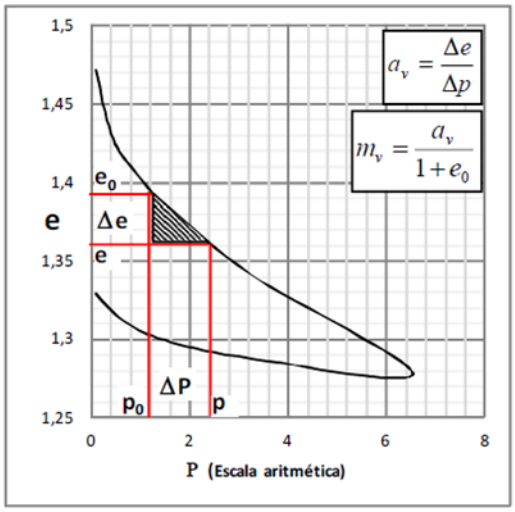


Figura 8 Curvas relación de vacíos presión vertical
Fuente: Gonzalo y Escobar – Geomecánica (2016)

Finalmente aparece el concepto de factor tiempo el cual es un número adimensional y es parte de la solución de la ecuación diferencial de la consolidación, este valor está definido por la expresión

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2}$$

La variación del grado promedio de consolidación con el factor de tiempo adimensional T_v se muestra en la siguiente tabla, bajo la hipótesis que u_o es el mismo para toda la profundidad del estrato consolidable. Los valores de factor tiempo y sus grados promedio correspondientes de consolidación también se pueden calcular por medio de las siguientes ecuaciones

Para U (0%-60%) $$T_v = \frac{\pi}{4}\left(\frac{U\%}{100}\right)^2$$

Para U>60% $$T_v = 1{,}781 - 0{,}933\log(100 - U\%)$$

Tabla 3 *Variación del factor de tiempo con el grado de consolidación*
Fuente: Braja M Das - Fundamentos de ingeniería geotécnica (2013)

U (%)	T_v	U (%)	T_v	U (%)	T_v	U (%)	T_v
0	0	26	0.0531	52	0.212	78	0.529
1	0.00008	27	0.0572	53	0.221	79	0.547
2	0.0003	28	0.0615	54	0.230	80	0.567
3	0.00071	29	0.0660	55	0.239	81	0.588
4	0.00126	30	0.0707	56	0.248	82	0.610
5	0.00196	31	0.0754	57	0.257	83	0.633
6	0.00283	32	0.0803	58	0.267	84	0.658
7	0.00385	33	0.0855	59	0.276	85	0.684
8	0.00502	34	0.0907	60	0.286	86	0.712
9	0.00636	35	0.0962	61	0.297	87	0.742
10	0.00785	36	0.102	62	0.307	88	0.774
11	0.0095	37	0.107	63	0.318	89	0.809
12	0.0113	38	0.113	64	0.329	90	0.848
13	0.0133	39	0.119	65	0.304	91	0.891
14	0.0154	40	0.126	66	0.352	92	0.938
15	0.0177	41	0.132	67	0.364	93	0.993
16	0.0201	42	0.138	68	0.377	94	1.055
17	0.0227	43	0.145	69	0.390	95	1.129
18	0.0254	44	0.152	70	0.403	96	1.219
19	0.0283	45	0.159	71	0.417	97	1.336
20	0.0314	46	0.166	72	0.431	98	1.500
21	0.0346	47	0.173	73	0.446	99	1.781
22	0.0380	48	0.181	74	0.461	100	∞
23	0.0415	49	0.188	75	0.477		
24	0.0452	50	0.197	76	0.493		
25	0.0491	51	0.204	77	0.511		

1.1.18 Índice de compresión (Cc)

Este coeficiente define las características de esfuerzo-deformación del suelo, y es la pendiente de la parte de la línea recta de la curva de carga.

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1}$$

Donde e_1 y e_2 son las relaciones de vacíos al final de la consolidación ante los esfuerzos efectivos σ'_1 y σ'_2 respectivamente.

1.1.18.1 Correlaciones del Cc

La correlación entre la plasticidad y la compresibilidad ha sido extensamente investigada de lo cual han surgido numerosas expresiones lineales para el índice de compresión en términos del límite líquido y otras propiedades básicas como el contenido de humedad y la relación de vacíos inicial. En las siguientes tablas se describen las correlaciones halladas por las diferentes investigaciones.

Tabla 4 *Correlaciones del Índice de compresión Cc*
Fuente: Barriga y Álvarez – Trabajo de grado (2013)

Cc = f (Limite Liquido - LL)	
Cc = 0,009 (LL - 10)	Skempton (1944) Arcillas inalteradas
Cc = 0,007 (LL - 10)	Terzagui y Peck (1967) Arcillas remoldeadas
Cc = 0,0046 (LL - 9)	Azzouz - Arcillas Brasileñas
Cc = 0,013 (LL - 13,5)	Yamagutsi (1959)
Cc = 0,017 (LL - 20)	Shouka (1964)
Cc = (LL - 13)/109	Mayne (1980)
Cc = 0,00463 LL - 0,013	Balasubramaniam y Brenner (1981)

Cc = f (Indice de Plasticidad - IP)	
Cc = 0,02 + 0,014 (IP)	Nacci (1975) Arcillas del Atlantico Norte
Cc = 0,046 + 0,0104 (IP)	Nakase (1988)

Cc = f (Relación de vacios - eo)	
Cc = 0,75 (eo - 0,5)	Sower (1970) Arcillas de baja plasticidad
Cc = 0,54 (eo - 0,35)	Nishida (1956) Todas las arcillas
Cc = 1,15 (eo - 0,27)	Nishida (1956) Todas las arcillas
Cc = 1,15 (eo - 0,35)	Nishida (1956) Todas las arcillas
Cc = 0,43 (eo - 0,25)	Cozzolino (1961) Arcillas brasileñas
Cc = 1,21 + 1,005 (eo - 1,87)	Azzouz (1976) Arcillas de Sao Paulo
Cc = 0,208 eo +0,0083	Azzouz (1976) Arcillas de Chicago
Cc = 0,156 eo + 0,0107	Hough (1957)
Cc = 0,3 (eo - 0,27)	Hough (1957)

Cc = f (Humedad Natural - Wn)	
Cc = 0,01 Wn	Azzouz (1976) Arcillas de Chicago
Cc = 0,01 (Wn - 5)	Azzouz (1976)
Cc = 0,0093 Wn	Koppula (1981)
Cc = 0,00566 Wn - 0,037	Balasubramaniam y Brenner (1981)
Cc = 0,0115 Wn	Hough (1957) Arcillas y Limos Organicos, Turbas
Cc = 0,0001766 Wn^2 + 0,00593 Wn - 0,135	Arcillas de Chicago

Cc = f (Varios parametros)	
Cc = 0,141 $Gs^{1,2}$ $((1 + eo)/Gs)^{2,38}$	Rendon - Herrero (1983)
Cc = 0,2343 (LL/100) Gs	Nagaraj y Murty (1985)
Cc = 0,00234 * LL * Gs	Nagaraj y Srinivasa Murthy
Cc = 0,37 (eo + 0,003 LL + 0,0004 Wn - 0,34)	Azzouz (1976)
Cc = 0,009 Wn +0,005 LL	Koppula (1986)
Cc = -0,156 + 0,411 eo + 0,00058 LL)	Al - Khafaji y Andersland (1992)

1.1.19 Coeficiente de consolidación (Cv)

Es el valor numérico utilizado en los cálculos de consolidación para determinar el tiempo necesario para que se produzca un porcentaje de consolidación (U), en una masa de suelo.

1.1.19.1 Cálculo del coeficiente de consolidación

El coeficiente de consolidación (cv) se puede obtener por varios métodos, uno de ellos presentado por Casagrande y Fadum (1940) propuso el método del logaritmo del tiempo, este es un método gráfico en el cual de un gráfico semilogarítmico (tiempo vs deformación) se toman lecturas del tiempo en el cual se da el 50% de la consolidación y se relaciona con el factor tiempo, finalmente se despeja el valor C_v.

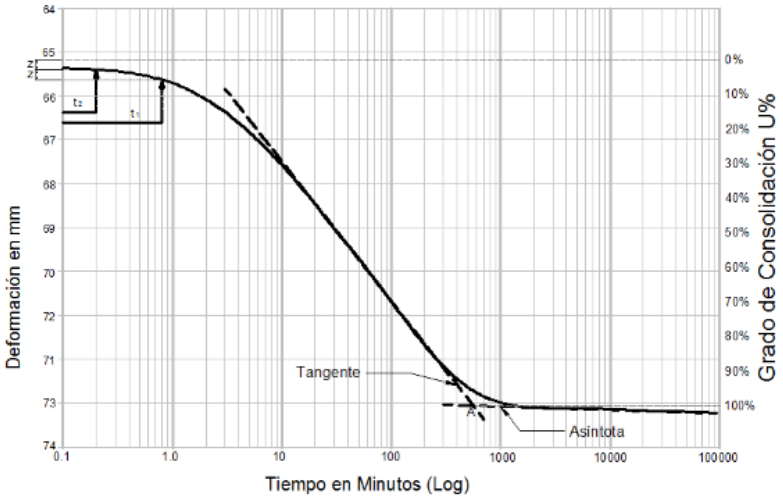


Figura 9 Curva asentamiento contra tiempo
Fuente: Gonzalo y Escobar - Geomécanica (2017)

Posteriormente Taylor (1942), estableció el método de la raíz cuadrada del tiempo, el cual también es un método gráfico y se fundamenta en un procedimiento similar al del logaritmo del tiempo, solo que para un tiempo de consolidación del 90%.

Existe además el método de la pendiente máxima del Su, publicado en 1958 es también desarrollado por medio de aproximaciones a la gráfica de log-t vs deformaciones.

El método computacional, fue publicado por los autores Sivaram and Swamee (1977). y relaciona ecuaciones a partir de las lecturas de las deformaciones y los respectivos tiempos, así como la mayor distancia de drenaje H.

La obtención del coeficiente de consolidación por medio correlaciones empíricas Raju et al. (1995), menciona una ecuación en la cual se vincula la presión de consolidación en logaritmo, la relación de vacíos en el límite líquido y la gravedad específica del suelo. Nótese que este método únicamente necesita el esfuerzo de pre consolidación del ensayo, otros valores requeridos para el cálculo del C_v se pueden obtener de otros ensayos.

Otro de los métodos encontrados para el C_v es el método de la hipérbola rectangular, propuesto Sridharan and Prakash en1985, el cual realiza aproximaciones geométricas a la curva $T/\Delta H - t$ para obtener una distancia D que finalmente se utiliza en la ecuación planteada por el autor.

Finalmente se encontraron los métodos Delta H Sridharan and Prakash (1993) y el método de la etapa temprana de logaritmo del tiempo (Robinson and Allam,1996) los cuales son métodos gráficos con procedimientos similares a los anteriormente descritos

1.1.20 Cálculo de asentamientos por consolidación

Tomando como referencia lo expuesto por el ingeniero Braja M Das B (2013), donde se considera un estrato de arcilla saturada de espesor H y área de sección transversal bajo una presión σ'_o de sobrecarga efectiva promedio. Debido a un incremento de presión $\Delta\sigma$, sea el asentamiento primario igual a S. Al final de la consolidación $\Delta\sigma = \Delta'\sigma$.

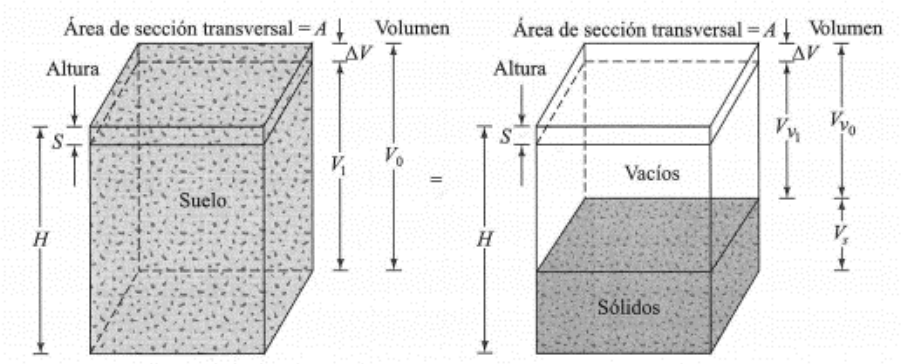


Figura 10 Diagrama de fase del suelo sometido a consolidación.
Fuente: Braja M Das - Fundamentos de ingeniería geotécnica (2013)

De acuerdo a lo anterior se tiene que el asentamiento S:

$$S = \frac{C_c}{1 + e_0} * H * \log\left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0}\right)$$

1.1.21 Consolidación y permeabilidad k del suelo compresible

$$k = \frac{m_v * H^2}{t} * \gamma w$$

Donde se expresa la permeabilidad en función del coeficiente de consolidación y del coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v), evidencias de que la deformación se puede evaluar por el volumen de agua drenada en el tiempo.

1.1.22 Velocidad de consolidación

Las ecuaciones anteriormente descritas permiten calcular los asentamientos por consolidación primaria. Sin embargo, no proporcionan ninguna información respecto a la velocidad con que ocurre la consolidación primaria. Terzaghi (1925) propuso la primera teoría para considerar la

velocidad de la consolidación unidimensional en suelos arcillosos saturados, de acuerdo con las siguientes suposiciones.

a. El sistema arcilla-agua es homogéneo.
b. La saturación es completa
c. La compresibilidad del agua es despreciable.
d. La compresibilidad de los granos del suelo es despreciable (pero los granos del suelo se reacomodan)
e. El flujo de agua ocurre sólo en una dirección es decir en la dirección de la compresión
f. La ley de Darcy es válida.

1.2 ANTECEDENTES

Dentro de la literatura consultada, se encuentran los siguientes trabajos de investigación que son semejantes y que dentro de contenido involucran aspectos concernientes al presente proyecto de grado.

1. Asentamientos secundarios en los suelos blandos de la zona el Campín y su correlación con algunos parámetros de los suelos de la zona lacustre en la ciudad de Bogotá D.C.

Como se lee en Lozano (2008) se determinaron correlaciones (Cα vs LL, Cα vs IP, Cα vs LL, Cc, Cα vs LP, IP), entre los parámetros (Cα, IP, LL, Cc, LP) para el cálculo de los asentamientos por consolidación secundaria en la zona A-3 del Campín en la ciudad de Bogotá D.C.

2. Determinación de la correlación entre el coeficiente de compresión y propiedades índice en suelos de expansión urbana de Pereira específicamente en los sectores de Villa verde, parque del café y Batará

Por su parte Poveda (2014) argumenta, que su trabajo desarrolla correlaciones entre el coeficiente de consolidación y los valores índice del suelo y aplican los resultados obtenidos al cálculo de asentamiento de acuerdo con las consideraciones de la microzonificación sísmica del Municipio de Pereira.

3. Ajuste de los parámetros de consolidación mediante uso de herramientas de programación

Para esta investigación Gallardo (2010) desarrolla un programa para la interpretación de datos del ensayo de consolidación unidimensional basado en un procedimiento de ajuste que utilice todos los datos del ensayo. Este programa facilita la generación de la gráfica de grado de consolidación

U en función del factor tiempo T de laboratorio con la gráfica U vs T teórica y así mismo se logra obtener el coeficiente de consolidación Cv.

CAPITULO III

1 METODOLOGÍA

Para desarrollar a cabalidad la totalidad del proyecto se realizarán en 3 etapas: una primera etapa de consulta, clasificación y organización de distintos estudios de suelos en la ciudad de Bogotá; una segunda etapa de exploración de la información seleccionada para la construcción de modelos geotécnicos y obtención de parámetros, además en esta etapa se calcularán los coeficientes de consolidación por distintos métodos y se establecerán posibles correlaciones entre ellos. Finalmente, una etapa de análisis de resultados y edición del informe final. A continuación, se describe en detalle cada una de las etapas.

1.1 Etapa I

Se consultaron diferentes estudios de suelos realizados en la ciudad de Bogotá (ver Anexo *1*), los cuales cuentan con ensayos de clasificación, límites, pesos unitarios, gravedades específicas, consolidaciones unidimensionales entre otras características de las muestras obtenidas.

Para determinar los estudios de suelos objeto del presente proyecto, se organizaron en una tabla (ver Tabla *5*) y se seleccionaron de acuerdo a la similitud de ubicación y cantidad de estudios (ver Tabla *6*), posteriormente se ubicaron en el mapa de la ciudad donde se observa la zona seleccionada (ver *Figura 13*), el anterior criterio se estableció en base a los estudios de suelos que carecen del ensayo de consolidación unidimensional y a la vez la accesibilidad de ellos.

1.2 Etapa II

La información del laboratorio y descripción de los estudios seleccionados permitieron relacionar los datos y obtener los perfiles estratigráficos que describen con mayor precisión las

características geotécnicas del suelo explorado (tipo de suelo, espesor de estratos, nivel freático, pesos unitarios etc.) y también, se obtuvo la mayor distancia de drenaje H' y los tipos de drenaje. Los métodos que se utilizaron para la obtención del C_v se describen a continuación:

1.2.1 Método del logaritmo del tiempo

A partir de los incrementos de carga para los cuales se obtienen las lecturas del tiempo, se dibujan las curvas: deformación contra el logaritmo del tiempo (en minutos), por cada incremento de carga a medida que progrese el ensayo, y para los decrementos del rebote.

Se determina el asentamiento que representa el 100 % de la consolidación primaria para cada incremento de carga. Se dibuja primero una línea recta a través de los puntos que representan las lecturas finales y que exhiben una tendencia recta y una inclinación suave. Se dibuja una segunda recta tangente a la parte más pronunciada de la curva de logaritmo de tiempo vs. asentamiento. La intersección representa el asentamiento primario. Se corrige la deformación para el 100 % de acuerdo con los resultados de la calibración. La consolidación que ocurra después del 100 % de la consolidación primaria se define como consolidación secundaria.

Se determina la deformación que representa el 0 % de la consolidación primaria. Para ello se seleccionan dos tiempos (tB y tA) que tengan una relación de 1 a 4 (tA = 4 tB), de tal manera que la deformación correspondiente al mayor de los dos tiempos será mayor que 1/4 pero menor que 1/2 del cambio total de la deformación para el incremento de carga. La deformación correspondiente al 0 % de la consolidación primaria se obtiene al restar la diferencia de las deformaciones para los dos tiempos tA y tB seleccionados, del valor de deformación de tB.

El asentamiento correspondiente al 50 % de la consolidación primaria para cada incremento de carga, es igual al promedio de los asentamientos no corregidos que corresponden al 0 y 100 %. El

tiempo requerido para el 50 % de la consolidación bajo cualquier incremento de carga, se puede hallar gráficamente a partir de la curva de asentamiento-logaritmo del tiempo para dicho incremento, observando el tiempo que corresponda al 50 % de la consolidación primaria de la curva.

Para cada incremento de carga en el cual se obtuvieron lecturas de tiempo-asentamiento, se calcula el coeficiente de consolidación, Cv, así:

$$Cv = \frac{0.197H^2}{t_{50}}$$

Donde:

H= altura de la muestra en metros (pies) para una muestra con drenaje doble al 50 % de consolidación.

T50= tiempo para el 50 % de consolidación en años, y

Cv= coeficiente de Consolidación en m²/año (pies²/-año).

Si H está en mm y t en segundos o minutos, Cv quedará expresado en mm²/s o mm²/min, respectivamente, y será preferible hacer la conversión a unidades más convenientes. (INV E-151-07)

1.2.2 Método de la raíz cuadrada del tiempo

Los pasos para el método de raíz cuadrada de tiempo (Taylor, 1942) son los siguientes:

1. Trace la lectura del dial y la raíz cuadrada de tiempo vs t.
2. Dibuje la tangente PQ a la porción temprana de la gráfica.
3. Dibuje una línea PR tal que OR = (1.15) (OQ).

4. La abscisa del punto S (es decir, la intersección de PR y la consolidación curva) dará t90 (es decir, la raíz cuadrada de tiempo para 90% de consolidación).
5. El valor de Tυ para Uav = 90% es 0.848. Así que:

$$Cv = \frac{0.848H^2}{t_{90}}$$

1.2.3 Método computacional

El método computacional de Sivaram y Swamee (1977) se explica en los siguientes pasos:

1. Tenga en cuenta dos lecturas de marcación, d1 y d2, y sus tiempos correspondientes, t1y t2, desde la fase temprana de consolidación. ("Fase inicial" significa que el grado de consolidación debe ser menor al 53%)
2. Tenga en cuenta una lectura de marcado, d3, en el tiempo t3 después de que haya tenido lugar una liquidación considerable.
3. Determine d0 como

$$d_0 = \frac{d_1 - d_2\sqrt{\frac{t_1}{t_2}}}{1 - \sqrt{\frac{t_1}{t_2}}}$$

4. Determine d100 como

$$d_{100} = d_0 - \frac{d_0 - d_3}{\left\{1 - \left[\frac{(d_0 - d_3)(\sqrt{t_2 - t_1})}{(d_1 - d_2)\sqrt{t_2}}\right]^{5.6}\right\}^{0.179}}$$

5. Determine Cv como

$$C_v = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_0 - d_2}{d_0 - d_{100}}\frac{H}{\sqrt{t_2 - t_1}}\right)^2$$

Donde H es la mayor distancia de drenaje

1.2.4 Correlaciones empíricas

Con base en pruebas de laboratorio, Raju et al. (1995) propuso la siguiente expresión empírica para predecir el coeficiente de consolidación de arcillas normalmente consolidadas no cementadas:

$$C_v = \left[\frac{1 + e_L\,(1.23 - 0.276\ \log \sigma'_0)}{e_L}\right]\left[\frac{10^{-3}}{(\sigma'_0)^{0.353}}\right]$$

Dónde

Cv es el coeficiente de consolidación (cm2 / s)

σ'_0 es la presión de sobrecarga efectiva (kN / m2)

e_L es la relación de vacío en el límite líquido

Tenga en cuenta que

$$e_L = \left[\frac{LL(\%)}{100}\right] G_s$$

Donde

LL es el límite líquido

Gs es la gravedad específica de los sólidos del suelo

1.2.5 Método de correlación con el coeficiente de permeabilidad

Taylor (1948) propuso una relación lineal entre el logaritmo de k y la proporción de vacíos como:

$$\log k = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k}$$

Donde; k_0 in situ conductividad hidráulica en una relación de vacíos e_0 y C_k es el índice de cambio de conductividad hidráulica.

Teniendo en cuenta el tipo de actividad de la arcilla (ver Tabla *2*) se ingresa a la siguiente grafica para conocer la conductividad hidráulica *k* con la cual se logra calcular el coeficiente de consolidación C_v con la siguiente expresión:

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w m_v}$$

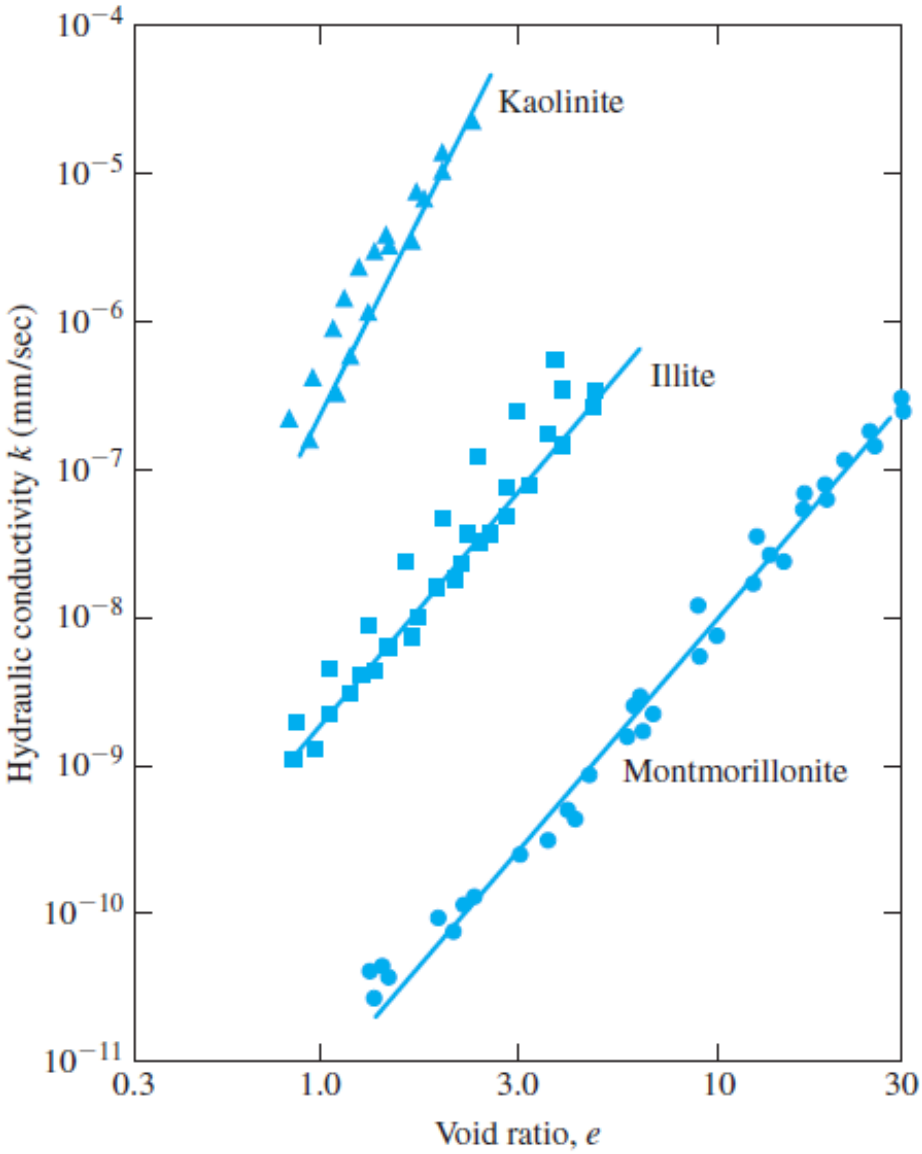


Figura 11 Variación de la conductividad hidráulica de los minerales de arcilla de sodio
Fuente: Braja – Principles of geotechnical engineering (2014)

1.2.6 Correlación entre el límite líquido y Cv

Se obtiene con ayuda de la figura 1.24 (p.48) capítulo uno del libro de Principios de Ingeniería de Cimentaciones-Braja M Das (2001). Donde se ingresa con el valor del límite líquido y de acuerdo al tipo de muestra (inalteradas, completamente remodeladas).

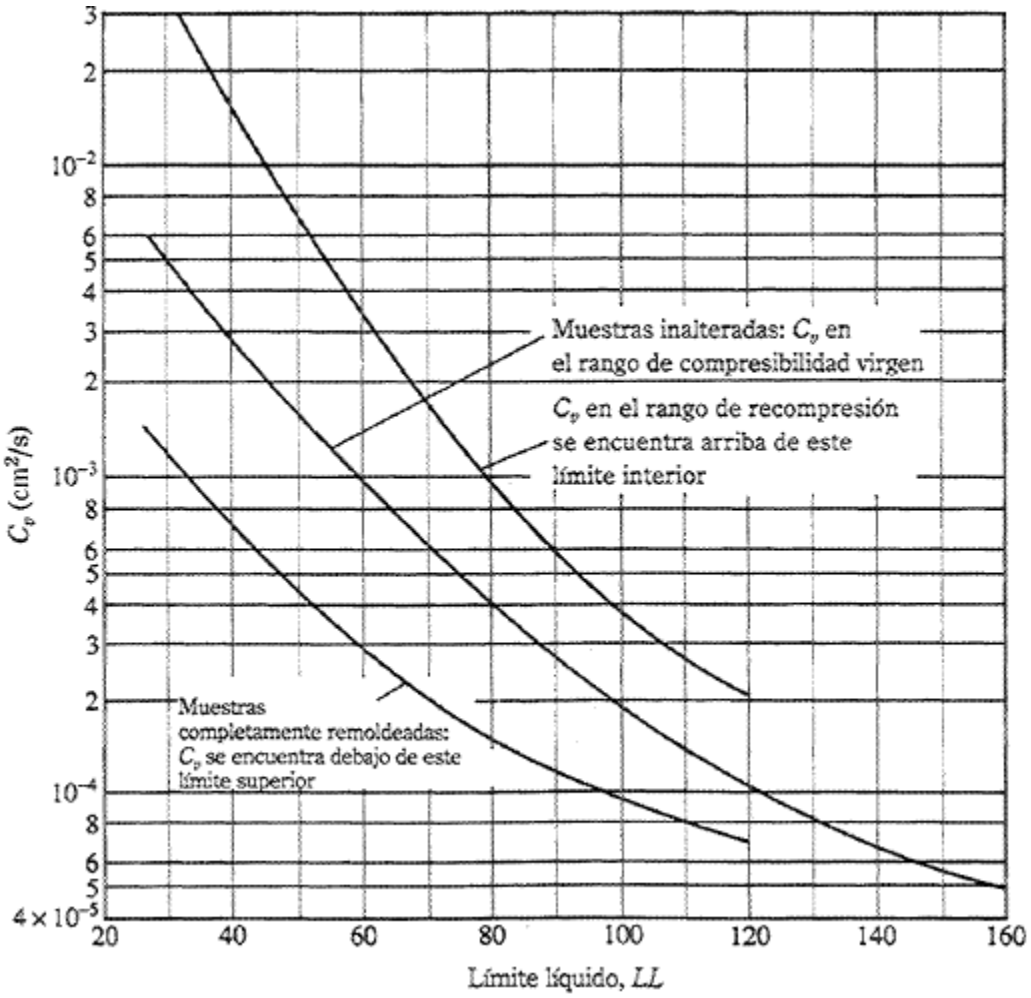


Figura 12 Rango de C_v

Fuente: Braja – Principios de Ingeniería Geotécnica (2001)

1.2.7 Método de la hipérbola rectangular

El método hipérbola rectangular (Sridharan y Prakash, 1985) se fundamenta en la relación existente entre el tiempo y el grado de consolidación el cual para los autores es de 60% ≤ Uav ≤ 90%, la relación es lineal y se puede expresar como:

$$\frac{T_v}{U_{av}} = 8.208X10^{-3}T_v + 2.44X10^{-3}$$

Usando la misma analogía, los resultados de la prueba de consolidación se pueden trazar en forma gráfica como t / ΔHt versus t (donde t es el tiempo y ΔHt es deformación del espécimen). Ahora el siguiente procedimiento puede ser utilizado para estimar Cv

1. Identifique la porción de línea recta, bc, y proyecte de nuevo a d.
2. Determine la intersección, D.
3. Determine la pendiente m de la línea bc.
4. Calcule Cv como

$$C_v = 0.3\left(\frac{mH^2}{D}\right)$$

Donde H es la longitud de la mayor distancia de drenaje.

1.2.8 Método ΔH_t – t / ΔH_t

De acuerdo con el método ΔHt - t / ΔHt (Sridharan y Prakash, 1993) se muestran los siguientes pasos:

1. Grafique la variación de ΔHt versus t / ΔHt como se muestra en la figura (Nota: t es el tiempo y ΔHt es la compresión de la muestra en el momento t)
2. Dibuje la tangente PQ a la porción temprana de la gráfica.
3. Dibuje una línea PR tal que
4. OR = (1.33) (OQ)
5. Determine la abscisa del punto S, que da t90 / ΔHt de donde t90 puede ser calculado
6. Calcule Cv como:

$$C_v = \frac{0.84\ H^2}{t_{90}}$$

1.2.9 Método de la etapa temprana del logaritmo del tiempo.

El método log t en etapas tempranas (Robinson y Allam, 1996), es una extensión del método de logaritmo de tiempo, se basa en la deformación del espécimen contra el diagrama de logaritmo del tiempo. De acuerdo a este método, siga el método de logaritmo de tiempo para determinar d0.

1. Dibuje una línea horizontal DE a d0.
2. Dibuje una tangente a través del punto de inflexión F. La tangente intersecta la línea DE en el punto G.
3. Determine el tiempo t correspondiente a G, que es el tiempo en Uav = 22.14%. Así que

$$C_v = \frac{0.0385\ H^2}{t_{22.14}}$$

Finalmente se hallan los coeficientes de consolidación para cada sondeo y muestra obtenido y se clasifican los resultados obtenidos en tablas y gráficas (ver Tabla *8* y Anexo *2*)

1.3 Etapa III

Se analizó y se comparó los resultados obtenidos con el fin de evidenciar las relaciones existentes entre cada uno de los métodos aplicados.

Adicionalmente se relacionaron los datos obtenidos con otros parámetros propios de cada suelo estudiado para establecer las diferencias o similitudes existentes entre los coeficientes y tiempos de consolidación calculados con el comportamiento típico del suelo. Se usaron los resultados obtenidos en modelos de cimentación superficial y profunda para establecer las diferencias y similitudes entre los tiempos de consolidación con los métodos utilizados.

Los resultados se presentan en el presente informe y al finalizar, en los anexos, se encuentran las memorias de cálculos que evidencien en detalle el proceso realizado.

2 ENSAYOS DE LABORATORIO

Para la ejecución del presente proyecto, se realizó la recopilación de siete (7) estudios de suelos de la ciudad de Bogotá, los cuales se obtuvieron de la firma LFO Ingenieros de Suelos; en la siguiente imagen, se muestran ubicados estos estudios de suelos identificados sobre el mapa de microzonificación sísmica de Bogotá.

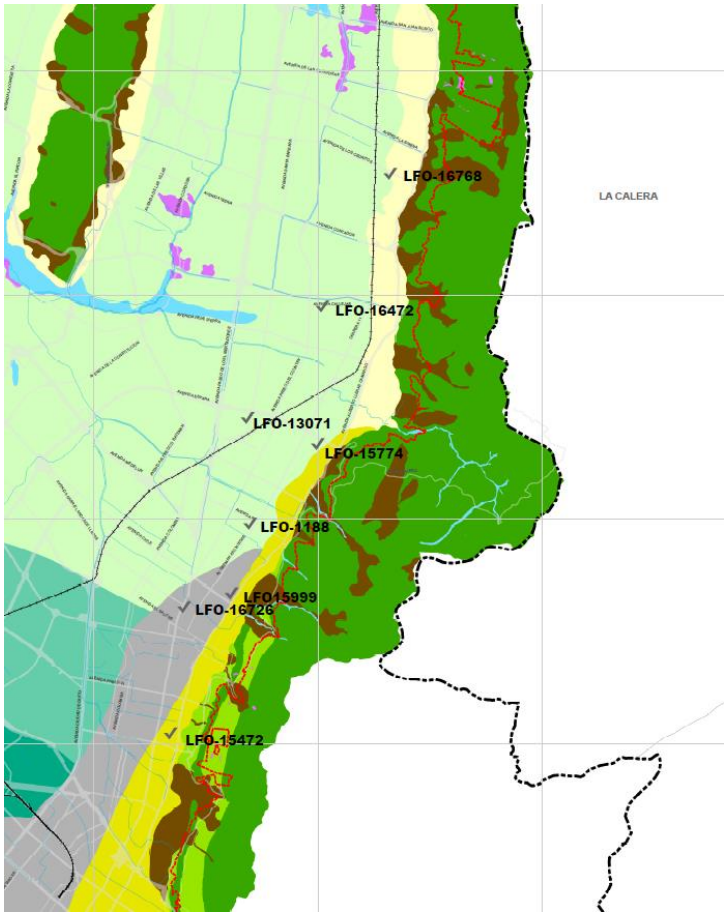


Figura 13 Microzonificación Sísmica de Bogotá
Fuente: Decreto 523 de 2010

Posteriormente, se crearon los formatos de resumen de laboratorio en los cuales se relacionó la información consultada para cada uno de los estudios.

2.1 Tabulación ensayos de laboratorio

En las siguientes tablas se describen los ensayos recolectados y seleccionados para la elaboración de los cálculos que permitieron obtener el coeficiente de consolidación.

Tabla 5 *Estudios recolectados*
Fuente: Elaboración de los autores

N°	Fecha	Empresa	Nombre del Estudio	Dirección
1	Noviembre de 2017	LFO 1188	Centro Comercial y de negocios - Centro Andino	Calle 82 Cra 11
2	Junio de 2018	LFO 13071	Instituto Colombo Americano	Transversal 17 entre calles 98 y calle 100
3	Diciembre de 2017	LFO 13411	Centro Comercial la Felicidad	Avenida Boyacá con calle 13
4	Julio de 2015	LFO 15774	Estabilización del muro de cerramiento Bellavista	Carrera 9A con calle 98
5	Enero de 2018	LFO 16690	Parque Fontanar del Rio	Suba
6	Enero de 2018	LFO 16726	Edificio Carrera 56	Carrera 56 Bis N 9 - 46/64/76
7	Enero de 2018	LFO-16742	Edificio Itaca	Carrera 14 B N 119-62
8	Mayo de 2018	LFO 16749	Proyecto Reserva de Magdale	Carrera 67 N 58-11 sur
9	Octubre de 2018	LFO 16988	Edificio Transversal 58 N 106	Transversal 58 N 106 41
10	Abril de 2016	LFO 15999	Hotel Avenida Chile	Calle 72 Cra 7
11	Octubre de 2018	LFO 16991	Calle 62 N 24-25	Calle 62 N 24-25
12	Mayo de 2015	LFO 15472	Calle 44 N 8 44	Calle 44 N 8 44
13	Julio de 2015	LFO 16791	Calle 15 Cra 52	Calle 15 Cra 52
14	Marzo de 2018	LFO 16768	Edificio Cedro Golf	Carrera 7F N 148-85

Tabla 6 *Estudios seleccionados*

Fuente: Elaboración de los autores

N°	Fecha	Empresa	Nombre del Estudio	Dirección	ZONA GEOTECNICA	DESCRIPCIÓN
2	Junio de 2018	LFO 13071	Instituto Colombo Americano	Transversal 17 entre calles 98 y calle 100	Lacustre A	Suelo Lacustre muy blando con origen de terraza alta - lacustre compuesto por arcillas limosas muy blandas de muy baja a media capacidad portante y muy compresibles
4	Julio de 2015	LFO 15774	Estabilización del muro de cerramiento Bellavista	Carrera 9A con calle 98	Lacustre A	
6	Enero de 2018	LFO 16726	Edificio Carrera 56	Carrera 56 Bis N 9 - 46/64/76	Aluvial	Suelo Aluvial grueso a medio con origen de terraza baja aluvial y complejo de conos aluviales y arenas arcillosas sueltas a compactas de alta capacidad portante. Suelos poco compresibles susceptibles a licuación e insestables en excavaciones a cielo abierto
7	Enero de 2018	LFO-16742	Edificio Itaca	Carrera 14 B N 119-62	Lacustre A	Suelo Lacustre muy blando con origen de terraza alta - lacustre compuesto por arcillas limosas muy blandas de muy baja a media capacidad portante y muy compresibles
10	Abril de 2016	LFO 15999	Hotel Avenida Chile	Calle 72 Cra 7	Aluvial	Suelo Aluvial grueso a medio con origen de terraza baja aluvial y complejo de conos aluviales y arenas arcillosas sueltas a compactas de alta capacidad portante. Suelos poco compresibles susceptibles a licuación e insestables en excavaciones a cielo abierto
12	Mayo de 2015	LFO 15472	Calle 44 N 8 44	Calle 44 N 8 44	Lacustre A	Suelo Lacustre muy blando con origen de terraza alta - lacustre compuesto por arcillas limosas muy blandas de muy baja a media capacidad portante y muy compresibles
14	Marzo de 2018	LFO 16768	Edificio Cedro Golf	Carrera 7F N 148-85	Lacustre A	

Nota:La clasificación de los estudios de suelos dentro de las zonas de geotécnicas y su descripción se tomaron del decreto 523 de 2010

2.3 Perfiles estratigráficos obtenidos

A continuación, se describen los perfiles estratigráficos obtenidos.

2.3.1 LFO 13071

Tabla 7 *Perfil LFO-1371 S2*

Fuente: Elaboración de los autores

Sondeo	NF	Profundidad (m)		Descripción	Muestra	Z(m)	Wn (%)	γ(kN/m3)	σo (Kn/m2)	μ (kN/m3)	σ'o (kN/m2)	σ'o (kN/m2)
		0	2	Recebo arenoso café		2	1,41	13,832	27,664	0,000	27,664	27,66
		2	2,4	Arcilla orgánica café clara con raicillas. Consistencia plástica		2,4	1,41	13,832	5,533	0,000	5,533	33,20
		2,4	3	Arcilla gris vetada con raicillas. Consistencia media		3	1,41	13,832	8,299	0,000	8,299	41,50
		3	3,7	Limo arcillosos gris oscuro Consistencia media		3,7	1,41	13,832	9,682	0,000	9,682	51,18
		3,7	4			4	1,41	13,832	4,150	0,000	4,150	55,33
				Limo arcilloso gris oscuro. Consistencia media								
S-2	4,6	4	4,6			4,6	1,41	13,832	8,299	45,126	53,425	108,75
	6,7	4,6	6,7		1 (6,00-6,70)	6,35	1,41	13,832	24,206	20,601	44,807	153,56
	11	6,7	11	Limo arcilloso café. Consistencia plástica a blanda		11	1,4	13,734	63,863	42,183	106,046	259,61
	11,7	11	11,7		2 (11,00-11,70)	11,35	1,4	13,734	4,807	6,867	11,674	271,28

Perfil Típico: Rellenos en recebo hasta 2,00 m. Arcillas de tonalidades grisáceas de alta compresibilidad intercaladas con lentes de limos arcillosos entre los 2,00 y los 3,00 m de profundidad. Registra agua freática a 4,60 m de profundidad.

Presenta valores de humedad natural entre 70 y 118% aproximadamente y valores de límite líquido entre 75% y 154%, así como un peso unitario de 1,4 Tn/m3. De acuerdo con los parámetros de límites de Atterberg (Universidad Nacional) se clasificó esta arcilla como una montmorillonita, por medio del diagrama se obtuvieron valores de permeabilidad del orden de 10-08 (cm/s)

2.3.2 LFO 15472

Dirección: Calle 44 N 8-44

Perfil típico: La información del perfil estratigráfico registra rellenos en escombro dentro del primer metro de perforación, entre 1,00 y 5,00 m se registran arcillas limosas de consistencia variable, entre 5,00 y 11,50 metros de profundidad se encontraron arcillas limosas café de consistencia blanda; para las profundidades inferiores a este nivel y hasta 20,00 m se observaron arcillas limosas. A partir de los 20,00 m de sondeo se registró roca arcillolita de color rojo. La posición del nivel freático se encontró a partir de 4,50 de profundidad aproximadamente, sin embargo, al encontrar roca se encontraron resaltos de agua.

Para los materiales encontrados se obtuvieron valores de humedad natural entre 27 y 30% para los primeros 7,00 m; entre 8,00 y 10,00 m de profundidad se encontraron valores de humedad y límite líquido mayores a 50% clasificándolas como arcillas de alta compresibilidad. A partir de este nivel se registraron valores bajos de humedad natural y límites de Atterberg clasificando el suelo encontrado como arcilla de baja compresibilidad, sin embargo, se las muestras

seleccionadas para realizar el ensayo de consolidación fueron tomadas desde los 10,00 m hasta los 19,00 de profundidad.

De acuerdo con los valores de límite líquido e índice de plasticidad registrados en los ensayos de laboratorio del estudio de suelos se clasificó la arcilla como Caolinita y con la relación de vacíos del suelo se obtuvieron coeficientes de permeabilidad de orden de 10-09 (cm/s).

2.3.3 LFO 15774

Perfil típico: Entre 0,00 y 1,50 m de profundidad se encontraron rellenos en tierra y recebo, entre 1,50 m y 4,50 m aproximadamente se registraron arcillas de consistencia blanda y se halló agua freática a 2,50 m. A partir de 4,50 y hasta 32,00 m se observaron limos de consistencia blanda, finalmente se encontraron arenas y gravas has 38,50 m. Las muestras a las que se les realizó ensayo de consolidación se obtuvieron entre 21,00 y 31,00 m.

Los valores de humedad natural y límites de Atterberg registrados fueron de 140% y 148,7% para profundidades entre 4,00 y 32,00 m valores aparentemente afectados por el contenido de materia orgánica y la posición del nivel freático del terreno. De acuerdo con los valores obtenidos de límites de consistencia se observó que el suelo está compuesto por montmorillonitas las cuales presentan coeficientes de permeabilidad del orden de 10-09 (cm/s).

Para profundidades mayores a 32,00 m se encontraron montmorillonitas con coeficiente de actividad de 2,39

2.3.4 LFO 15999

Perfil típico: De este estudio de suelos se obtuvo un perfil estratigráfico más elaborado debido a la cantidad de información encontrada como se describe a continuación: Dentro de los primeros

5,00 m de profundidad se encontraron rellenos en escombro de los cuales no se obtuvo mayor información, posteriormente se encontró una capa de arcilla veteada de consistencia media hasta 12,00 m de profundidad; a partir de este nivel se observó un estrato de grava gruesa gris con l cual presenta espesores variables y se intercala con un lente de limo arcilloso café de aproximadamente 4,00 m de espesor, finalmente en algunos sectores del terreno explorado aparece un lente de arcilla arenosa y finalmente entre los 20,00 y los 30,00 m de profundidad se encuentra un estrato de grava.

En cuanto a los ensayos de laboratorio, para las profundidades entre 2,00 y 4,00 m se encontraron valores de humedad natural y límite líquido de 27% y 48% respectivamente los cuales se mantuvieron dentro de ese rango en todo el perfil estratigráfico en general se encontraron arcillas de baja compresibilidad (ver resumen de laboratorio) las cuales en función de los límites de atterberg y el porcentaje de finos se clasificaron como caolinitas, se obtuvieron valores de permeabilidad del orden de 10-09. A continuación, se relaciona el perfil construido por los investigadores el cual se encuentra dentro del documento

2.3.5 LFO-16726

Perfil típico: Dentro de los primeros 1,50 m de exploración se encontraron rellenos con recebo y piedra, y se encontraron arcillas limosas en tonalidades grisáceas entre los primeros 15,00 m de profundidad, sobre los 22,00 m se encontraron arcillas con contenido de materia orgánica. Se encontraron suelos de alta compresibilidad en profundidades mayores 15,00 m clasificando el tipo de arcillas como montmorillonitas las cuales presentan valores de permeabilidad de 10-10 cm/s aprox.

2.3.6 LFO-16742

Perfil típico: Este estudio de suelos presenta arcillas de alta compresibilidad en toda su profundidad, es decir entre 0 y 10,00 m, se registró agua freática a una profundidad de 4,50 m. Presenta valores de límite líquido y humedad natural por encima de 10% y porcentajes pasa 200 mayores a 50%, valores de peso específico entre 1,3 y 1,45 Tn/m3. Son arcillas potencialmente compresibles tipo montmorillonita las cuales presentan coeficientes de permeabilidad bajos del orden de 10-10 cm/s.

CAPITULO IV

1 OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE CONSOLIDACIÓN

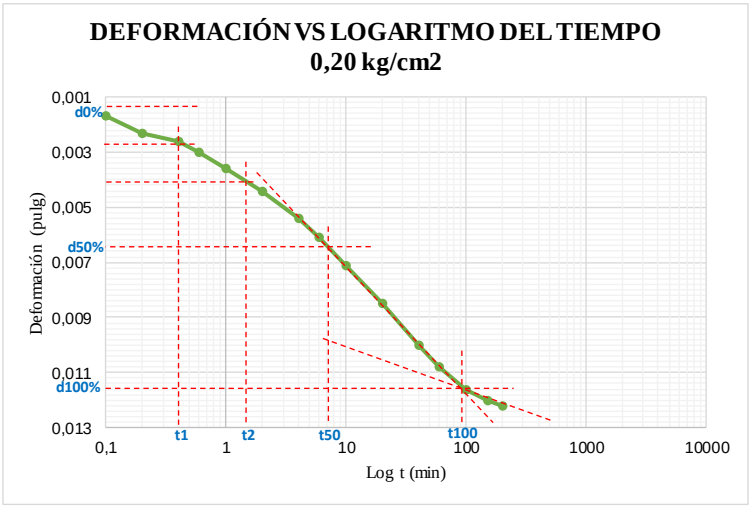
Los siguientes resultados fueron calculados a partir del estudio de suelos LFO-13071

1.1 Método logaritmo del tiempo

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DEL LOGARITMO DEL TIEMPO**	

ESTUDIO DE SUELOS	LFO-13071
DIRECCIÓN	CALLE 82 CON CARRERA 11
SONDEO	2
MUESTRA	1

TIEMPO (min)	Log t (min)	0,20 kg/cm2 (pulg)
0		0
0,1	-1,0000	0,0017
0,2	-0,6990	0,0023
0,4	-0,3979	0,0026
0,6	-0,2218	0,003
1	0	0,0036
2	0,3010	0,0044
4	0,6021	0,0054
6	0,7782	0,0061
10	1	0,0071
20	1,3010	0,0085
40	1,6021	0,01
60	1,7782	0,0108
100	2	0,0116
150	2,1761	0,012
200	2,3010	0,0122
300	2,4771	
400	2,6021	
1440	3,1584	



d100	0,0116	**t50 (min)**	7
d0	0,0012		
		t50 (seg)	420
d50	0,0064		
		H' (cm)	1,05
t1 (min)	0,4		
t2 (min)	1,6	**Cv (cm2/s)**	5,17E-04

Figura 14 Cálculo del Cv método logaritmo del tiempo
Fuente: Elaboración de los autores

1.2 Método de Taylor

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DEL LA RAIZ CUADRADA DEL TIEMPO

ESTUDIO DE SUELOS		LFO-13071		
DIRECCIÓN		CALLE 82 CON CARRERA 11		
SONDEO	2	**PROFUNDIDAD (m)**	6,00	6,70
MUESTRA	1			

TIEMPO (min)	**Raiz t (min)**	**0,20 kg/cm2 (pulg)**
0	0	0
0,1	0,316	0,0017
0,2	0,447	0,0023
0,4	0,632	0,0026
0,6	0,775	0,003
1	1,000	0,0036
2	1,414	0,0044
4	2,000	0,0054
6	2,449	0,0061
10	3,162	0,0071
20	4,472	0,0085
40	6,325	0,01
60	7,746	0,0108
100	10,000	0,0116
150	12,247	0,012
200	14,142	0,0122
300	17,321	

O	0	**t90 (min)**	2,5
Q	4,5	**t90 (s)**	150
OQ	4,5	**H' (cm)**	1,05
OR	5,175	**Cv (cm2/s)**	4,16E-05

Figura 15 Cálculo del Cv método raíz del tiempo
Fuente: Elaboración de los autores

1.3 Correlaciones empíricas

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS

ESTUDIO DE SUELOS		LFO-13071			
DIRECCIÓN		CALLE 82 CON CARRERA 11			
SONDEO	2	**PROFUNDIDAD (m)**	6,00	-	6,7
MUESTRA	1	**FECHA**	00/01/1900		

1 **Datos de entrada****

LL(%)	Gs	σ'0 (KN/m2)
156,3	2,69	153,56

Datos tomados del resumen de ensayo de laboratorio

2 **Relación de vacíos en el límite líquido**

Calculado por medio de la siguiente expresión

$$e_L = \left[\frac{LL(\%)}{100}\right] G_s$$

eL	4,20447

3. **Coeficiente de consolidación**

$$C_v = \left[\frac{1 + e_L(1.23 - 0.276 \log \sigma'_0)}{e_L}\right]\left[\frac{10^{-3}}{(\sigma'_0)^{0.353}}\right]$$

Cv (cm2/s)	1,46E-04

Nota: Este método fue propuesto para predecir el coeficiente de consolidación de arcillas normalmente consolidadas no cementadas

Figura 16 Cálculo del Cv método correlaciones empíricas
Fuente: Elaboración de los autores

1.4 Correlación con el coeficiente de permeabilidad

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - CORRELACI´´ON CON EL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD**	

ESTUDIO DE SUELOS		LFO-13071			
DIRECCIÓN		CALLE 82 CON CARRERA 11			
SONDEO	2	**PROFUNDIDAD (m)**	6,00	-	6,70
MUESTRA	1				

LL	LP	eprom	Tipo de Arcilla	Cv /cm2/s)
156,3	39,7	2,302	Montmorillonita	3,18E-07

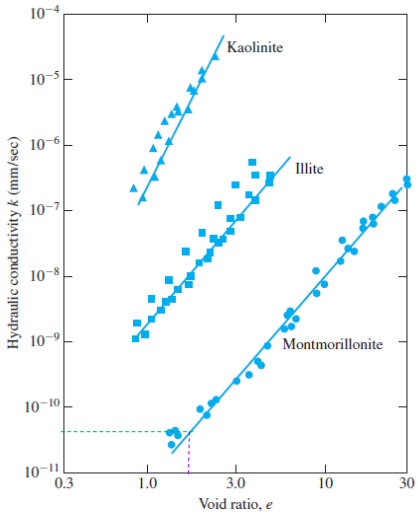


Figure 7.16 Variation of hydraulic conductivity of sodium clay minerals (*Based on Mesri and Olson, 1971*)

P(kg/cm2)	e	Δe	Δσ'	eav	av (kg/cm2)^-1	mv (cm2/s)	γw (kg/cm3)	k(cm/s)	Cv (cm2/s)
0	2,959								
0,2	2,901	0,058	0,2	0,257	0,290	0,231	0,001	1,00E-10	4,33E-07
0,4	2,822	0,079	0,2	0,257	0,395	0,314	0,001	1,00E-10	3,18E-07
0,8	2,709	0,113	0,4	0,257	0,283	0,225	0,001	1,00E-10	4,45E-07
1,6	2,402	0,307	0,8	0,257	0,384	0,305	0,001	1,00E-10	3,28E-07
3,2	1,984	0,418	1,6	0,257	0,261	0,208	0,001	1,00E-10	4,81E-07
6,4	1,478	0,506	3,2	0,257	0,158	0,126	0,001	1,00E-10	7,95E-07
12,8	1,16	0,318	6,4	0,257	0,050	0,040	0,001	1,00E-10	2,53E-06

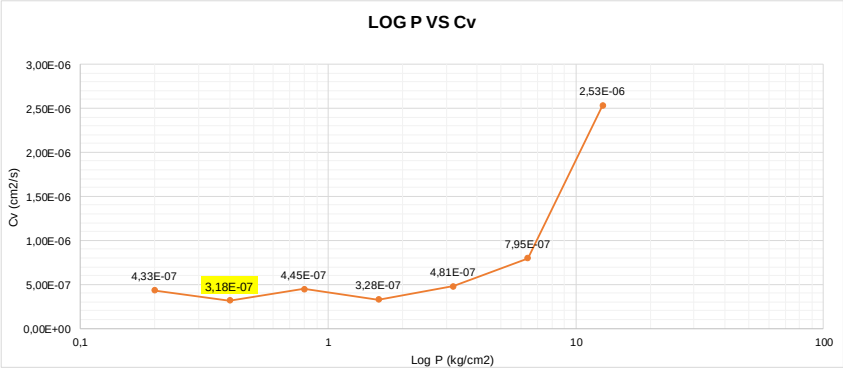
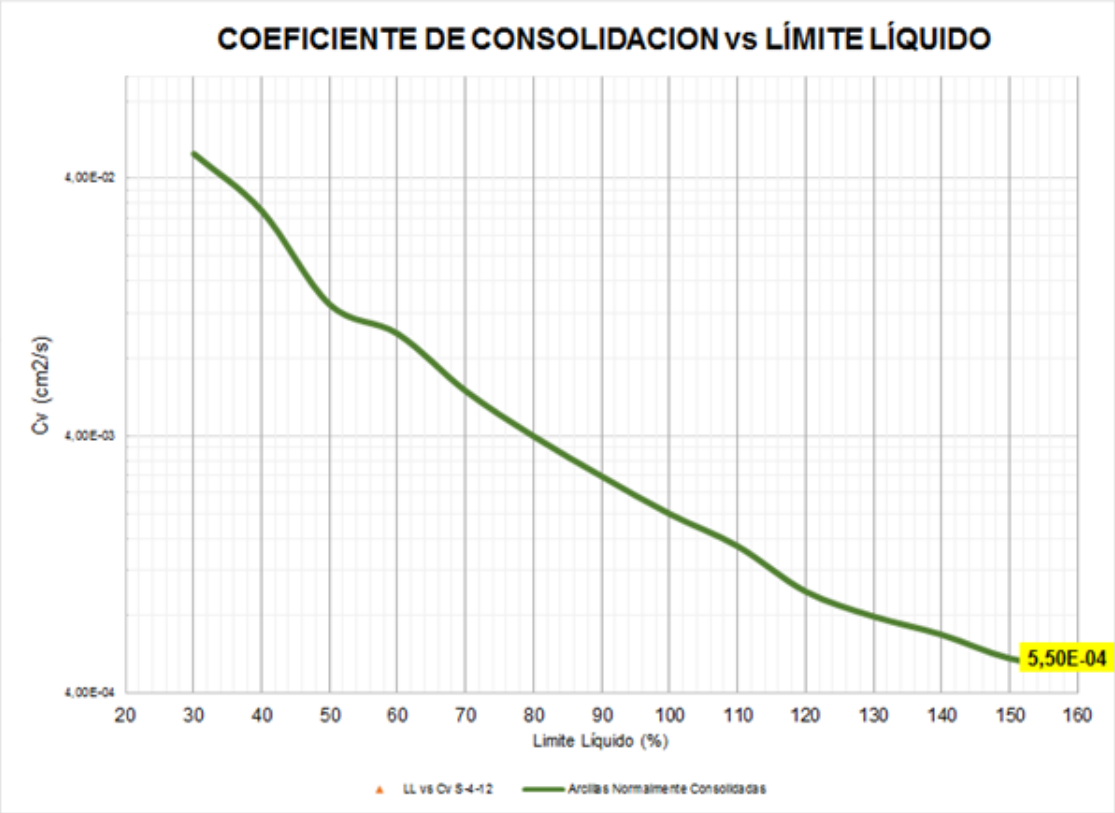


Figura 17 Cálculo del Cv método correlación con el coeficiente k
Fuente: Elaboración de los autores

1.5 Correlación con el límite liquido

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - CORRELACIÓN ENTRE EL LÍMITE LIQUIDO Y Cv.

ESTUDIO DE SUELOS		LFO-13071			
DIRECCIÓN		CALLE 82 CON CARRERA 11			
SONDEO	2	**PROFUNDIDAD (m)**	6,00	-	6,7
MUESTRA	1				



Sondeo	Muestra	Profundidad (m)			Límite Líquido (%)	Cv (cm2/s)
2	1	6	0	6,7	156,3	5,50E-04

Nota: La curva de consolidación se tomo de l tabla 1.24 del libro Fundamentos de ingenieria de Cimentaciones (Braja M Das), y es utilizada por el departamento de la Marina de Estados Unidos los valores que muesta la curva de LL vs Cv aplican para arcillas normalmente consolidadas

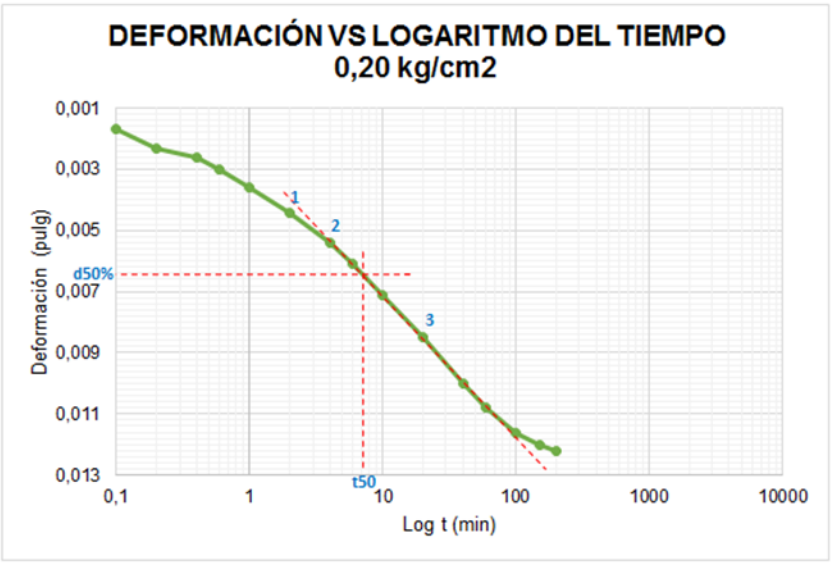
Figura 18 Cálculo del Cv método correlación con LL
Fuente: Elaboración de los autores

1.6 Método computacional

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO COMPUTACIONAL**	

ESTUDIO DE SUELOS		LFO-13071			
DIRECCIÓN		CALLE 82 CON CARRERA 11			
SONDEO	2	**PROFUNDIDAD (m)**	6,00	-	6,70
MUESTRA	1				

TIEMPO (min)	**0,20 kg/cm2 (pulg)**
0	
0,1	0,0017
0,2	0,0023
0,4	0,0026
0,6	0,003
1	0,0036
2	0,0044
4	0,0054
6	0,0061
10	0,0071
20	0,0085
40	0,01
60	0,0108
100	0,0116
150	0,012
200	0,0122
300	
400	
1440	



d1	0,004			**t1**	2, min	120, seg
d2	0,0054			**t2**	4, min	240, seg
d3	0,0085			**t3**	20, min	1200, seg
		H' (cm)	1,05			
d0	0,0006201			**d100**	0,0088	
		Cv (cm2/s)	7,21E-03			

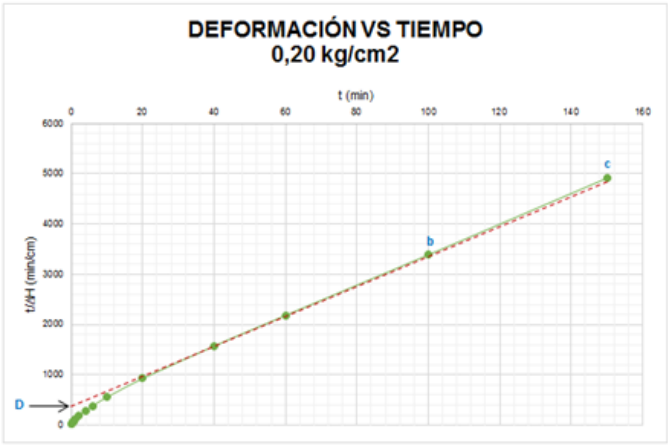
Figura 19 Cálculo del Cv método computacional
Fuente: Elaboración de los autores

1.7 Método de la hipérbola rectangular

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DE LA HIPÉRBOLA RECTANGULAR

ESTUDIO DE SUELOS		LFO-13071				
DIRECCIÓN		CALLE 82 CON CARRERA 11				
SONDEO	2	**PROFUNDIDAD (m)**	6,00	-	6,70	
MUESTRA	1	**FECHA**	07/06/2018			

TIEMPO (min)	0,20 kg/cm2 (pulg)	ΔH (cm)	t/ΔH (min/cm)
0			
0,1	0,0017	0,004318	23,16
0,2	0,0023	0,005842	34,23
0,4	0,0026	0,006604	60,57
0,6	0,003	0,00762	78,74
1	0,0036	0,009144	109,36
2	0,0044	0,011176	178,95
4	0,0054	0,013716	291,63
6	0,0061	0,015494	387,25
10	0,0071	0,018034	554,51
20	0,0085	0,02159	926,35
40	0,01	0,0254	1574,80
60	0,0108	0,027432	2187,23
100	0,0116	0,029464	3393,97
150	0,012	0,03048	4921,26
200	0,0122	0,030988	6454,11
300			
400			
1440			



b (t/ΔH)	3393,97	**m**	30,5458	
c (t/ΔH)	4921,26			
		D	400, min/cm	24000, seg/cm
b (t)	100			
c (t)	150	**H' (cm)**	1,05	
		Cv (cm2/s)	0,00042096	

Figura 20 Cálculo del Cv método hipérbola rectangular
Fuente: Elaboración de los autores

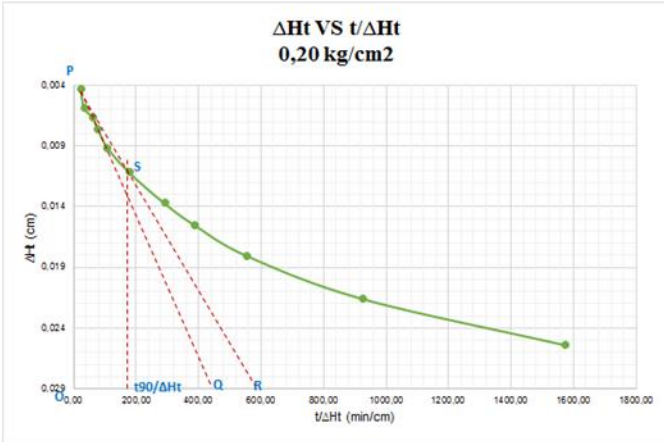
1.8 Método ΔH_t – t / ΔH_t

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO ΔHt - t / ΔHt

ESTUDIO DE SUELOS		LFO-13071			
DIRECCIÓN		CALLE 82 CON CARRERA 11			
SONDEO	2	**PROFUNDIDAD (m)**	6,00	-	6,70
MUESTRA	1				

TIEMPO (min)	0,20 kg/cm2 (pulg)	ΔHt (cm)	t/ΔHt (min/cm)
0			
0,1	0,0017	0,004318	23,16
0,2	0,0023	0,005842	34,23
0,4	0,0026	0,006604	60,57
0,6	0,003	0,00762	78,74
1	0,0036	0,009144	109,36
2	0,0044	0,011176	178,95
4	0,0054	0,013716	291,63
6	0,0061	0,015494	387,25
10	0,0071	0,018034	554,51
20	0,0085	0,02159	926,35
40	0,01	0,0254	1574,80
60	0,0108	0,027432	2187,23
100	0,0116	0,029464	3393,97
150	0,012	0,03048	4921,26
200	0,0122	0,030988	6454,11
300			
400			
1440			



OQ	440	**t90/ΔHt**	178,95	
OR	585,2	**S ΔHt**	0,0111	
H' (cm)	1,05	**t90**	2, min	119,2 seg

Cv (cm2/s) 0,00784456

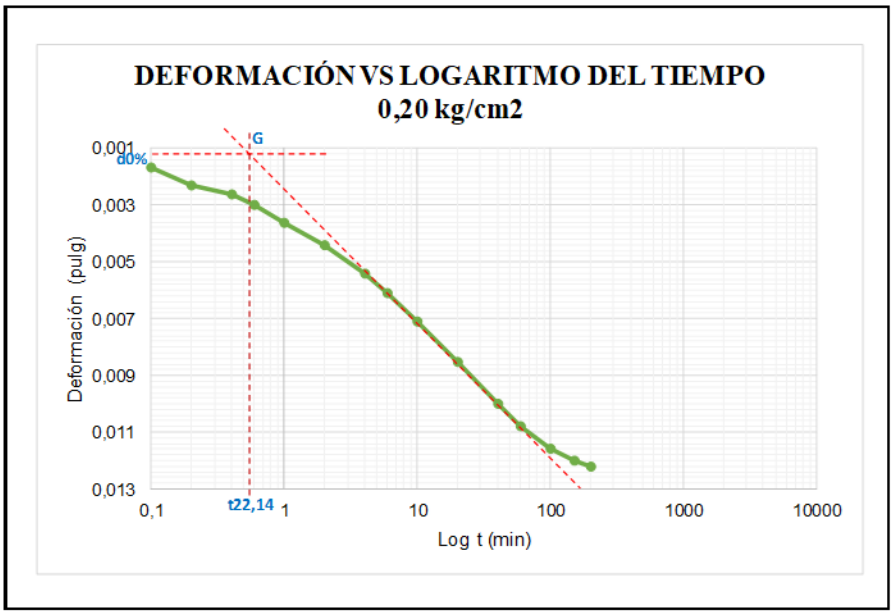
Figura 21 Cálculo del Cv método ΔHt – t / ΔHt
Fuente: Elaboración de los autores

1.9 Método de la etapa temprana del logaritmo del tiempo.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DE LA ETAPA TEMPRANA DEL LOGARITMO DEL TIEMPO**	

ESTUDIO DE SUELOS		LFO-13071			
DIRECCIÓN		CALLE 82 CON CARRERA 11			
SONDEO	2	**PROFUNDIDAD (m)**	6,00	-	6,70
MUESTRA	1	**FECHA**	07/06/2018		

TIEMPO (min)	**0,20 kg/cm2 (pulg)**
0	0
0,1	0,0017
0,2	0,0023
0,4	0,0026
0,6	0,003
1	0,0036
2	0,0044
4	0,0054
6	0,0061
10	0,0071
20	0,0085
40	0,01
60	0,0108
100	0,0116
150	0,012
200	0,0122
300	
400	
1440	



H' (cm)	1,05			
t22,14	5,5 min	330, seg	**Cv (cm2/s)**	1,29E-04

Figura 22 Cálculo del Cv método etapa temprana del logaritmo del tiempo

Fuente: Elaboración de los autores

2 RESULTADOS

En la siguiente tabla se observan los resultados de los coeficientes de consolidación hallados para métodos propuestos.

Tabla 8 *Resultados de coeficiente de consolidación*

Fuente: Elaboración de los autores

ESTUDIO DE SUELOS	Sondeo	Muestra	Profundidad (m)			COMPARATIVO COEFICIENTE DE CONSOLIDACION								
						Logt	Taylor	Empiricas	Cv vs K	Cv Vs LL	Computacional	Hipébola Rectangular	ΔH-t/ΔHt	Etapa Temprana del Logt
13071	S-2	1	6		6,7	1,39E-04	1,71E-03	1,46E-04	3,18E-06	5,50E-04	1,27E-03	3,83E-04	7,79E-03	2,28E-04
13071	S-2	2	11		11,7	1,16E-04	1,71E-03	1,15E-04	No registra	7,50E-04	1,05E-03	6,21E-04	5,70E-03	1,77E-04
15472	S-6	12	14,02		14,63	3,28E-04	2,36E-04	2,07E-04	1,95E-04	5,00E-02	6,17E-03	9,85E-03	2,05E-02	1,07E-03
16768	S-1	10	9,75		10,36	9,05E-04	1,80E-03	1,24E-04	No Registr	7,50E-04	1,55E-02	1,30E-03	3,75E-03	1,44E-03
15774	S-5	9	9,75		10,36	4,69E-04	1,64E-04	2,04E-04	1,85E-04	2,30E-02	6,29E-03	9,85E-03	2,05E-02	1,07E-03
15774	S-5	15	18,89		19,5	3,28E-04	2,91E-04	2,07E-04	1,03E-04	5,25E-02	9,01E-03	1,21E-02	1,31E-02	9,17E-05
15774	S-1	18	21,95	-	22,56	1,64E-03	1,71E-03	9,04E-05	4,98E-07	6,00E-04	2,87E-02	1,04E-02	1,13E-02	2,29E-03
15774	S-1	28	39,32	-	39,93	5,30E-04	1,80E-03	No Registra	No Registra	No Registra	1,09E-02	2,22E-03	1,67E-02	8,56E-04
15774	S-2	23	30,48	-	31,09	5,86E-04	1,80E-03	No Registra	No Registra	1,10E-02	5,70E-03	5,69E-03	3,53E-03	1,05E-03
16742	S-3	2	10		10,7	9,62E-05	2,02E-03	1,19E-04	1,01E-05	6,00E-04	1,21E-03	2,02E-04	3,93E-03	7,94E-05
15999	S-5	6	5,48	-	6,09	3,62E-05	1,82E-03	3,11E-04	7,39E-05	3,00E-02	4,82E-04	1,18E-04	7,54E-04	5,78E-06
15999	S-12	5	3,96	-	4,57	3,62E-04	1,47E-03	4,60E-04	1,70E-04	5,00E-02	3,20E-03	1,76E-02	1,97E-02	1,83E-03
15999	S-4	5	3,35	-	3,96	2,90E-04	1,55E-03	5,17E-04	2,90E-05	No registra	1,96E-03	7,15E-03	1,36E-02	6,19E-03
15999	S-4	11	10,05	-	10,66	1,03E-03	1,80E-03	2,29E-04	7,96E-05	4,00E-02	1,45E-02	5,34E-03	5,41E-02	4,42E-03
15999	S-4	16	17,06	-	17,67	7,31E-04	1,71E-03	1,90E-04	8,56E-05	4,50E-02	7,36E-03	9,60E-03	2,23E-02	1,98E-03
16726	S-3	9	9,14		9,75	9,05E-03	2,00E-03	2,95E-04	7,67E-05	No se intersepta	9,81E-02	6,05E-02	1,97E-02	0,00E+00
16726	S-3	14	15,24		15,84	4,87E-04	4,87E-04	9,53E-05	7,44E-05	no se intersepta	7,19E-03	4,84E-03	6,50E-03	1,37E-03
16726	S-3	22	27,73		28,34	1,34E-03	1,80E-03	1,80E-03	0,00E+00	4,00E-04	1,40E-02	5,56E-03	1,65E-02	2,55E-03

2.1 Análisis de resultados

Al momento de obtener los coeficientes de consolidación de los estudios de suelos mencionados, se llevó a cabo una división de los estudios en función de la zona de microzonificación sísmica a la cual pertenecen y que se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 9 *Grupos de microzonificación sísmica*
Fuente: Elaboración de los autores

N°	Fecha	Empresa	ZONA GEOTECNICA	GRUPO DE ESTUDIO PARA ANALISIS DE RESULTADOS	DESCRIPCIÓN
1	Junio de 2018	LFO 13071	Lacustre A	GRUPO 1	Suelo Lacustre muy blando con origen de terraza alta - lacustre compuesto por arcillas limosas muy blandas de muy baja a media capacidad portante y **muy compresibles**
2	Julio de 2015	LFO 15774	Lacustre A	GRUPO 1	
3	Enero de 2018	LFO 16726	Aluvial	GRUPO 2	Suelo Aluvial grueso a medio con origen de terraza baja aluvial y complejo de conos aluviales y arenas arcillosas sueltas a compactas de alta capacidad portante. **Suelos poco compresibles** susceptibles a licuación e insestables en excavaciones a cielo abierto
4	Enero de 2018	LFO-16742	Lacustre A	GRUPO 1	Suelo Lacustre muy blando con origen de terraza alta - lacustre compuesto por arcillas limosas muy blandas de muy baja a media capacidad portante y **muy compresibles**
5	Abril de 2016	LFO 15999	Aluvial	GRUPO 2	Suelo Aluvial grueso a medio con origen de terraza baja aluvial y complejo de conos aluviales y arenas arcillosas sueltas a compactas de alta capacidad portante. **Suelos poco compresibles** susceptibles a licuación e insestables en excavaciones a cielo abierto
6	Mayo de 2015	LFO 15472	Lacustre A	GRUPO 1	Suelo Lacustre muy blando con origen de terraza alta - lacustre compuesto por arcillas limosas muy blandas de muy baja a media capacidad portante y **muy compresibles**
7	Marzo de 2018	LFO 16768	Lacustre A	GRUPO 1	

2.2 Descripción grupo 1

Dentro del grupo 1 se encuentran los suelos tipo lacustre A, son suelos lacustre muy blandos con origen de terraza alta - lacustre compuesto por arcillas limosas muy blandas de muy baja a media capacidad portante y muy compresibles.

2.3 Descripción grupo 2

Dentro del grupo 2 se encuentran los suelos tipo aluvial, suelo aluvial grueso a medio con origen de terraza baja aluvial y complejo de conos aluviales y arenas arcillosas sueltas a compactas de alta capacidad portante y suelos poco compresibles susceptibles a licuación e insestables en excavaciones a cielo abierto

2.4 Métodos para hallar el Cv

Como objetivo específico (3.1) del presente trabajo, se calculó el coeficiente de consolidación Cv a partir de nueve (9) métodos.

Para seleccionar el coeficiente de consolidación de cada sondeo el criterio de selección utilizado fue la condición de consolidación de la muestra ensayada, es decir para los valores obtenidos en cada prueba de carga se obtuvo un Cv.

Se obtuvo un gráfico correspondiente a la curva de la relación de vacíos (e) vs log P (carga) y en ella se ubicó tanto el esfuerzo efectivo a la profundidad de la muestra como el esfuerzo de preconsolidación tomado del ensayo del laboratorio real, esto además para determinar el caso de consolidación en que se encuentra el suelo estudiado.

Luego de obtener estos valores, se graficaron los coeficientes de consolidación obtenidos para cada una de las cargas del ensayo de laboratorio (Ensayo de consolidación unidimensional de los suelos INV E-151) se ubicaron en paralelo las dos gráficas y se seleccionó el coeficiente de consolidación que se encontrase dentro del límite entre el esfuerzo efectivo y la presión de consolidación de la muestra cómo se presenta a continuación.

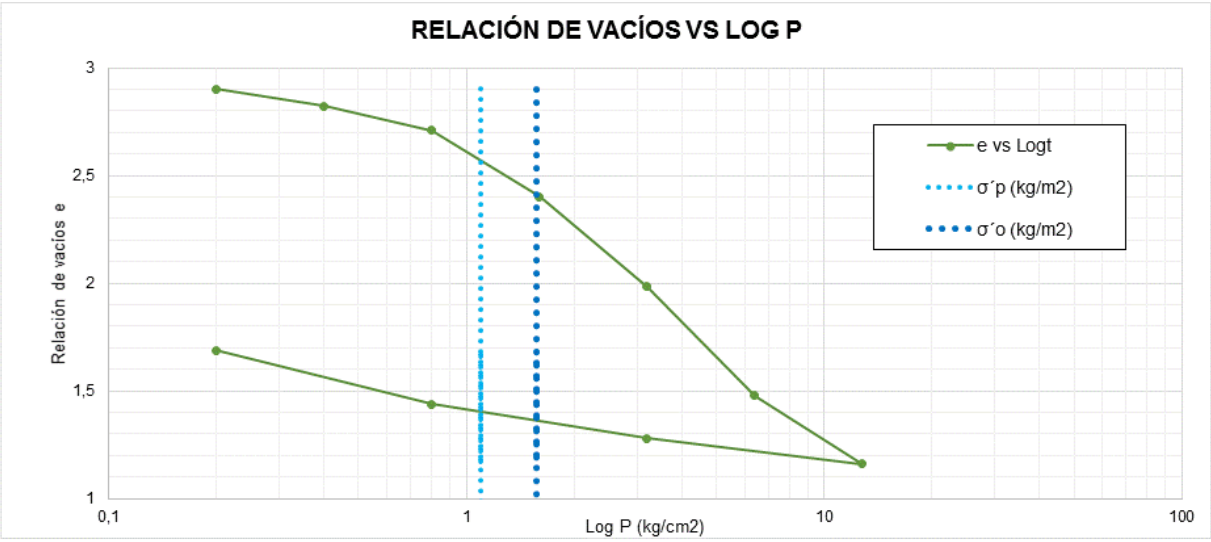


Figura 23 LFO 13071 S-2, muestra 1 Log P vs Relación de vacíos (e)
Fuente: Elaboración de los autores

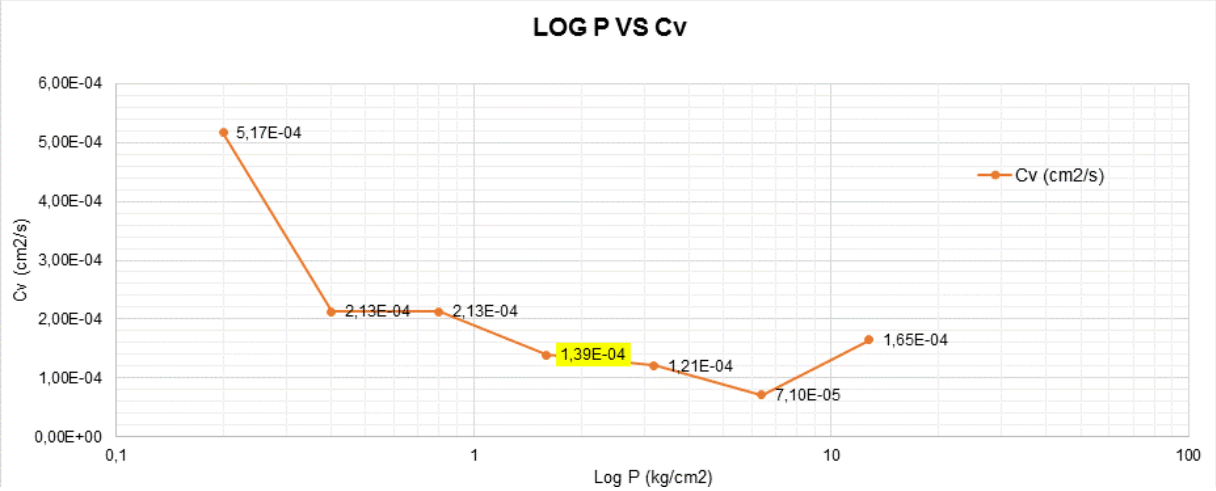


Figura 24 LFO 13071 S-2, muestra 1 Log P vs Cv.
Fuente: Elaboración de los autores

Nótese que el valor seleccionado se encuentra en el límite de las dos líneas punteadas que se encuentran en Figura 23.

De esta manera se realizó el cálculo para todos los métodos en cada estudio de suelos de este grupo, excepto para los métodos de correlaciones con la permeabilidad y el Límite Líquido en los cuales se obtuvo el coeficiente de consolidación por muestra en función del esfuerzo efectivo, el límite líquido, gravedad específica para el caso del método empírico, los límites de consistencia y

el tipo de arcilla para el caso de la correlación con la permeabilidad y para el método de correlación entre el límite líquido y Cv. De esta manera se obtuvieron para todos los métodos el coeficiente de consolidación que se enseñan en la Tabla *8* para cada estudio de suelos

Finalmente, para observar el comportamiento de cada uno de los métodos para hallar el coeficiente de consolidación vs la profundidad se graficaron todos los valores obtenidos para cada uno de los grupos como se muestra a continuación (ver *Figura 25* y *Figura 26*)

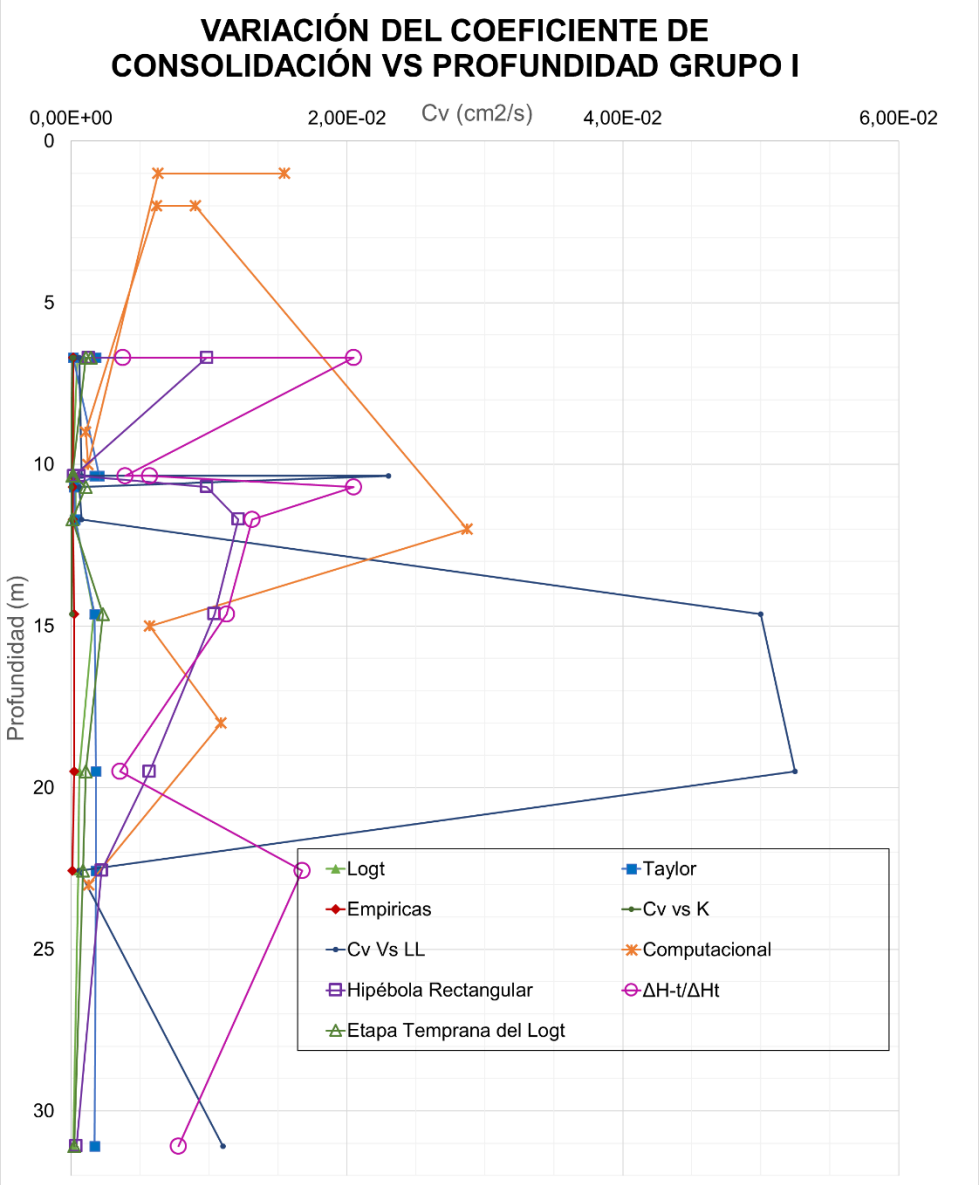


Figura 25 CV vs profundidad grupo I
Fuente: Elaboración de los autores

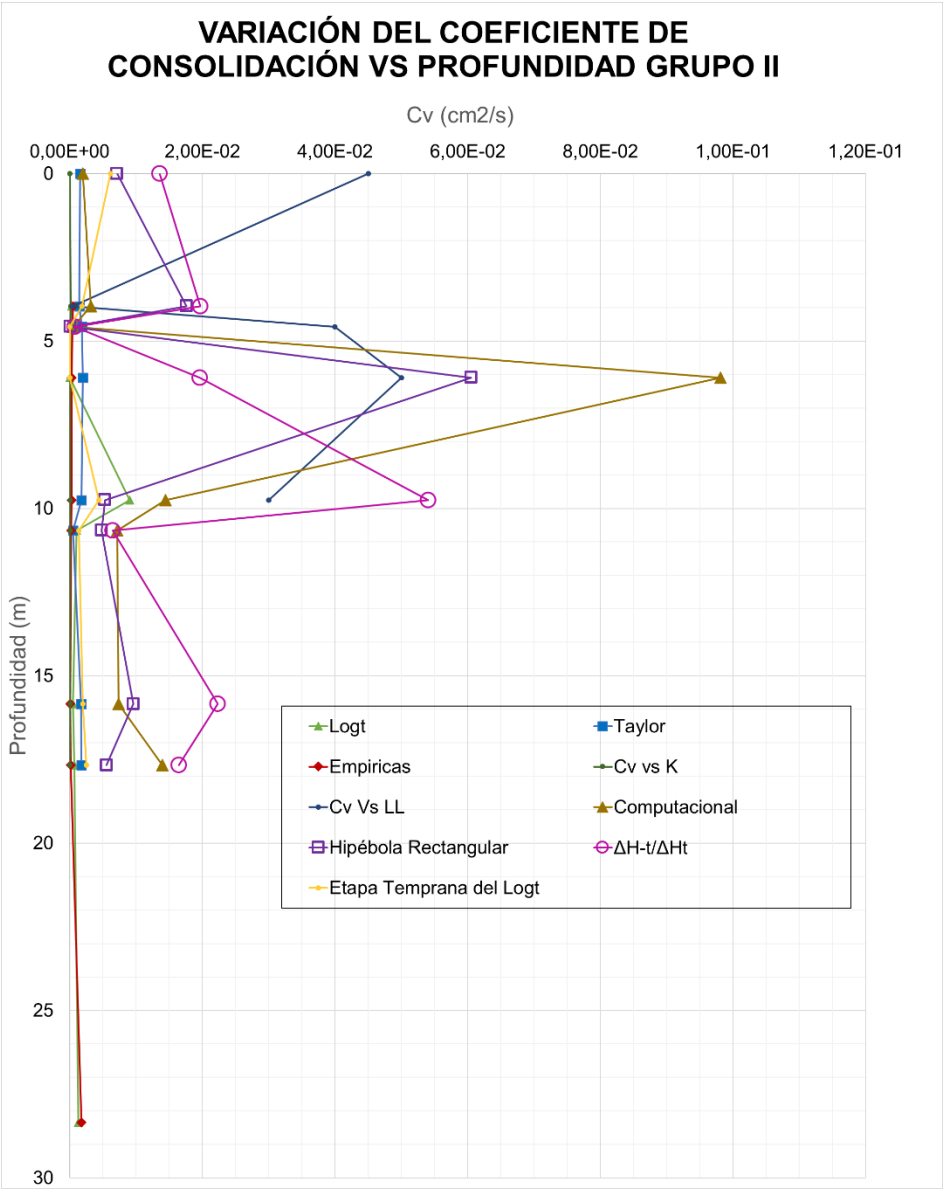


Figura 26 Cv vs profundidad grupo II

Fuente: Elaboración de los autores

2.4.1 Método del logaritmo del tiempo vs método de Taylor

Teniendo en cuenta que los dos métodos son gráficos, la relación existente entre ellos está ligada a la precisión con la que se realizaron las gráficas, estos métodos al tomar información del ensayo de consolidación unidimensional presentan similitudes en los coeficientes de consolidación obtenidos los cuales registraron valores del orden de 10^{-04} y 10^{-03} respectivamente. No obstante, se observó que para obtener coeficientes de consolidación por el método de Taylor se utilizaron intervalos de tiempo más cortos para incrementos de carga superiores a 0.40 Kg/cm^2 lo cual permitió observar las diferencias en los valores t1 y t2 y por consiguiente la obtención del Cv con un grado de certeza óptimo.

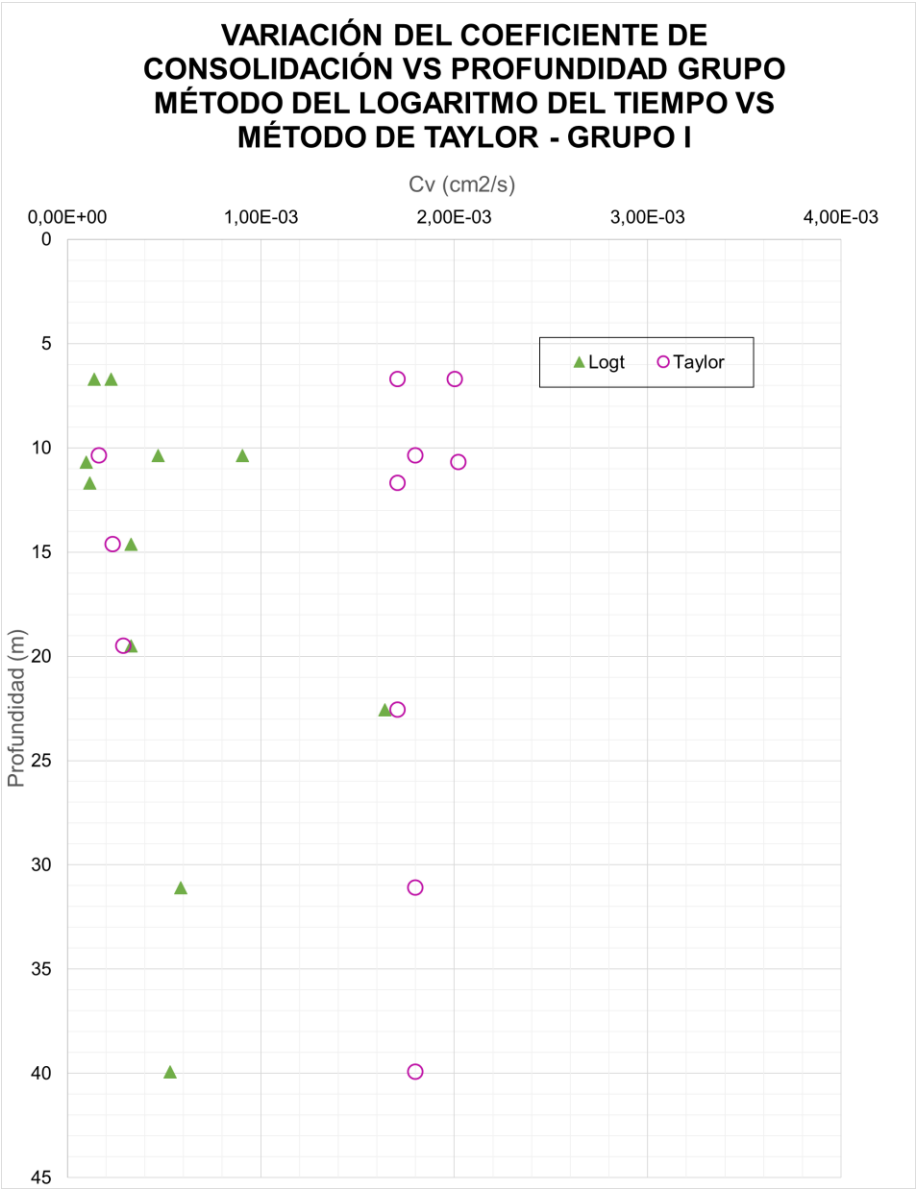


Figura 27 CV vs profundidad grupo I método logaritmo

Fuente: Elaboración de los autores

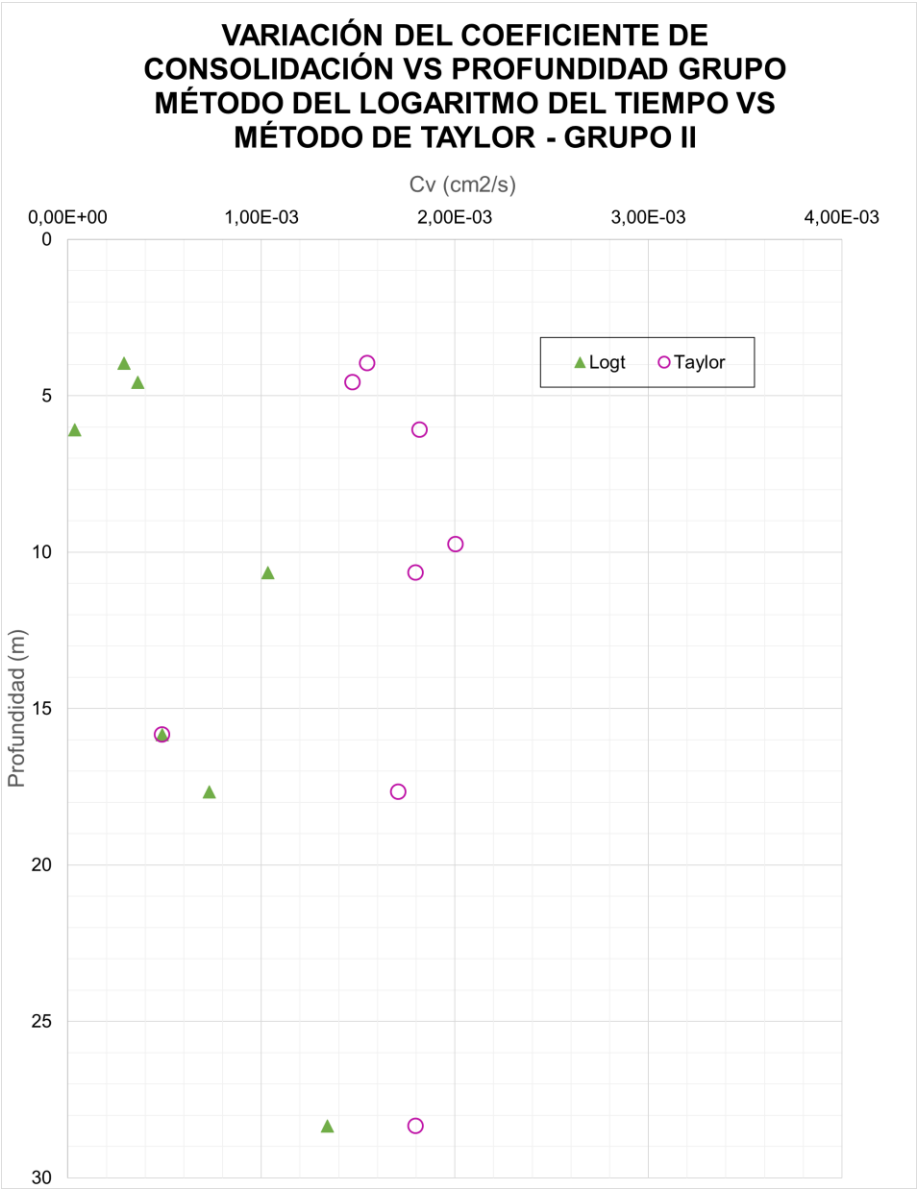


Figura 28 CV vs profundidad grupo II método logaritmo

Fuente: Elaboración de los autores

En los siguientes numerales se realizan los comparativo de los resultados del Cv con los diferentes métodos, dando cumplimiento con el objetivo específico (1.2.1)

2.4.2 Comparativo con correlaciones empíricas

Las correlaciones empíricas para calcular el coeficiente de consolidación dependen de dos parámetros los cuales no están relacionados con el ensayo de laboratorio: las condiciones de

humedad, límites de consistencia, gravedad específica, así como la variación de esfuerzos efectivos con respecto a la profundidad.

Para evaluar las condiciones de esfuerzos efectivos, se estableció un nivel freático promedio en función de los registros de perforación, el cual dio como resultado un nivel que evidencia la saturación del suelo, condición necesaria para que se dé el fenómeno de consolidación.

Se observó un aumento de esfuerzos efectivos proporcional a la profundidad de muestreo con incrementos considerables entre 24 y 32 metros de profundidad. Para los grupos I y II se observó un aumento del esfuerzo efectivo mayor por debajo del nivel freático.

En cuanto a los límites de consistencia, se evidenciaron condiciones de humedad natural, lo cual indica que las arcillas analizadas presentan consistencia de tipo plástico.

Los valores de gravedad específica no registraron variaciones significativas con relación a la profundidad de las muestras ensayadas.

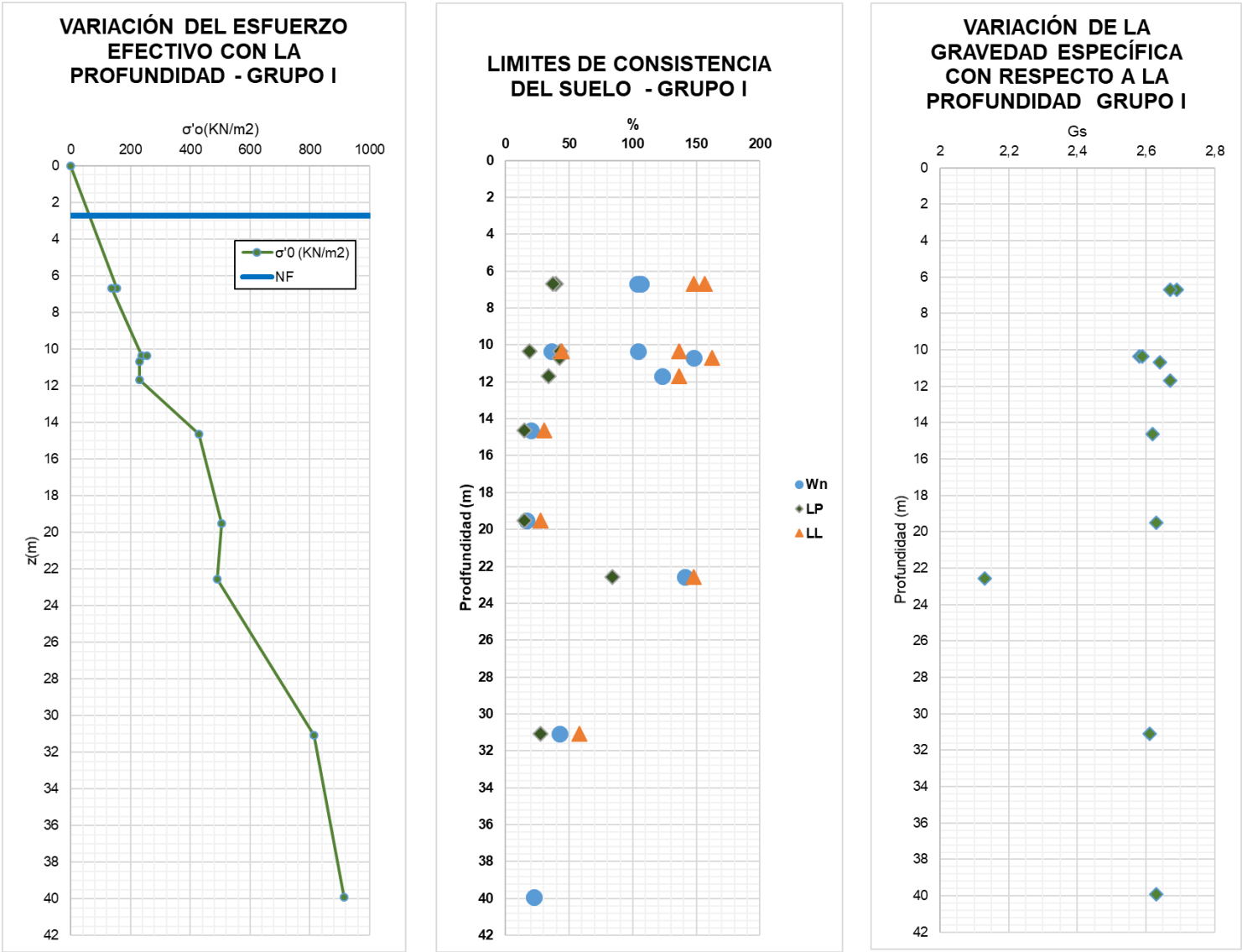


Figura 29 Esfuerzo efectivo, límites de consistencia y gravedad específica grupo I

Fuente: Elaboración de los autores

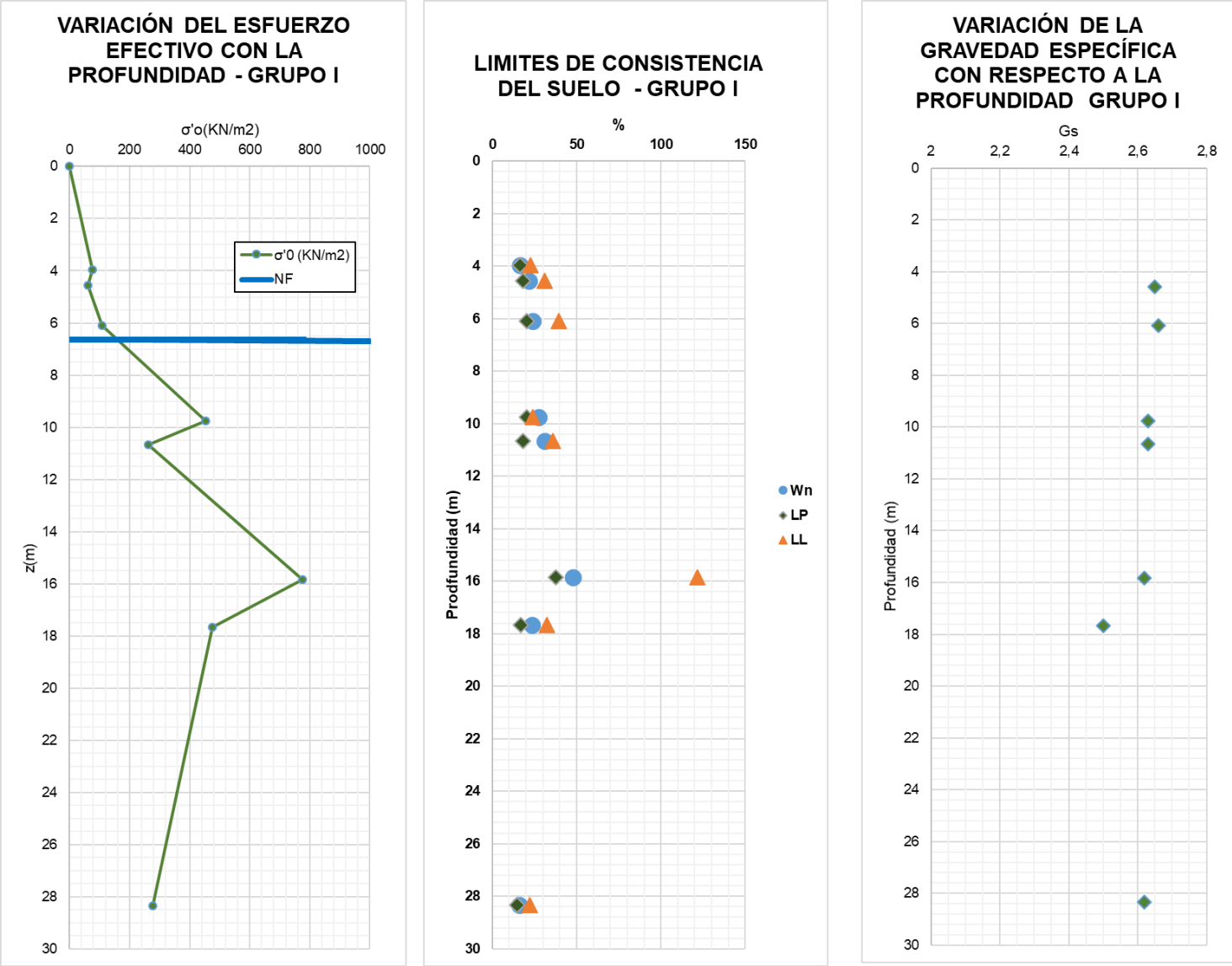


Figura 30 Esfuerzo efectivo, límites de consistencia y gravedad específica grupo II

Fuente: Elaboración de los autores

Luego de analizar estas tres variables, y de calcular la relación de vacíos en el límite líquido la cual no es más que el volumen de vacíos para que el suelo cambie su consistencia y deje de comportarse como un plástico para comportarse como un líquido viscoso; se calcularon los coeficientes de consolidación los cuales registraron valores del orden de 10-4, menores a los hallados en el ensayo de laboratorio, estas cifras mantuvieron una tendencia a pesar de estar afectados por la profundidad y por los esfuerzos efectivos de cada una de las muestras. Los resultados se pueden observar en la siguiente imagen.

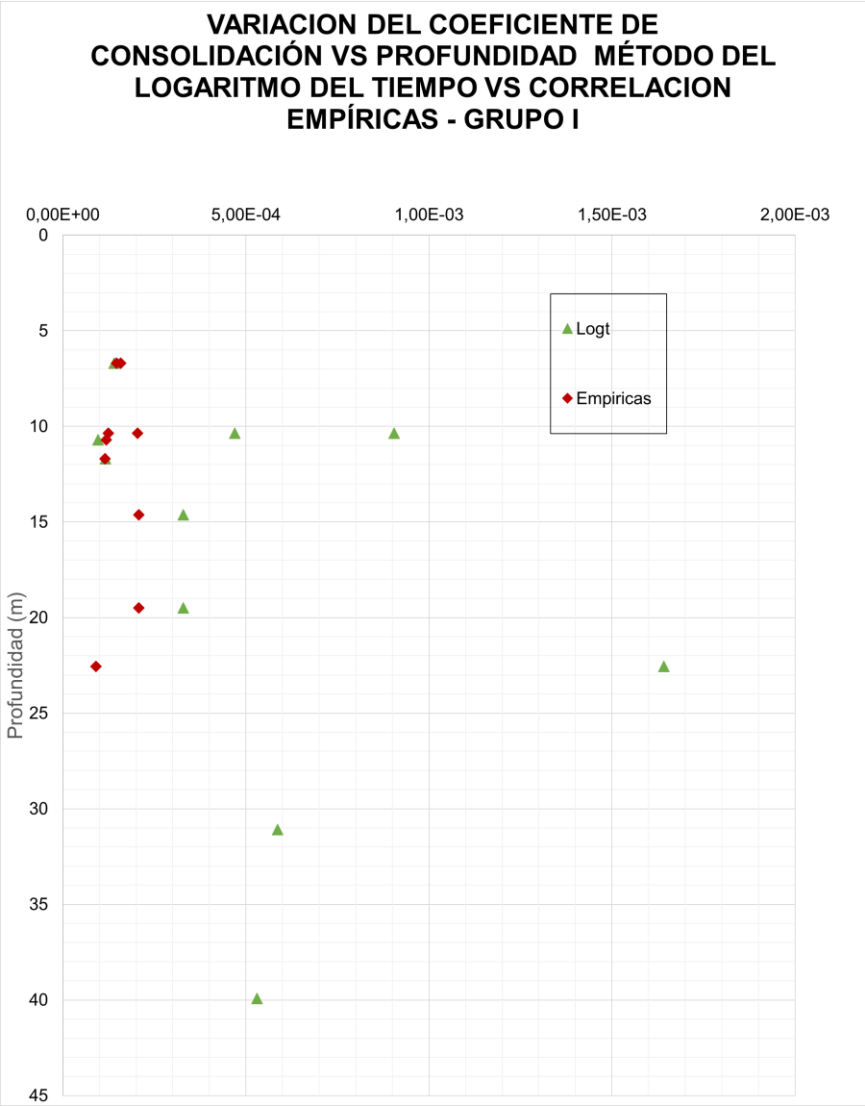


Figura 31 Cv vs profundidad vs correlación empíricas grupo I

Fuente: Elaboración de los autores

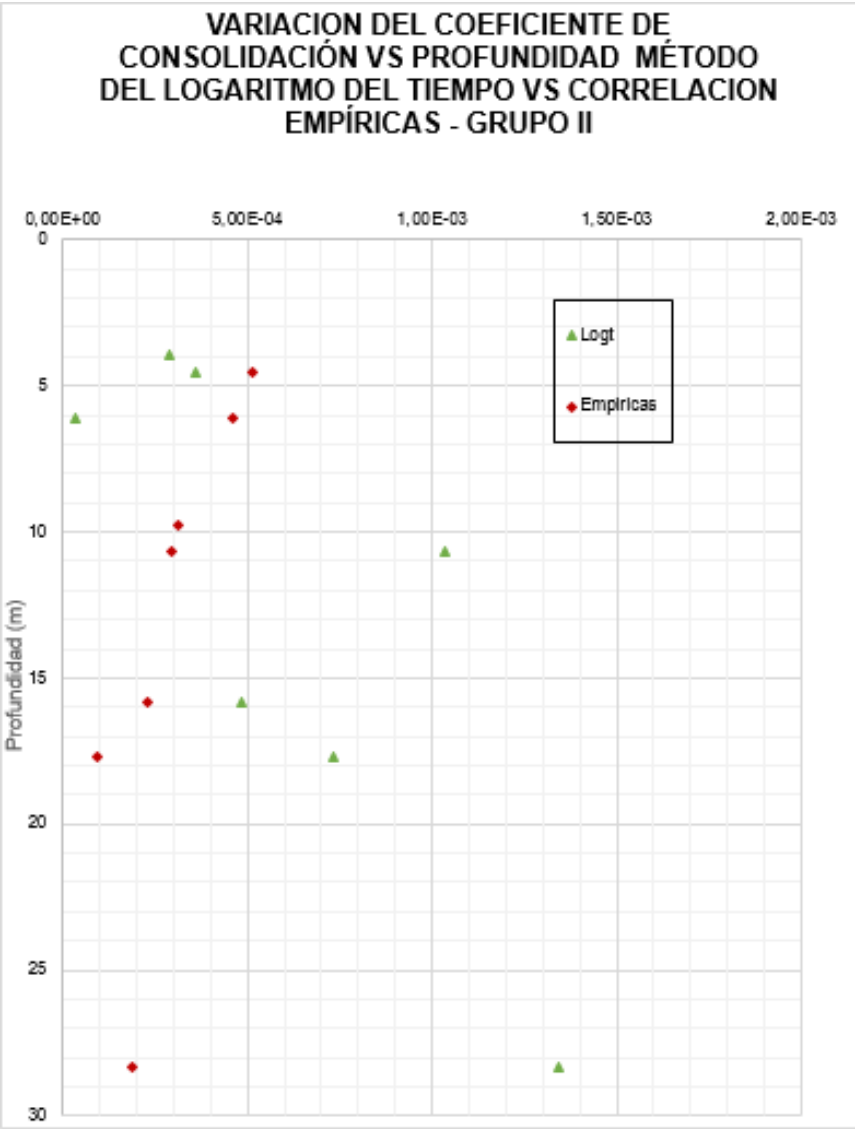


Figura 32 Cv vs profundidad vs correlación empíricas grupo II

Fuente: Elaboración de los autores

2.4.3 Comparativo con el coeficiente de permeabilidad

Uno de los parámetros que afecta significativamente el coeficiente de consolidación en arcillas saturadas es la permeabilidad de estas, es decir que a mayor permeabilidad se presentarían valores más altos de coeficientes de consolidación y, por consiguiente, presencia de asentamientos por consolidaciones en tiempos menores a medida que esta aumenta. Los valores de permeabilidad establecidos para la investigación no se tomaron de forma experimental, es

decir no se realizaron pruebas de permeabilidad a las arcillas muestreadas. Para su estimación, se tuvo en cuenta la relación existente entre el límite líquido y el límite plástico con función del tipo de arcilla (Caolinita, ilita o montmorillonita) posteriormente se tomó como referencia la figura ya mencionada para esta metodología (*véase Figura 11*) para hallar el coeficiente de permeabilidad.

Los demás valores de relación de vacíos e incremento de esfuerzos se tomaron para cada muestra de los estudios de suelos utilizados y se obtuvo el coeficiente de consolidación como se describió en la metodología.

Estimar el coeficiente de permeabilidad bajo este procedimiento tiene sus limitantes, pues los intervalos dentro de los cuales se debe encontrar el suelo para ser clasificado dentro de un tipo de arcilla son cerrados y no siempre las muestras se encontraban dentro de una clasificación. Adicionalmente para relaciones de vacíos promedio por debajo de 1.0 no fue posible hallar coeficientes de permeabilidad que permitieran aplicar esta correlación para hallar el coeficiente de consolidación. No obstante, en algunos casos en los que la relación de vacíos promedio se encontraba cercana a la unidad se prolongaron las líneas de tendencia de las arcillas tipo Kaolinita para la obtención de este coeficiente. Los valores obtenidos de coeficientes de permeabilidad se encontraron entre el rango 10^{-9} y 10^{-8}, valores típicos para suelos arcillosos.

Para el conjunto de datos con el cual se pudieron obtener valores de permeabilidad y por consiguiente coeficientes de consolidación, se encontraron valores de Cv de ordenes entre 10^{-4} y 10^{-3} los cuales no difieren significativamente de los obtenidos con el método del logaritmo del tiempo.

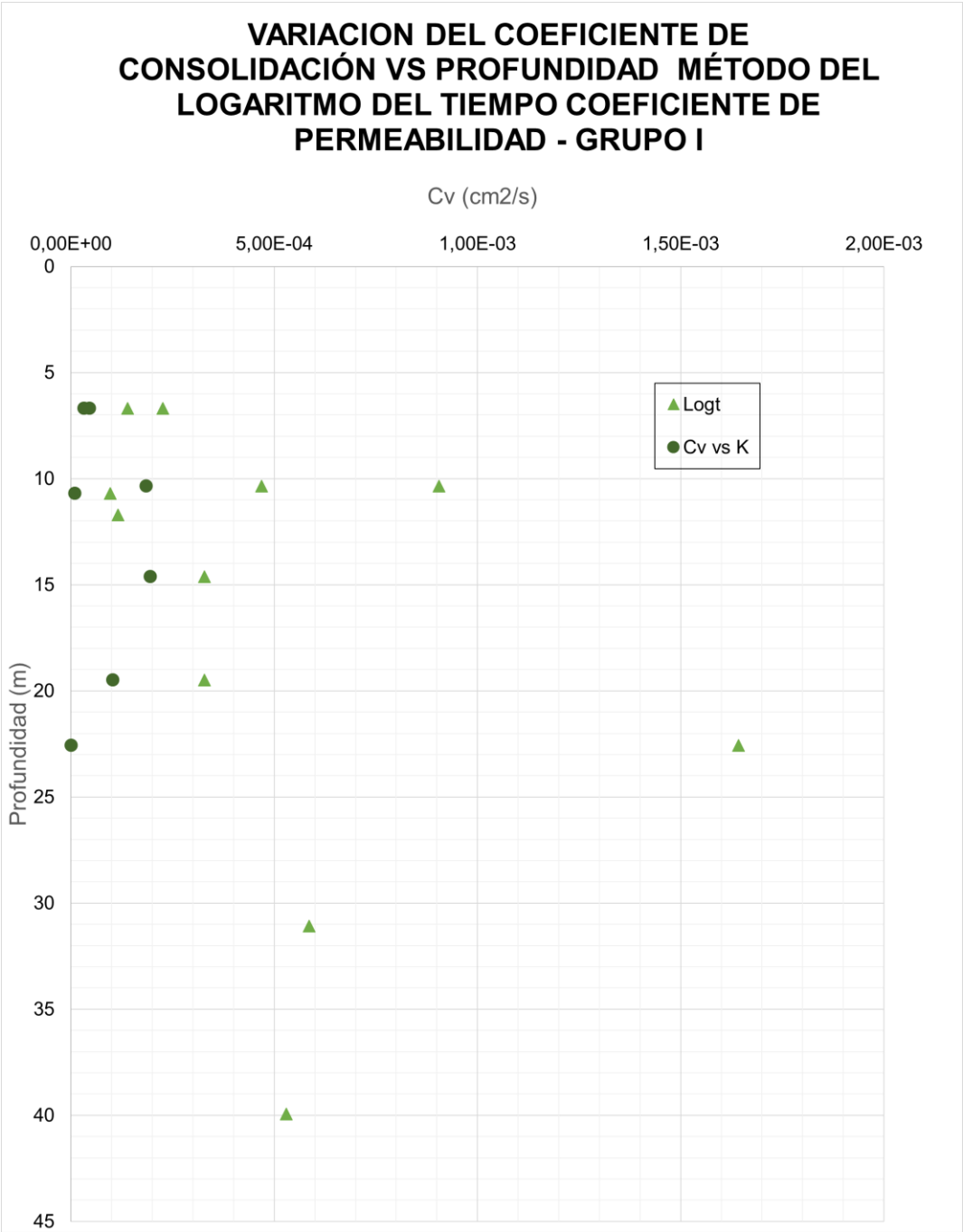


Figura 33 CV vs profundidad-coeficiente de permeabilidad grupo I

Fuente: Elaboración de los autores

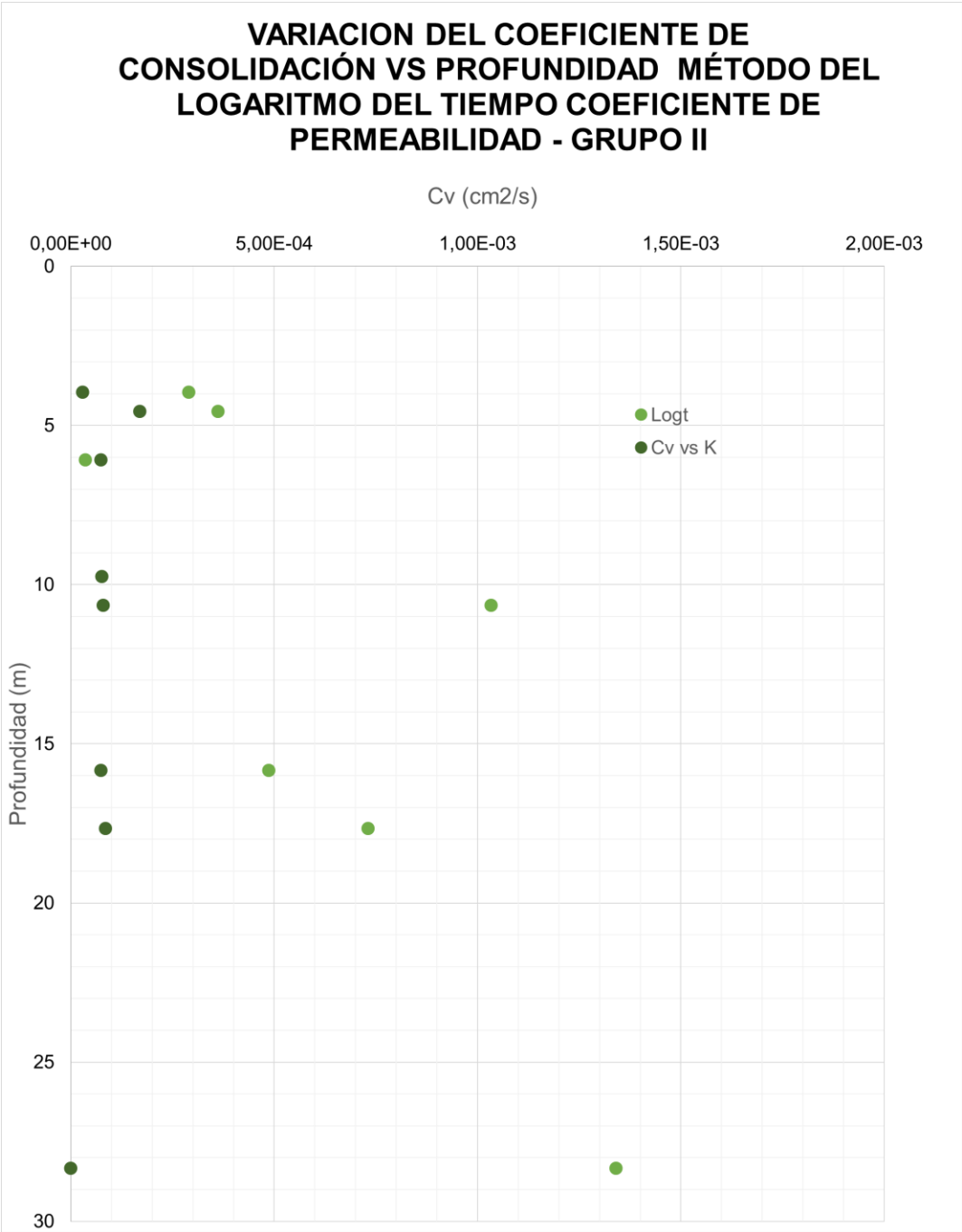


Figura 34 CV vs profundidad-coeficiente de permeabilidad grupo II

Fuente: Elaboración de los autores

2.4.4 Comparativo con el límite líquido

La correlación con el límite líquido es una de las formas de estimar el coeficiente de consolidación de una manera rápida que a su vez no tiene en cuenta valores del ensayo de consolidación ni de las condiciones de esfuerzo efectivo a la que está sometida la muestra. Por tal motivo se podría pensar que es un método para establecer órdenes de magnitud del coeficiente de consolidación, pero su validez y uso dependerán de otros factores de las condiciones del suelo a analizar.

Esta correlación fue tomada de la figura que se menciona en el procedimiento del capítulo anterior (*véase Figura 12*Figura 11) y está limitado para valores de límite líquido entre 20 y 160 y para valores de Cv (cm2/s) entre 10^{-4} y 10^{-2}. No obstante, en algunas muestras no fue posible obtener el coeficiente de consolidación para condiciones de límite líquido que se encontraban fuera del rango establecido.

Para el grupo de arcillas muestreadas se obtuvieron valores del orden 10^{-4} los cuales se encuentran dentro del límite para la condición de las mismas.

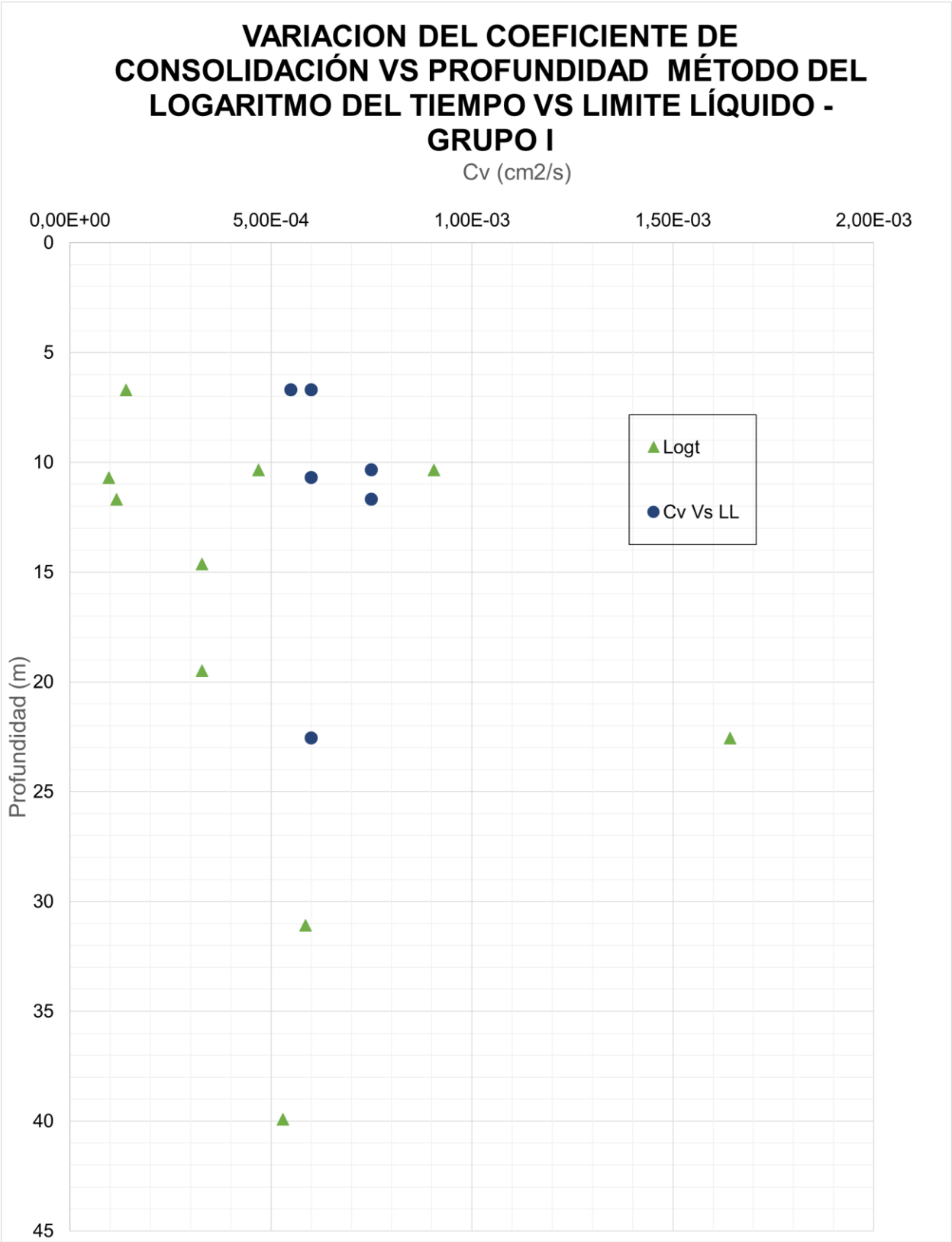


Figura 35 Cv vs profundidad-logaritmo del tiempo vs limite liquido grupo I

Fuente: Elaboración de los autores

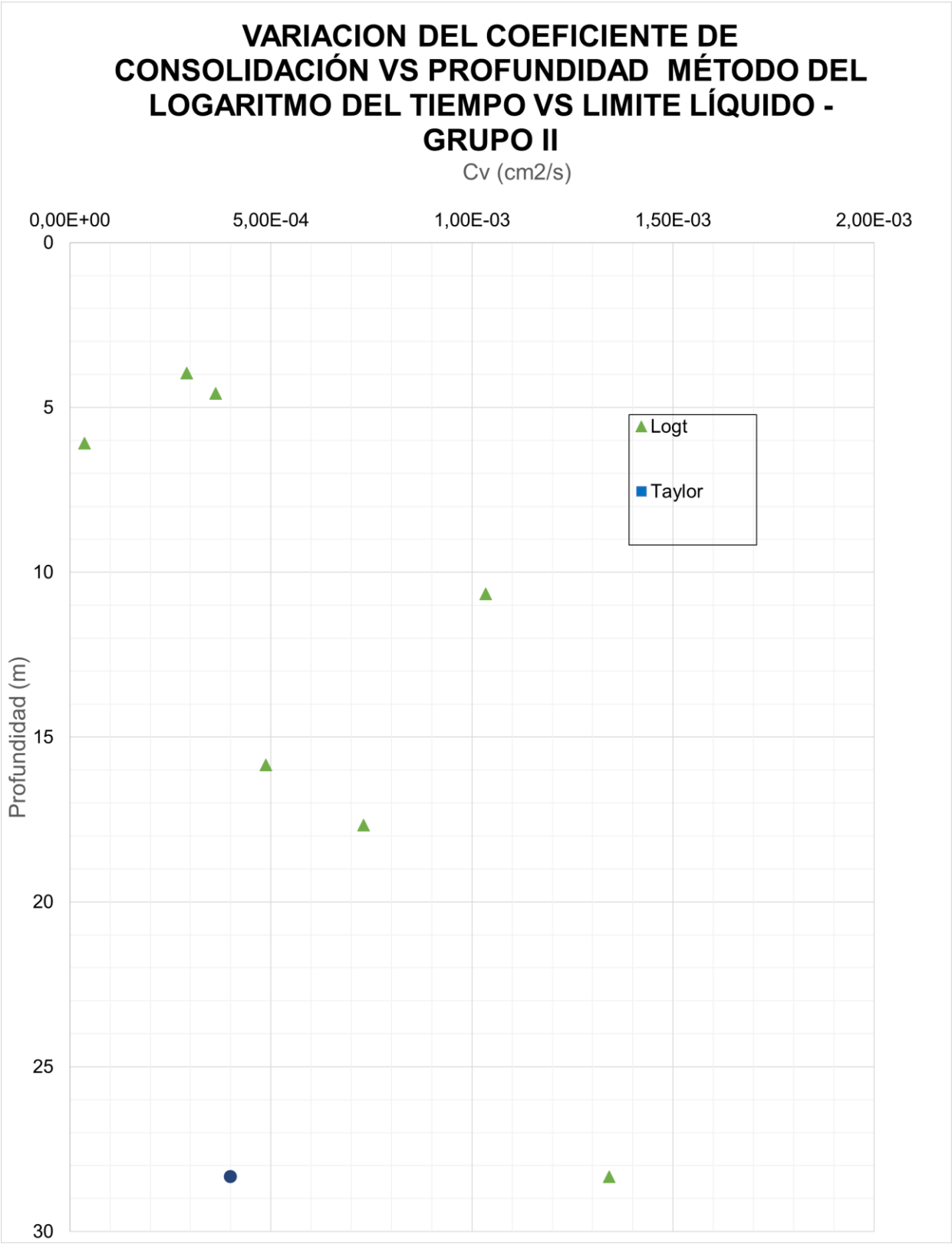


Figura 36 Cv vs profundidad-logaritmo del tiempo vs limite liquido grupo II

Fuente: Elaboración de los autores

2.4.5 Comparativo con el método computacional

El método computacional es un método que toma información de tiempos y deformaciones del ensayo de consolidación y el grado de certeza para la obtención del mismo, dependerá de la forma en la que se tomen los datos de los tiempos y deformaciones para cada una de las condiciones de carga de la prueba de laboratorio.

Adicionalmente este método al ser aplicable en condiciones de la fase inicial de consolidación se debió tenerse especial cuidado en las lecturas d1, d2 y d3 respectivamente, así como los tiempos t1, t2 y t0 necesarios para la obtención de Cv

Los valores obtenidos encuentran grados de dispersión que no reflejan ninguna relación entre los dos métodos.

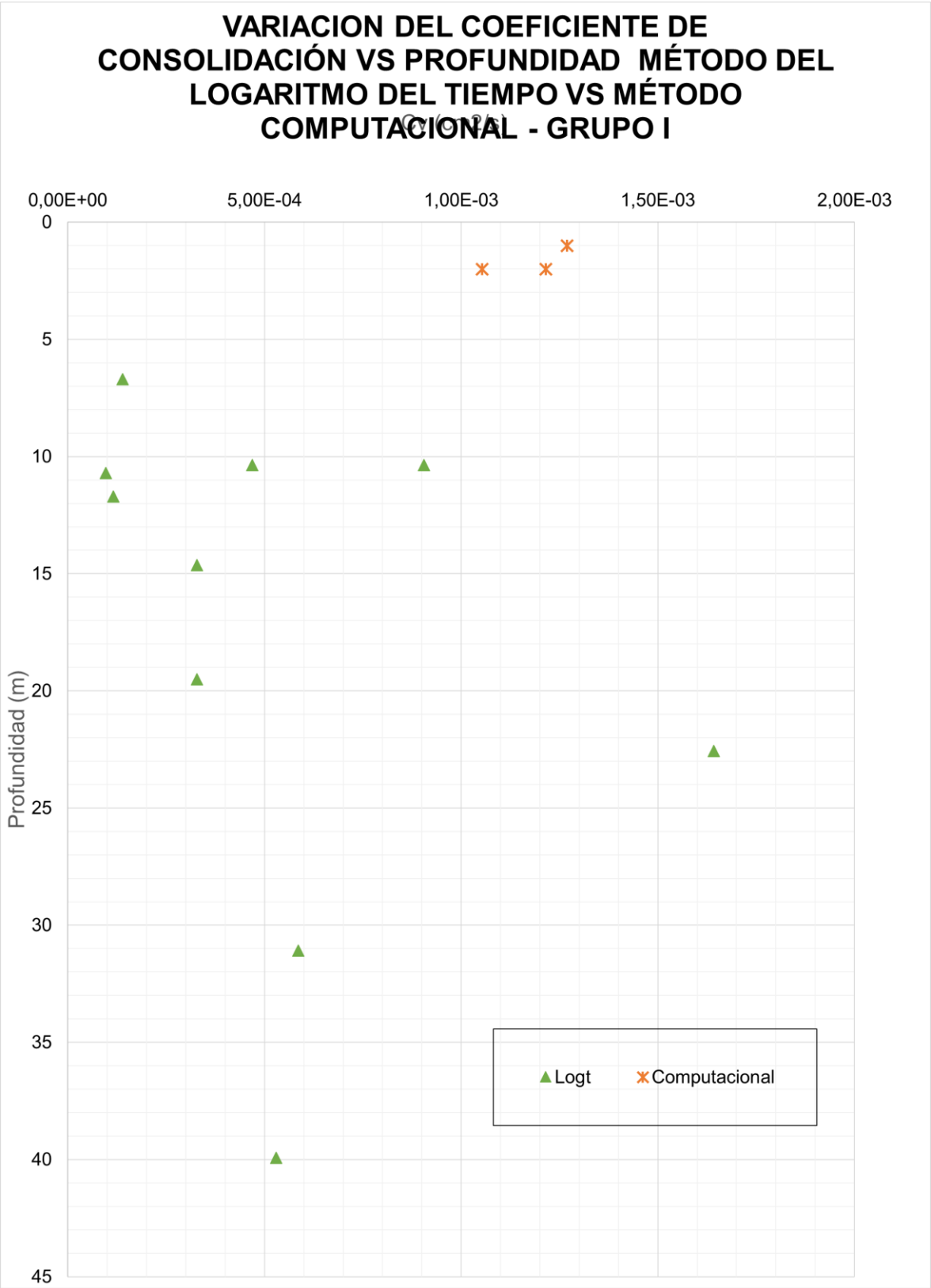


Figura 37 Cv vs profundidad – Logaritmo del tiempo vs Computacional grupo I

Fuente: Elaboración de los autores

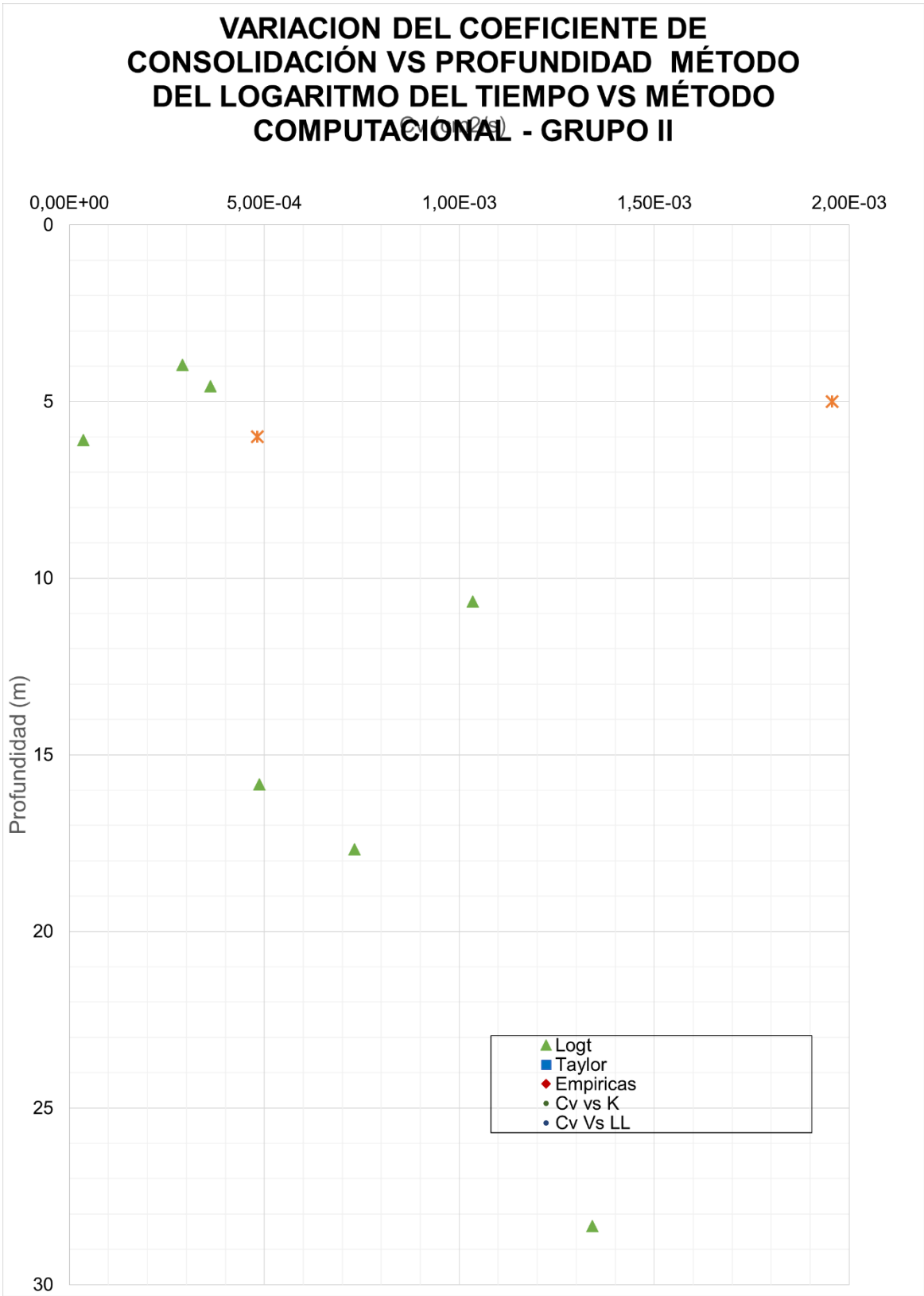


Figura 38 Cv vs profundidad – Logaritmo del tiempo vs Computacional grupo II

Fuente: Elaboración de los autores

2.4.6 Comparativo método de la hipérbola rectangular

Para establecer la relación entre el método de la hipérbola rectangular y el método del logaritmo del tiempo se fundamenta en la relación lineal existente entre el tiempo y el grado de consolidación el cual se encuentra entre el 60% y el 90% es de forma lineal; adicionalmente tiene en cuenta el incremento de la relación existente entre la deformación y el tiempo de consolidación a medida que este último aumenta, utiliza métodos gráficos y el concepto de pendiente de una recta para estimar la intersección de la recta generada entre dos puntos de la lectura de deformaciones y la ordenada de $t/\Delta Ht$.

Finalmente, el coeficiente de consolidación para este método será directamente proporcional a la pendiente de esta recta e inversamente proporcional a la variación del tiempo con respecto a la deformación de la muestra.

Este método, tiene varias particularidades con respecto al método del logaritmo del tiempo, la primera es que a pesar de utilizar las lecturas de deformaciones del ensayo, no establece relaciones con la prueba como tal y no tiene en cuenta las condiciones de esfuerzo ni relación de vacíos a la que está sometida la muestra para la obtención del Cv, por otra parte tiene en cuenta las mayor distancia de drenaje de la muestra lo que de alguna manera lo relaciona con el tiempo de consolidación, el porcentaje de consolidación y el tiempo de consolidación directamente.

El grado de certeza de este método dependerá de la porción de curva que se tenga en cuenta para la obtención de m y D. Para el análisis realizado, se encontraron valores del orden 10^{-4} en profundidades entre 5,0 m y 12,0 m de lo contrario no se obtuvo una relación entre los dos métodos.

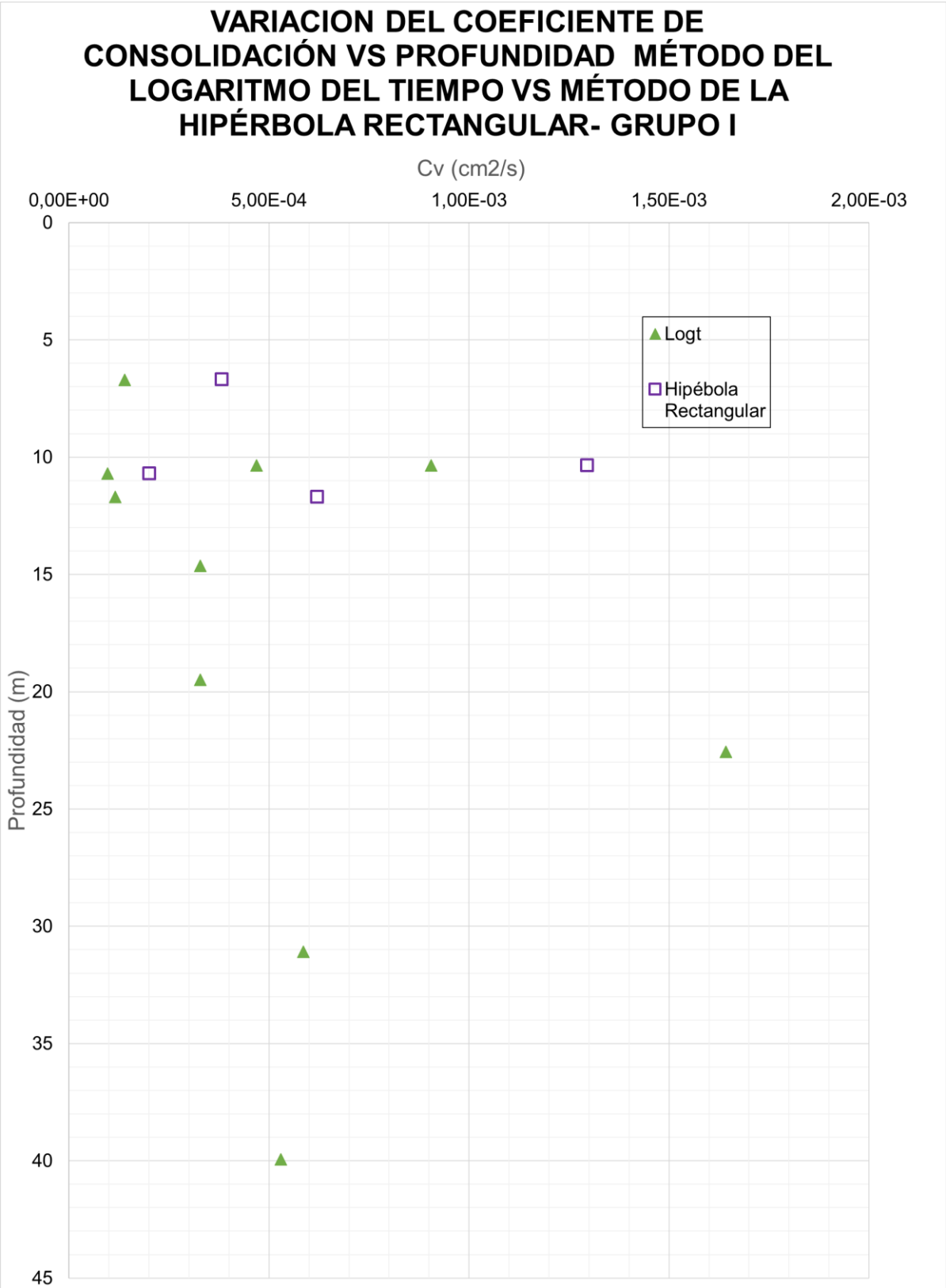


Figura 39 CV vs profundidad – Hipérbola rectangular grupo I

Fuente: Elaboración de los autores

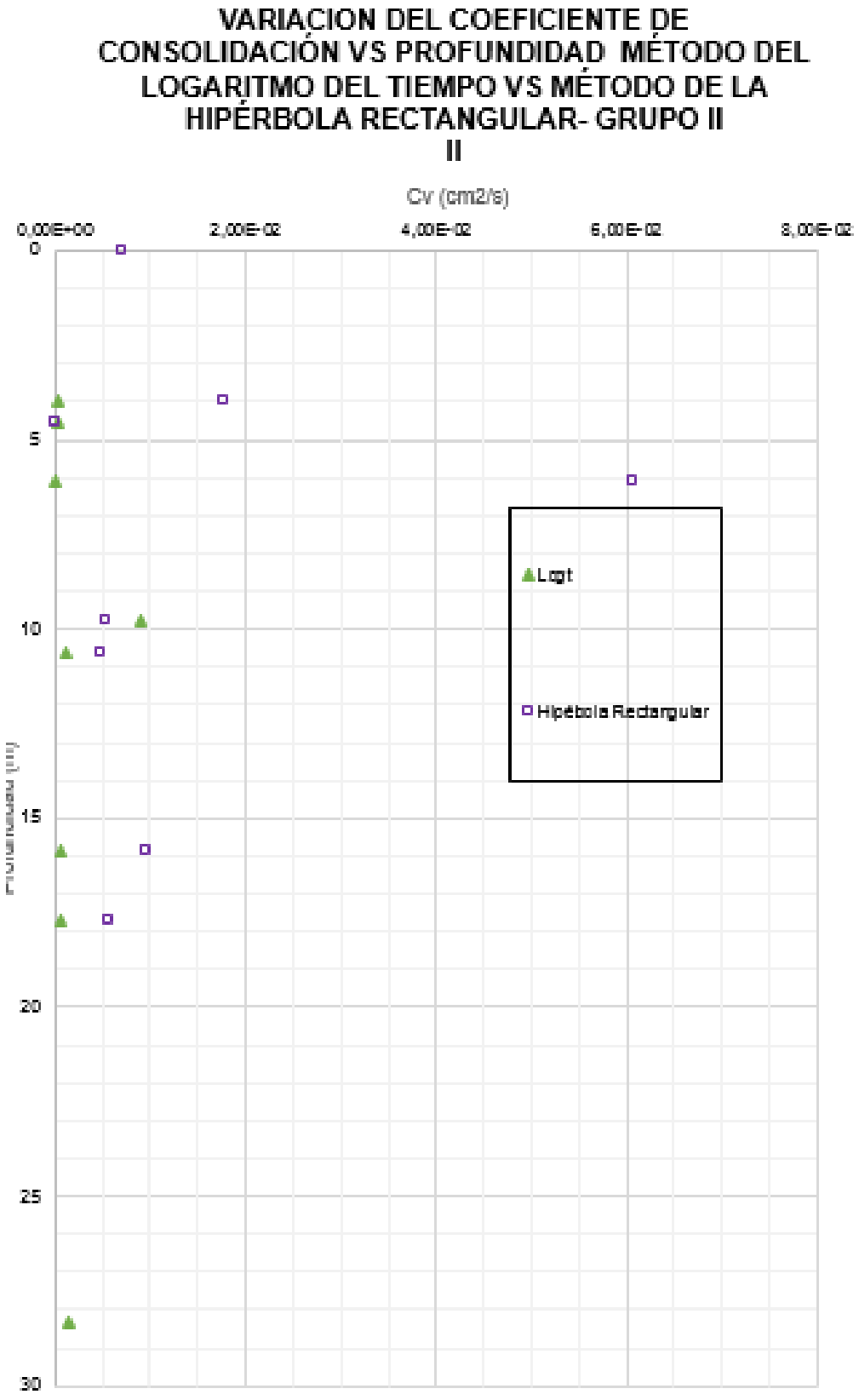


Figura 40 CV vs profundidad – Hipérbola rectangular grupo II

Fuente: Elaboración de los autores

2.4.7 Comparativo método delta ΔHT - T / ΔHT

Este método relaciona de forma lineal las condiciones deformaciones al igual que el método de la hipérbola rectangular las cuales tienen una tendencia de ecuación logarítmica con la diferencia que esta curva es en su totalidad cóncava hacia arriba y no marca puntos de inflexión para la obtención de valores iniciales de deformación y relación de vacíos Por otra parte es un método gráfico que se fundamenta en la relación existente entre el Cv y el t90 al igual que el método de Taylor

Los valores obtenidos con este método registran valores del orden 10^{-3} y 10^{-2} mientras que los obtenidos por el método del logaritmo del tiempo registran valores de 10^{-4} respectivamente, por tal motivo no es posible establecer grado de confianza para los valores de Cv obtenidos por este método con respecto al utilizado en el laboratorio.

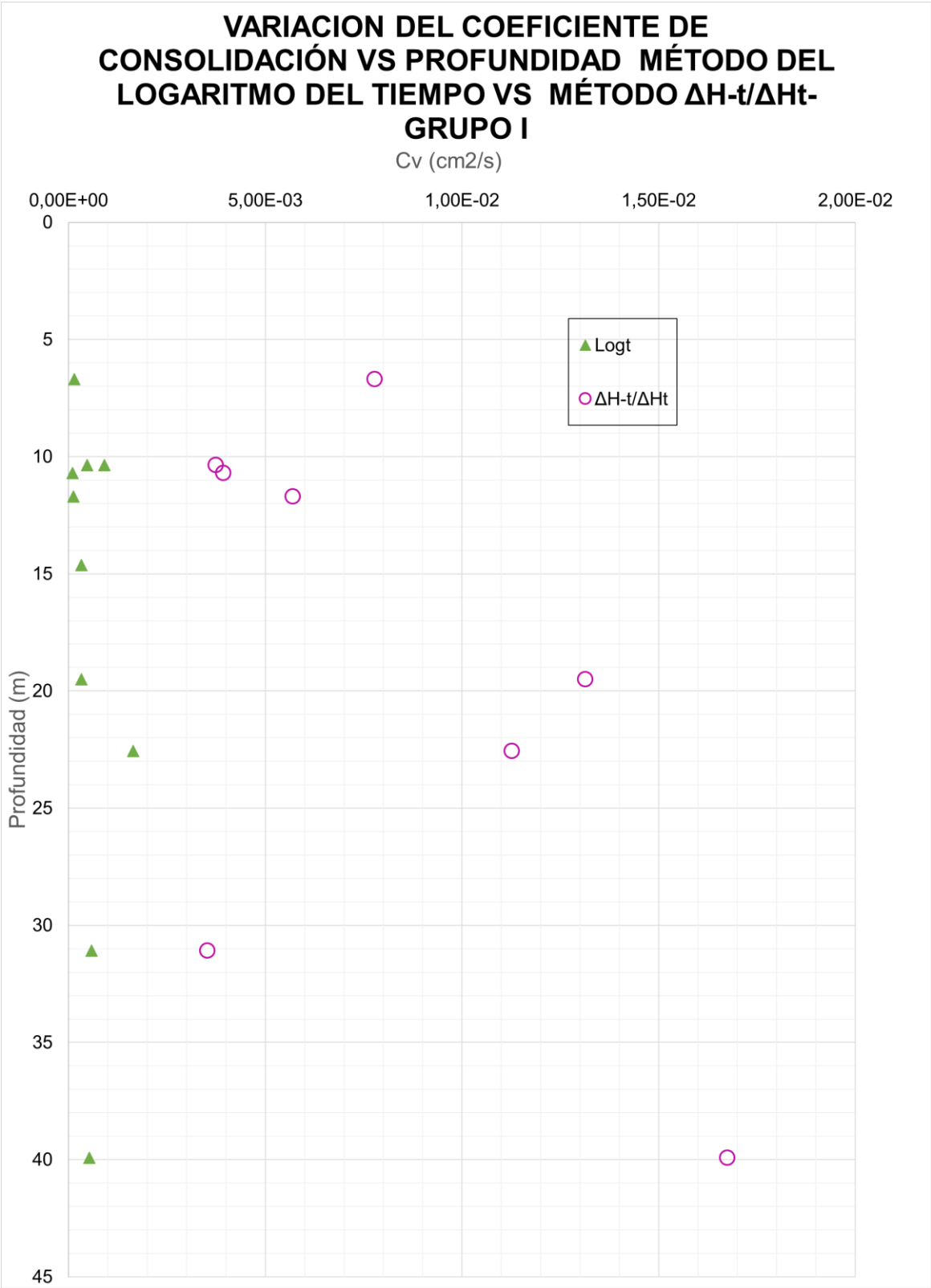


Figura 41 CV vs profundidad - ΔHT - T / ΔHT grupo I

Fuente: Elaboración de los autores

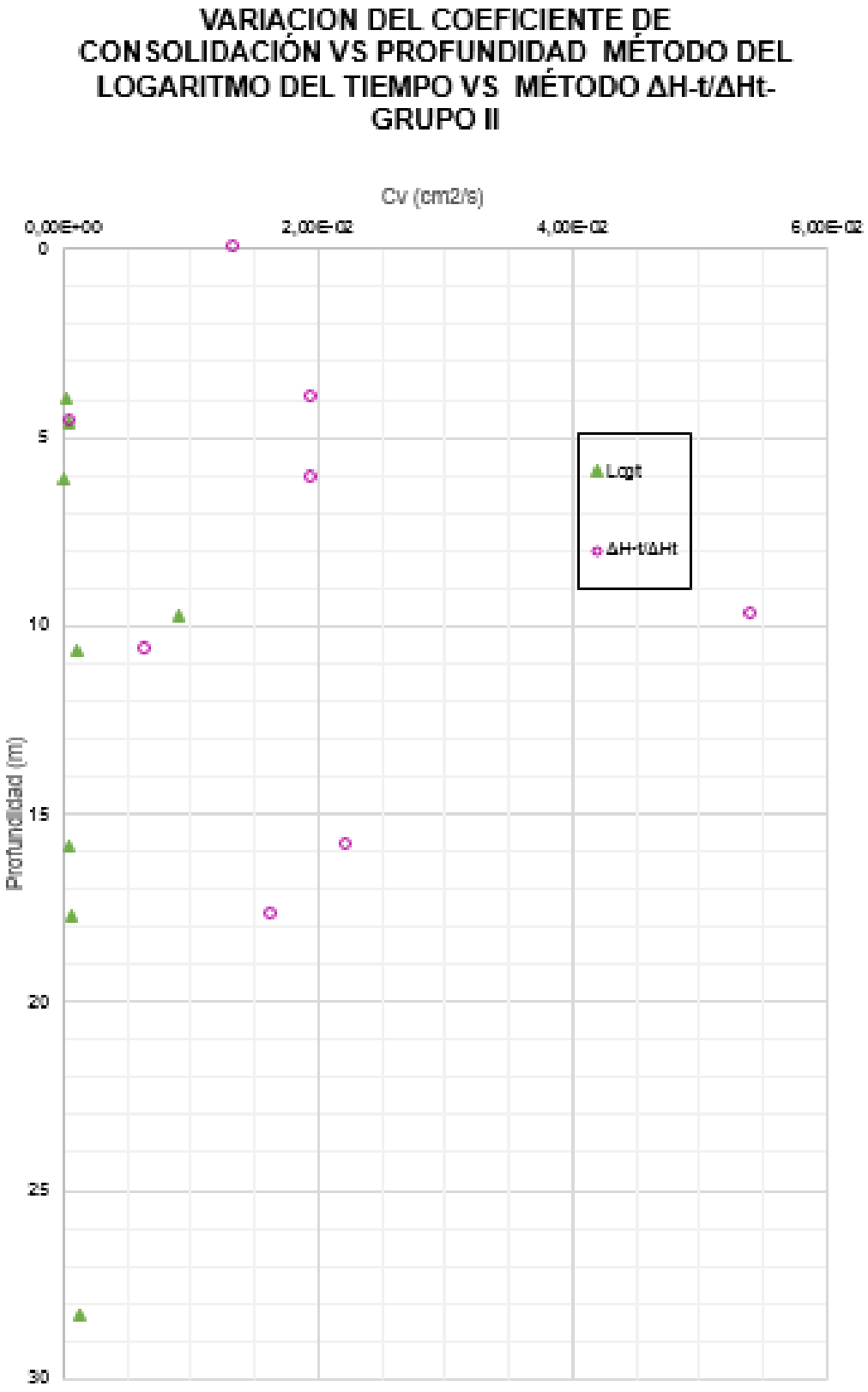


Figura 42 CV vs profundidad - ΔHT - T / ΔHT grupo II

Fuente: Elaboración de los autores

2.4.8 Comparativo método de la etapa temprana del logaritmo del tiempo

Este método al ser una variación del método del logaritmo del tiempo se fundamenta en los mismos principios del método original aplicado a tiempos de la fase temprana de consolidación. Dependiendo de la disipación de la presión de poros de la etapa inicial, la cual, para el método está en t22,14 en muchos casos no genera la información suficiente para la aplicabilidad del mismo los valores obtenidos se encontraron entre 10^{-4} y 10^{-3} para las muestras incluidas

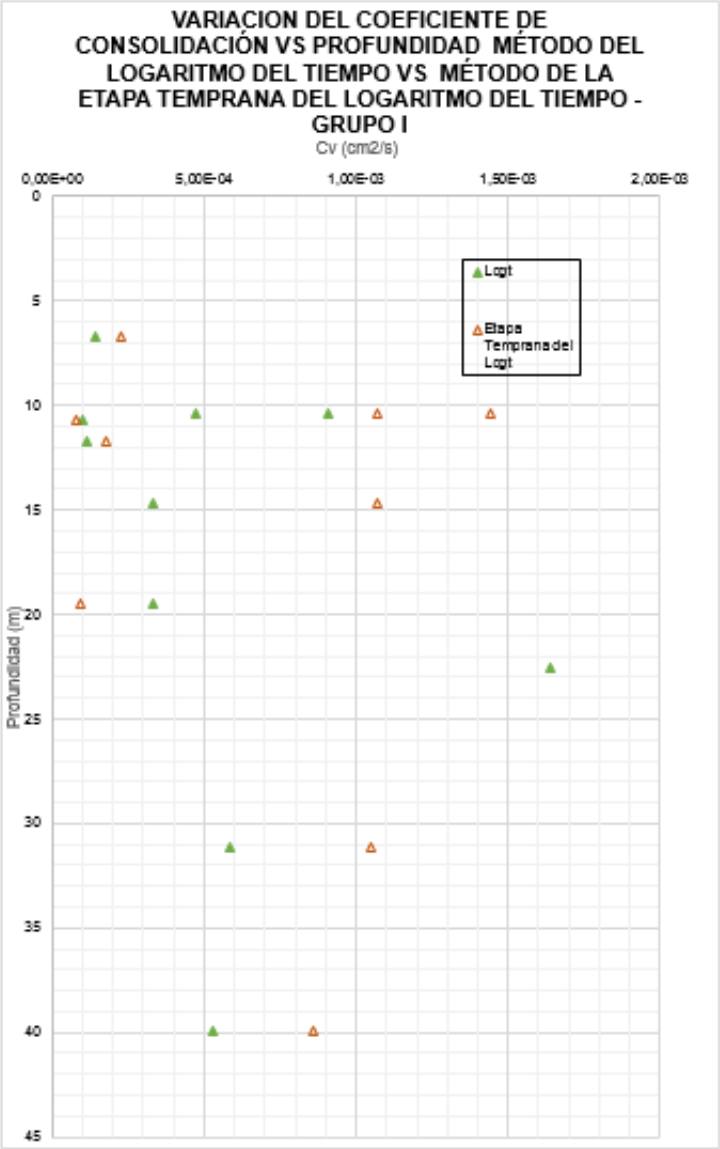


Figura 43 CV vs profundidad – etapa temprana del logaritmo grupo I
Fuente: Elaboración de los autores

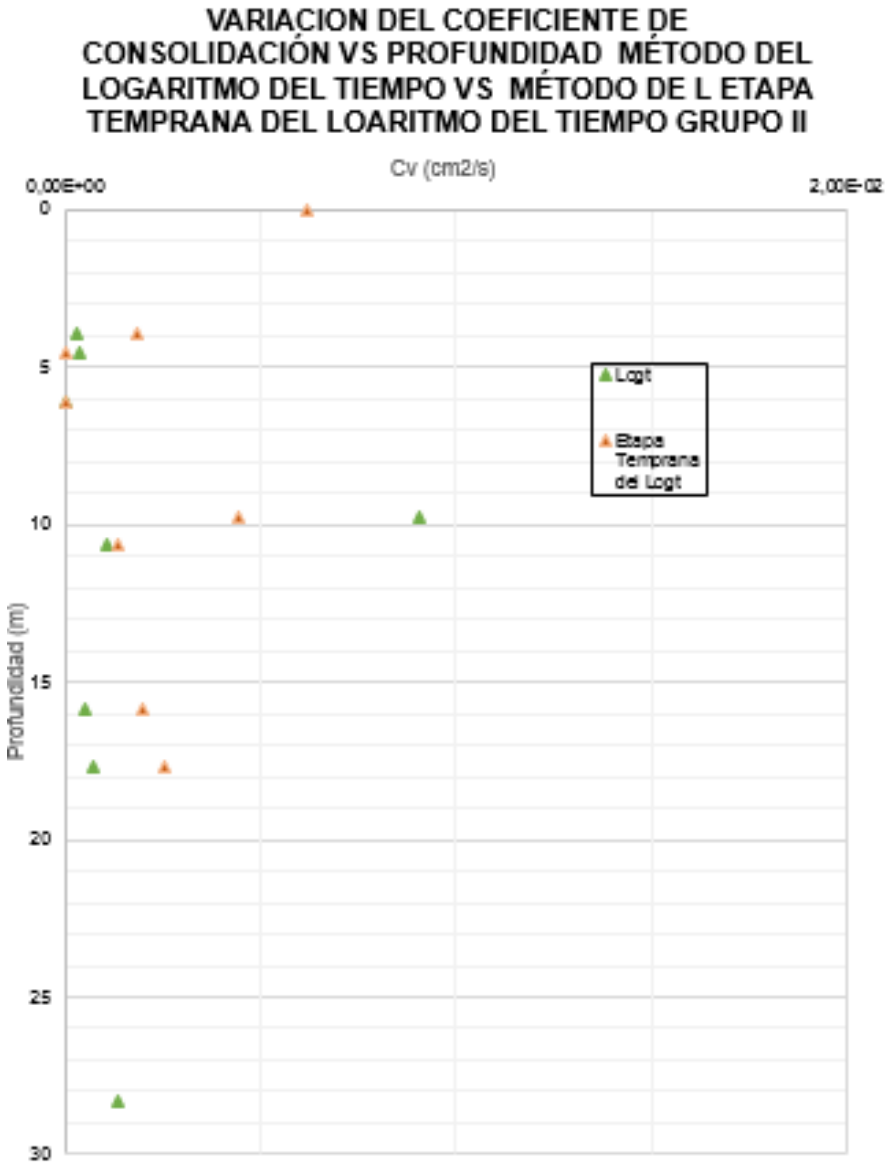


Figura 44 CV vs profundidad – etapa temprana del logaritmo grupo II

Fuente: Elaboración de los autores

GLOSARIO

Asentamiento elástico: Estos asentamientos se producen de inmediato, se dan en los suelos arenosos o en los suelos arcillosos no saturados.

Asentamiento por consolidación: Estos asentamientos se dan a través del tiempo.

Presión de poros: Es la presión que ejerce el agua dentro del suelo y es fundamental para el cálculo de la tensión efectiva formulada por Terzaghi.

Presión efectiva: Esfuerzo del suelo correspondiente a la fase sólida.

CONCLUSIONES

Se analizó un total de 7 estudios de suelos los compuestos por 21 perforaciones las cuales se encontraron entre 0 y 42 m de profundidad aproximadamente, los ensayos de consolidación unidimensional consultados registraron muestras inalteradas entre 3.5m y 38 m.

Se registraron valores de pesos unitarios entre 1,41 Tn/m^3 y 2,06 Tn/m^3 y esfuerzos efectivos con valores de 800 kN/m^2 aproximadamente.

Se observó una posición de nivel freático entre 2,5 y 6,7 m aproximadamente, la mayoría de las muestras se encontraron en condición saturada para el proceso de consolidación

Los coeficientes de consolidación obtenidos para los métodos gráficos en los que se tomó información del ensayo de consolidación se encontraron por el orden de 10^{-4} y 10^{-3} (cm2/s) respectivamente. Para las correlaciones empíricas, con el coeficiente de permeabilidad y con el límite líquido se observaron valores del orden de 10^{-4} y 10^{-5} a excepción de las muestras que no registraron condiciones de límite líquido y permeabilidad que permitiese la aplicación de estas correlaciones.

A pesar de ser analizados de forma independiente los Grupos I y II de estudios de suelos muestreados en función de su clasificación dentro de la Microzonificación Sísmica de Bogotá, no se observaron diferencias significativas entre los coeficientes aplicados por cada uno de los métodos.

Para determinar si es aplicable o no el método de correlaciones empíricas al grupo de arcillas estudiadas se analizó la condición de humedad natural y se observó que los valores de la condición del terreno se encuentran dentro de los límites de consistencia del mismo se observó que el comportamiento del suelo obedece al de un suelo cohesivo de tipo arcilloso de consistencia

plástica, el cual presenta condiciones de saturación que permiten que suceda el fenómeno de consolidación en el mismo.

Pese a que para el uso de la correlación con el coeficiente de permeabilidad k para la obtención del Cv, el valor de k se obtuvo por métodos indirectos en los cuales se usó la información de otros ensayos de laboratorio como los límites de consistencia y su relación con los tipos de arcilla y su actividad; los valores obtenidos evidencian tendencias cercanas a los calculados por métodos gráficos, se obtuvieron valores de permeabilidad entre 10^{-9} y 10^{-8} propios de suelos arcillosos y se observó que para las muestras clasificadas como caolinita los valores de k se encontraron dentro de los lìmites para este tipo de suelo. Los coeficientes de consolidación hallados por este método se encontraron del orden de 10^{-3} para caolinitas y de 10^{-6} para las montmorillonitas. De esta manera se observó que el tipo de arcilla es factor determinante en las condiciones de permeabilidad interno del suelo y por consiguiente del coeficiente de consolidación.

Los métodos que evidenciaron un menor grado de dispersión con respecto al método del logaritmo del tiempo fueron el método de Taylor (para los métodos gráficos) y el método de correlaciones empíricas (para los métodos analíticos).

Una de las correlaciones que se podría usar para obtener valores de Cv y tiempos de consolidación en caso de no contar con información del ensayo de consolidación y que permita la obtención de valores confiables es la empírica, pues además de relacionar el concepto de esfuerzo efectivo, involucra otras variables como la relación de vacíos, el peso unitario de los sólidos e interpreta el incremento del esfuerzo efectivo con una tendencia logarítmica propia de los suelos cohesivos.

REFERENCIAS

Das, B. M. (2014) Advanced Soils Mechanics, New York, USA. International Thomson Editores.

Das, B. M. y Khaled, S. (2014) Principles of Geotechnical Engineering, Eighth Edition, Stamford, USA. Cengage Learning.

Das, B. M. (2013) Consolidación. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (pp. 183-209). México D.F. Cengage Learning Editores.

Das, B. M. (2001) Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Mexico D.F. Thomson Learning Editores.

GONZALO, C. y ESCOBAR, E. (2016) Geomecánica: Galeon. Bogotá D.C, Colombia.: Recuperado de http://www.galeon.com/geomecanica/

LAMBE, T. y WHITMAN, R. (2006). Mecánica de Suelos, México D.F. Limusa Noriega Editores.

Lozano, F. Lopez J. y Bernal, O. (2008). *Asentamientos secundarios en los suelos blandos de la zona el Campín y su correlación con algunos parámetros de los suelos de la zona lacustre en la ciudad de Bogotá D.C.* (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia.

Poveda, C. Castillo, C. y Valencia, J. (2014). *Determinación de la correlación entre el coeficiente de compresión y propiedades índice en suelos de expansión urbana de Pereira específicamente en los sectores de Villa verde, Parque del café y Batará* (Tesis de pregrado). Corporación Universidad Libre Seccional Pereira. Pereira, Colombia.

Gallardo, J. (2010). *Ajuste de los parámetros de consolidación mediante uso de herramientas de programación* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

Barriga, M. y Alvarez D. (2013). *Determinación del índice de compresibilidad e índice de expansion de los suelos cohesivos blandos en la zona de Tonsupa en la provincia de esmeralda*. (Tesis de pregrado). Pontifica Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador.

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010). Reglamento colombiano sismo resistente NSR-10. Bogotá, Colombia. Dirección del sistema habitacional de la República de Colombia.

Fondo de prevención y atención de emergencias (2010). Zonificación de la Respuesta Sísmica de Bogotá para el Diseño Sismo resistente de Edificaciones. Bogotá, Colombia. Subdirección técnica y de gestión.

INV E-151-07. Instituto Nacional de Vias, Colombia

ANEXOS

Anexo 1 Laboratorios de suelos

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S	RESUMEN ENSAYOS DE LABORATORIO	CODIGO: LBF34 F VERSIÓN: 02 FECHA: 16/07/2013

CLIENTE LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S
PROYECTO LFO 15599-1
DIRECCIÓN CLAUSTRO LA ENSEÑANZA CALLE 72 POR CARRERA 7
FECHA MAYO 2 DE 2016

Pag.2 de 2

SONDEO	5					
MUESTRA	6					
PROFUNDIDAD	5,48 - 6,09					

PROPIEDADES ÍNDICE

Wn (%)	23,8					
LL (%)	39,5					
LP (%)	20,2					
IP (%)	19,3					
IL (%)	18,9					
% PASA T-200	82,2					
CLASIF. U.S.C.S	CL					

CONSOLIDACIÓN

W_0 (%)	27,82					
γ (T/m^3)	1,94					
e_0	0,738					
Gs	2,63					
σ_{vo} (T/m^2)						
σ_p (T/m^2)	13,00					
RSC						
Cc	0,17					
C_R	0,04					
Cs	0,03					
$C_R/1+e_0$	0,02					
SATURACIÓN S (%)						

COMPRESIÓN INCONFINADA

W_0 (%)	23,8					
γ (T/m^3)	2,00					
γ_d (T/m^3)	1,62					
q_u (Kg/cm^2)	1,13					
Rp (Kg/cm^2)	---					

SONDEO 5 - 6 Arcilla algo arenosa gris clara con vetas de óxido

Elaboró
Orlan Garcia M.
Laboratorista

Aprobó
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Área Técnica.

CARRERA 73- B No. 7 B - 35 BARRIO CASTILLA TELS 4 11 87 35 - 8 01 91 28

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S	RESUMEN ENSAYOS DE LABORATORIO	CODIGO: LBF34 F VERSIÓN: 02 FECHA:16/07/2013

CLIENTE LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S
PROYECTO LFO 15599-1
DIRECCIÓN CLAUSTRO LA ENSEÑANZA / CALLE 72 POR CARRERA 7
FECHA MAYO 04 DE 2016

SONDEO	12	12	12			
MUESTRA	5	10	15			
PROFUNDIDAD	3,96 - 4,57	12,19 - 12,80	21,34 - 21,95			

PROPIEDADES ÍNDICE

Wn (%)	21,8	21,0	12,6			
LL (%)	30,8	30,3	22,9			
LP (%)	18,1	18,1	13,2			
IP (%)	12,7	12,2	9,6			
IL (%)	29,4	24,1	-5,8			
% PASA T-200	86,2	33,6	20,4			
CLASIF. U.S.C.S	CL	SC	GS			

CONSOLIDACIÓN

W0 (%)	21,08					
γ (T/m^3)	2,06					
e_0	0,564					
Gs	2,66					
σ_{vo} (T/m^2)						
σ_p (T/m^2)	27,00					
RSC		ALTERADA	ALTERADA			
Cc	0,12					
C_R	0,02					
Cs	0,02					
$C_R/1+e_0$	0,01					
SATURACIÓN S (%)						

COMPRESIÓN INCONFINADA

W0 (%)	21,8					
γ (T/m^3)	2,13					
γ_d (T/m^3)	1,75	ALTERADA	ALTERADA			
qu (Kg/cm^2)	1,32					
Rp (Kg/cm^2)	---	---	---			

SONDEO 12 - 5 Arcilla algo arenosa gris clara con vetas de óxido
SONDEO 12 - 10 Arena arcillosa con algo de grava fina angular gris clara - Gradación
SONDEO 12 - 15 Grava gruesa a fina subredondeada arenosa algo arcillosa gris clara - Gradación

Elaboró
Orlan Garcia M.
Laboratorista

Aprobó
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Área Técnica.

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S	CONSOLIDACIÓN INV - 151 - 13	CODIGO. : LBF22 F VERSION : 03 FECHA : 19/05/2014

Cliente	LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S.		
Proyecto	LFO 15599-1		
Dirección	CLAUSTRO LA ENSEÑANZA / CALLE 72 POR CARRERA 7		
Sondeo	12	**Profundidad**	3,96 - 4,57 m
Muestra	5 SHELBY	**Fecha**	MAYO 12 DE 2016

Diámetro de la muestra :	50,00 mm	**Gravedad Especifica :**	2,66
Área de la Muestra :	19,63 cm^2	**Masa Seca :**	68,69 g
Altura de la muestra :	2,06 mm	**Ultima Lectura :**	0,12 cm
Peso unitario (inicial):	2,06 g/cm^3	**Peso unitario (final):**	2,16 g/cm^3
Altura de Sólidos, $h_s = \frac{G_d}{A\gamma_S} =$	1,31 cm	$h_m - h_s =$	0,74 cm

	ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	w_{n1}	**21,08 %**	w_{n2}	**19,35 %**
Relación de Vacios	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$	0,564	$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$	0,470
Saturación	$S_{r1} = \frac{\omega_{n1} G_S}{e_1} \cdot 100$	99,49 %	$S_{r2} = \frac{\omega_{n2} G_S}{e_2} \cdot 100$	109,61 %
Altura de sólidos	h_s	1,31 cm	h_s	1,31 cm
Ultima Lectura			Me	0,124 cm

$\varepsilon = \frac{M}{h_m}$	Carga, P (kg/cm^2)	Deformación (0,0001pulg)	$h_m - h_s - M$ (cm)	Relación de vacios (e)
0,000	0,00	0	0,741	0,564
0,005	0,20	39	0,731	0,557
0,009	0,40	69	0,724	0,551
0,015	0,80	118	0,711	0,541
0,023	1,60	187	0,694	0,528
0,036	3,20	292	0,667	0,508
0,056	6,40	452	0,626	0,477
0,082	12,80	664	0,573	0,436
0,076	3,20	614	0,585	0,445
0,067	0,80	543	0,603	0,459
0,060	0,20	487	0,618	0,470

Elaboré _____
Orlando Garcia M.
Laboratorista

Sello Seco
No Valido Sin Sello

Aprobó _____
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Área Técnica.

Los datos presentados en este informe corresponden únicamente a la muestra mencionada en el encabezado del documento.
Este informe no podrá ser reproducido total y/o parcialmente sin previo aviso y autorización de LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S.

CARRERA 73 B No. 70-35 BARRIO CASTILLA TEL 4 11 87 35 - 8 61 91 28
JULIO C SANTAMARIA 314 313 46 17 Email: laboratorio.deculos@yahoo.es
Bogotá, Colombia

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S

CONSOLIDACIÓN

INV - 151 - 13

CODIGO. : LBF22 F
VERSION : 03
FECHA : 19/05/2014

Cliente LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S.
Proyecto LFO 15599-1
Dirección CLAUSTRO LA ENSEÑANZA / CALLE 72 POR CARRERA 7

Sondeo 12 **Profundidad** 3,96 - 4,57 m
Muestra 5 SHELBY **Fecha** MAYO 12 DE 2016

tiempo en minutos	CONSOLIDACIÓN 0,20 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 0,40 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 0,80 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 1,60 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 3,20 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 6,40 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 12,80 kg/cm²	
	def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in	
0,0	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
0,1	17	0,0017	47	0,0047	87	0,0087	149	0,0149	236	0,0236	360	0,0360	535	0,0535
0,2	19	0,0019	48	0,0048	89	0,0089	153	0,0153	241	0,0241	370	0,0370	549	0,0549
0,4	21	0,0021	50	0,0050	91	0,0091	156	0,0156	247	0,0247	381	0,0381	568	0,0568
0,6	22	0,0022	51	0,0051	93	0,0093	159	0,0159	253	0,0253	390	0,0390	581	0,0581
1	24	0,0024	52	0,0052	95	0,0095	163	0,0163	259	0,0259	401	0,0401	601	0,0601
2	27	0,0027	55	0,0055	99	0,0099	168	0,0168	268	0,0268	417	0,0417	624	0,0624
4	31	0,0031	57	0,0057	102	0,0102	173	0,0173	276	0,0276	428	0,0428	639	0,0639
6	33	0,0033	59	0,0059	104	0,0104	175	0,0175	278	0,0278	432	0,0432	644	0,0644
10	34	0,0034	60	0,0060	106	0,0106	177	0,0177	281	0,0281	436	0,0436	648	0,0648
20	35	0,0035	62	0,0062	108	0,0108	181	0,0181	284	0,0284	439	0,0439	652	0,0652
40	36	0,0036	63	0,0063	110	0,0110	183	0,0183	286	0,0286	441	0,0441	655	0,0655
60	37	0,0037	64	0,0064	111	0,0111	184	0,0184	288	0,0288	442	0,0442	657	0,0657
100			65	0,0065	112	0,0112	185	0,0185	291	0,0291	444	0,0444	659	0,0659
150	38	0,0038			113	0,0113	186	0,0186			446	0,0446	661	0,0661
200			66	0,0066	114	0,0114	187	0,0187	292	0,0292	448	0,0448	662	0,0662
300	39	0,0039									450	0,0450	664	0,0664
400											452	0,0452		
1440			69	0,0069	118	0,0118								
DESCARGA			3,20 kg/cm2		614	0,80 kg/cm²		543	0,20 kg/cm²		487			

Elaboró
Orlaiz Garcia M.
Laboratorista

Sello Seco
No Valido Sin Sello

Aprobó
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Area Tecnica.

Los datos presentados en este informe corresponden únicamente a la muestra mencionada en el encabezado del documento.
Este informe no podrá ser reproducido total y/o parcialmente sin previo aviso y autorización de LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S.

CARRERA 73 B No. 7B -35 BARRIO CASTILLA TEL 4 11 87 35 - 8 01 91 28
JULIO C SANTAMARÍA 311 513 46 37 Email : laboratorio.desuelos@yahoo.es
Bogotá, Colombia

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S	CONSOLIDACIÓN INV - 151 - 13	CODIGO. : LBF22 F VERSION : 03 FECHA : 19/05/2014

Cliente	LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S.		
Proyecto	LFO 15599-1		
Dirección	CLAUSTRO LA ENSEÑANZA CALLE 72 POR CARRERA 7		
Sondeo	5	**Profundidad**	5,48 - 6,09 m
Muestra	6 SHELBY	**Fecha**	MAYO 2 DE 2016

Diámetro de la muestra :	**50,00** mm	**Gravedad Específica :**	**2,63**
Área de la Muestra :	**19,63** cm^2	**Masa Seca :**	**62,61** g
Altura de la muestra :	**2,10** mm	**Ultima Lectura :**	**0,23** cm
Peso unitario (inicial):	**1,94** g/cm^3	**Peso unitario (final):**	**2,09** g/cm^3
Altura de Sólidos, $h_s = \frac{G_d}{A\gamma_S} =$	1,21 cm	$h_m - h_s =$	0,89 cm

	ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	w_{n1}	**27,82 %**	w_{n2}	**22,92 %**
Relación de Vacíos	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$	0,738	$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$	0,551
Saturación	$S_{r1} = \frac{\omega_{n1} G_S}{\varepsilon_1} \cdot 100$	99,31 %	$S_{w2} = \frac{\omega_{n2} G_S}{\varepsilon_2} \cdot 100$	109,68 %
Altura de sólidos	h_s	1,21 cm	h_s	1,21 cm
Ultima Lectura			Me	0,227 cm

$\varepsilon' = \frac{M}{h_m}$	**Carga, P (kg/cm^2)**	**Deformación (0,0001pulg)**	$h_m - h_s - M$ **(cm)**	**Relación de vacíos (e)**
0,000	**0,00**	**0**	**0,893**	**0,738**
0,011	**0,20**	**92**	**0,870**	**0,719**
0,019	**0,40**	**156**	**0,854**	**0,705**
0,029	**0,80**	**243**	**0,832**	**0,687**
0,048	**1,60**	**394**	**0,793**	**0,655**
0,070	**3,20**	**583**	**0,745**	**0,616**
0,102	**6,40**	**846**	**0,678**	**0,561**
0,140	**12,80**	**1156**	**0,600**	**0,496**
0,130	**3,20**	**1076**	**0,620**	**0,512**
0,116	**0,80**	**961**	**0,649**	**0,536**
0,108	**0,20**	**894**	**0,666**	**0,551**

Elaboró _____
Orlain Garcia M.
Laboratorista

Sello Seco
No Valido Sin Sello

Aprobó _____
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Área Técnica.

Los datos presentados en este informe corresponden únicamente a la muestra mencionada en el encabezado del documento.
Este informe no podrá ser reproducido total y/o parcialmente sin previo aviso y autorización de LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S.

CARRERA 73 B No. 7B -35 BARRIO CASTILLA TEL 4 11 87 35 - 8 01 91 28
JULIO C SANTAMARÍA 311 513 46 37 Email : laboratorio.dessuelos@yahoo.es
Bogotá, Colombia

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S

CONSOLIDACIÓN

INV - 151 - 13

CODIGO.	: LBF22 F
VERSION	: 03
FECHA	: 19/05/2014

Cliente LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S.
Proyecto LFO 15599-1
Dirección CLAUSTRO LA ENSEÑANZA CALLE 72 POR CARRERA 7

Sondeo 5 **Profundidad** 5,48 - 6,09 m
Muestra 6 SHELBY **Fecha** MAYO 2 DE 2016

tiempo en minutos	CONSOLIDACIÓN 0,20 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 0,40 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 0,80 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 1,60 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 3,20 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 6,40 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 12,80 kg/cm²	
	def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in	
0,0	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
0,1	32	0,0032	104	0,0104	175	0,0175	285	0,0285	437	0,0437	644	0,0644	910	0,0910
0,2	36	0,0036	106	0,0106	179	0,0179	290	0,0290	446	0,0446	660	0,0660	932	0,0932
0,4	39	0,0039	109	0,0109	184	0,0184	298	0,0298	457	0,0457	677	0,0677	953	0,0953
0,6	41	0,0041	111	0,0111	186	0,0186	304	0,0304	465	0,0465	692	0,0692	969	0,0969
1	45	0,0045	113	0,0113	190	0,0190	313	0,0313	478	0,0478	711	0,0711	994	0,0994
2	52	0,0052	118	0,0118	198	0,0198	327	0,0327	499	0,0499	745	0,0745	1037	0,1037
4	61	0,0061	124	0,0124	207	0,0207	344	0,0344	522	0,0522	782	0,0782	1081	0,1081
6	67	0,0067	128	0,0128	212	0,0212	354	0,0354	537	0,0537	801	0,0801	1101	0,1101
10	75	0,0075	133	0,0133	219	0,0219	365	0,0365	551	0,0551	820	0,0820	1116	0,1116
20	83	0,0083	137	0,0137	226	0,0226	374	0,0374	561	0,0561	829	0,0829	1128	0,1128
40	87	0,0087	142	0,0142	230	0,0230	381	0,0381	571	0,0571	835	0,0835	1134	0,1134
60	89	0,0089	146	0,0146	232	0,0232	384	0,0384	574	0,0574	840	0,0840	1137	0,1137
100	90	0,0090	148	0,0148	236	0,0236	386	0,0386	578	0,0578	841	0,0841	1141	0,1141
150	91	0,0091	150	0,0150	237	0,0237	388	0,0388	579	0,0579	844	0,0844	1144	0,1144
200	91	0,0091	151	0,0151	238	0,0238	390	0,0390	583	0,0583	846	0,0846	1147	0,1147
300	92	0,0092			242	0,0242								
400					243	0,0243								
1440			156	0,0156			394	0,0394					1156	0,1156
DESCARGA			3,20 kg/cm2		1076		0,80 kg/cm²		961		0,20 kg/cm²		894	

Elaboró
Orlain Garcia M.
Laboratorista

Sello Seco
No Valido Sin Sello

Aprobó
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Area Técnica.

Los datos presentados en este informe corresponden únicamente a la muestra mencionada en el encabezado del documento.
Este informe no podrá ser reproducido total y/o parcialmente sin previo aviso y autorización de LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S.
CARRERA 73 B No. 7B -35 BARRIO CASTILLA TEL 4 11 87 35 - 8 01 91 28
JULIO C SANTAMARÍA 311 513 46 37 Email : laboratorio.desuelos@yahoo.es
Bogotá, Colombia

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S	RESUMEN ENSAYOS DE LABORATORIO	CODIGO: LBF34 F VERSIÓN: 02 FECHA:16/07/2013

CLIENTE LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S
PROYECTO LFO 15599-1
DIRECCIÓN CLAUSTRO LA ENSEÑANZA CALLE 72 POR CARRERA 7
FECHA ABRIL 18 DE 2016

SONDEO	4	4	4	6		
MUESTRA	5	11	16	17		
PROFUNDIDAD	3,35 - 3,96	10,05 - 10,66	17,06 - 17,67	24,68 - 25,29		

PROPIEDADES ÍNDICE

Wn (%)	16,5	30,9	23,5	18,8		
LL (%)	22,5	35,7	32,4	27,1		
LP (%)	16,6	18,0	16,7	14,6		
IP (%)	5,9	17,7	15,7	12,4		
IL (%)	-1,8	72,9	43,2	33,4		
% PASA T-200	69,0	88,0	90,6	70,2		
CLASIF. U.S.C.S	CL - ML	CL	CL	CL		

CONSOLIDACIÓN

W0 (%)	16,18	30,79	23,20	18,34		
γ (T/m^3)	2,13	1,87	2,00	2,09		
e_o	0,444	0,831	0,611	0,483		
Gs	2,65	2,62	2,62	2,62		
σ_{VO} (T/m^2)						
σ_p (T/m^2)	32,00	24,00	26,00	17,00		
RSC						
Cc	0,08	0,20	0,17	0,10		
C_R	0,03	0,06	0,05	0,05		
Cs	0,01	0,02	0,04	0,02		
$C_R/1+e_o$	0,02	0,03	0,03	0,03		
SATURACIÓN S (%)						

COMPRESIÓN INCONFINADA

W0 (%)	16,5		23,5	18,8		
γ (T/m^3)	2,12	ESCASO	2,05	2,09		
γ_d (T/m^3)	1,82		1,66	1,76		
q_u (Kg/cm^2)	1,81		1,86	0,88		
Rp (Kg/cm^2)	---	---	---	---		

SONDEO 4 - 5 Arcilla limo arenosa gris clara con vetas de óxido
SONDEO 4 - 11 Arcilla algo arenosa café clara
SONDEO 4 - 16 Arcilla con rastros de arena gris clara
SONDEO 6 - 17 Arcilla arenosa café clara

Nota: Los ensayos que se realizaron fueron tomados de 10cm de muestra lo restante es alterado

Elaboró _____
Orlan Garcia M.
Laboratorista

Aprobó _____
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Área Técnica.

CARRERA 73- B No. 7 B - 35 BARRIO CASTILLA TELS 4 11 87 35 - 8 01 91 28
JULIO C SANTAMARÍA 311 513 46 37 E.mail : laboratorio.desuelos@yahoo.es

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S	CONSOLIDACIÓN INV - 151 - 13	CODIGO. : LBF22 F VERSION : 03 FECHA : 19/05/2014

Cliente	LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S.		
Proyecto	LFO 15599-1		
Dirección	CLAUSTRO LA ENSEÑANZA CALLE 72 POR CARRERA 7		
Sondeo	4	**Profundidad**	3,35 - 3,96 m
Muestra	5 SHELBY	**Fecha**	ABRIL 18 DE 2016

Diámetro de la muestra :	**50,00** mm	**Gravedad Específica :**	**2,65**
Área de la Muestra :	**19,63** cm^2	**Masa Seca :**	**73,92** g
Altura de la muestra :	**2,06** mm	**Ultima Lectura :**	**0,12** cm
Peso unitario (inicial):	**2,13** g/cm^3	**Peso unitario (final):**	**2,27** g/cm^3
Altura de Sólidos, $h_s = \frac{G_d}{A\gamma_S} =$	1,42 cm	$h_m - h_s =$	0,63 cm

	ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	w_{n1}	**16,18 %**	w_{n2}	**16,42 %**
Relación de Vacios	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$	0,444	$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$	0,356
Saturación	$S_{r1} = \frac{\omega_{n1} G_S}{e_1} \cdot 100$	96,39 %	$S_{n2} = \frac{\omega_{n2} G_S}{e_2} \cdot 100$	121,90 %
Altura de sólidos	h_s	1,42 cm	h_s	1,42 cm
Ultima Lectura			Me	0,125 cm

$\varepsilon' = \frac{M}{h_m}$	Carga, P (kg/cm^2)	Deformación (0,0001pulg)	$h_m - h_s - M$ (cm)	Relación de vacíos (e)
0,000	0,00	0	0,632	0,444
0,014	0,20	110	0,604	0,424
0,018	0,40	149	0,594	0,417
0,025	0,80	199	0,581	0,408
0,034	1,60	272	0,563	0,395
0,043	3,20	351	0,543	0,381
0,057	6,40	465	0,514	0,361
0,075	12,80	607	0,478	0,336
0,070	3,20	565	0,488	0,343
0,065	0,80	525	0,499	0,350
0,061	0,20	491	0,507	0,356

Elaboró _____
Orlando Garcia M.
Laboratorista

Sello Seco
No Valido Sin Sello

Aprobó _____
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Área Técnica.

Los datos presentados en este informe corresponden únicamente a la muestra mencionada en el encabezado del documento.
Este informe no podrá ser reproducido total y/o parcialmente sin previo aviso y autorización de LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S.

CARRERA 71 B No. 78 -15 BARRIO CASTILLA TEL 4 11 87 35 - 5 01 91 28
JULIO C SANTAMARIA 311 513 46 37 Email : laboratorio.de.suelos@yahoo.es
Bogotá, Colombia

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S

CONSOLIDACIÓN

INV - 151 - 13

CODIGO.	: LBF22 F
VERSION	: 03
FECHA	: 19/05/2014

Cliente LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S.
Proyecto LFO 15599-1
Dirección CLAUSTRO LA ENSEÑANZA CALLE 72 POR CARRERA 7

Sondeo 4 **Profundidad** 3,35 - 3,96 m
Muestra 5 SHELBY **Fecha** ABRIL 18 DE 2016

tiempo en minutos	CONSOLIDACIÓN 0,20 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 0,40 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 0,80 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 1,60 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 3,20 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 6,40 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 12,80 kg/cm²	
	def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in	
0,0	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
0,1	95	0,0095	136	0,0136	183	0,0183	250	0,0250	332	0,0332	438	0,0438	576	0,0576
0,2	97	0,0097	137	0,0137	185	0,0185	252	0,0252	333	0,0333	440	0,0440	580	0,0580
0,4	99	0,0099	138	0,0138	187	0,0187	254	0,0254	335	0,0335	443	0,0443	583	0,0583
0,6	100	0,0100	139	0,0139	188	0,0188	255	0,0255	336	0,0336	444	0,0444	585	0,0585
1	101	0,0101	140	0,0140	189	0,0189	257	0,0257	338	0,0338	445	0,0445	587	0,0587
2	102	0,0102	141	0,0141	190	0,0190	258	0,0258	340	0,0340	448	0,0448	590	0,0590
4	103	0,0103	142	0,0142	191	0,0191	260	0,0260	341	0,0341	450	0,0450	593	0,0593
6	104	0,0104			192	0,0192	261	0,0261	343	0,0343	451	0,0451	594	0,0594
10	106	0,0106	143	0,0143	193	0,0193	262	0,0262	344	0,0344	453	0,0453	595	0,0595
20	107	0,0107	144	0,0144	194	0,0194	264	0,0264	345	0,0345	455	0,0455	597	0,0597
40			145	0,0145	195	0,0195	266	0,0266	346	0,0346	458	0,0458	599	0,0599
60	108	0,0108			196	0,0196	268	0,0268	347	0,0347	460	0,0460	602	0,0602
100	109	0,0109	146	0,0146	197	0,0197	269	0,0269	348	0,0348	461	0,0461	603	0,0603
150			147	0,0147			270	0,0270	349	0,0349			604	0,0604
200					198	0,0198					462	0,0462	605	0,0605
300	110	0,0110	148	0,0148	199	0,0199	271	0,0271	350	0,0350	463	0,0463	607	0,0607
400									351	0,0351				
1440			149	0,0149			272	0,0272			465	0,0465		
DESCARGA			3,20 kg/cm2		565		0,80 kg/cm²		525		0,20 kg/cm²		491	

Elaboró
Orlain Garcia M.
Laboratorista

Sello Seco
No Valido Sin Sello

Aprobó
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Area Técnica.

Los datos presentados en este informe corresponden únicamente a la muestra mencionada en el encabezado del documento.
Este informe no podrá ser reproducido total y/o parcialmente sin previo aviso y autorización de LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S.
CARRERA 73 B No. 7B -35 BARRIO CASTILLA TEL 4 11 87 35 - 8 01 91 28
JULIO C SANTAMARÍA 311 513 46 37 Email : laboratorio.desuelos@yahoo.es
Bogotá, Colombia

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S	CONSOLIDACIÓN INV - 151 - 13	CODIGO. : LBF22 F VERSION : 03 FECHA : 19/05/2014

Cliente	LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S.		
Proyecto	LFO 15599-1		
Dirección	CLAUSTRO LA ENSEÑANZA CALLE 72 POR CARRERA 7		
Sondeo	4	**Profundidad**	10,05 - 10,66 m
Muestra	11 SHELBY	**Fecha**	ABRIL 18 DE 2016

Diámetro de la muestra :	**50,00** mm	**Gravedad Específica :**	**2,62**
Área de la Muestra :	**19,63** cm^2	**Masa Seca :**	**58,89** g
Altura de la muestra :	**2,10** mm	**Ultima Lectura :**	**0,22** cm
Peso unitario (inicial):	**1,87** g/cm^3	**Peso unitario (final):**	**2,00** g/cm^3
Altura de Sólidos, $h_s = \frac{G_d}{A\gamma_S} =$	1,15 cm	$h_m - h_s =$	0,95 cm

	ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	w_{n1}	**30,79 %**	w_{n2}	**24,79 %**
Relación de Vacíos	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$	0,831	$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$	0,635
Saturación	$S_{r1} = \frac{\omega_{n1} G_S}{\varepsilon_1} \cdot 100$	96,98 %	$S_{r2} = \frac{\omega_{n2} G_S}{\varepsilon_2} \cdot 100$	102,13 %
Altura de sólidos	h_s	1,15 cm	h_s	1,15 cm
Ultima Lectura			Me	0,224 cm

$\varepsilon' = \frac{M}{h_m}$	**Carga, P (kg/cm^2)**	**Deformación (0,0001pulg)**	$h_m - h_s - M$ **(cm)**	**Relación de vacíos (e)**
0,000	**0,00**	**0**	**0,952**	**0,831**
0,011	**0,20**	**87**	**0,930**	**0,812**
0,018	**0,40**	**145**	**0,915**	**0,799**
0,026	**0,80**	**213**	**0,898**	**0,784**
0,043	**1,60**	**352**	**0,863**	**0,753**
0,064	**3,20**	**530**	**0,817**	**0,713**
0,094	**6,40**	**775**	**0,755**	**0,659**
0,131	**12,80**	**1081**	**0,678**	**0,591**
0,124	**3,20**	**1024**	**0,692**	**0,604**
0,115	**0,80**	**952**	**0,710**	**0,620**
0,107	**0,20**	**882**	**0,728**	**0,635**

Elaboró _____
Orlain Garcia M.
Laboratorista

Sello Seco
No Valido Sin Sello

Aprobó _____
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Área Técnica.

Los datos presentados en este informe corresponden únicamente a la muestra mencionada en el encabezado del documento.
Este informe no podrá ser reproducido total y/o parcialmente sin previo aviso y autorización de LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S.

CARRERA 73 B No. 78 -35 BARRIO CASTILLA TEL 4 11 87 35 - 8 01 91 28

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S

CONSOLIDACIÓN

INV - 151 - 13

CODIGO. : LBF22 F
VERSION : 03
FECHA : 19/05/2014

Cliente LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S.
Proyecto LFO 15599-1
Dirección CLAUSTRO LA ENSEÑANZA CALLE 72 POR CARRERA 7

Sondeo 4 **Profundidad** 10,05 - 10,66 m
Muestra 11 SHELBY **Fecha** ABRIL 18 DE 2016

tiempo en minutos	CONSOLIDACIÓN 0,20 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 0,40 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 0,80 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 1,60 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 3,20 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 6,40 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 12,80 kg/cm²	
	def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in		def (0.0001) in	
0,0	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
0,1	36	0,0036	99	0,0099	158	0,0158	258	0,0258	398	0,0398	597	0,0597	843	0,0843
0,2	40	0,0040	102	0,0102	163	0,0163	267	0,0267	410	0,0410	613	0,0613	859	0,0859
0,4	45	0,0045	104	0,0104	167	0,0167	278	0,0278	427	0,0427	637	0,0637	887	0,0887
0,6	48	0,0048	106	0,0106	171	0,0171	286	0,0286	436	0,0436	653	0,0653	907	0,0907
1	53	0,0053	109	0,0109	176	0,0176	296	0,0296	452	0,0452	674	0,0674	936	0,0936
2	61	0,0061	114	0,0114	184	0,0184	312	0,0312	475	0,0475	706	0,0706	984	0,0984
4	70	0,0070	121	0,0121	193	0,0193	327	0,0327	496	0,0496	732	0,0732	1025	0,1025
6	74	0,0074	124	0,0124	198	0,0198	332	0,0332	503	0,0503	743	0,0743	1039	0,1039
10	78	0,0078	125	0,0125	202	0,0202	336	0,0336	511	0,0511	754	0,0754	1042	0,1042
20	82	0,0082	130	0,0130	205	0,0205	340	0,0340	515	0,0515	757	0,0757	1061	0,1061
40	83	0,0083	133	0,0133	207	0,0207	344	0,0344	518	0,0518	764	0,0764	1067	0,1067
60			138	0,0138	208	0,0208	345	0,0345	521	0,0521	764	0,0764	1071	0,1071
100	84	0,0084	139	0,0139	211	0,0211	347	0,0347	525	0,0525	767	0,0767	1072	0,1072
150	85	0,0085	140	0,0140	211	0,0211	348	0,0348	526	0,0526	768	0,0768	1077	0,1077
200	86	0,0086	142	0,0142	212	0,0212	349	0,0349	526	0,0526	769	0,0769	1079	0,1079
300	87	0,0087	143	0,0143	213	0,0213	350	0,0350	528	0,0528	772	0,0772	1081	0,1081
400									530	0,0530				
1440			145	0,0145			352	0,0352			775	0,0775		
DESCARGA			3,20 kg/cm2		1024		0,80 kg/cm²		952		0,20 kg/cm²		882	

Elaboró
Orlain Garcia M.
Laboratorista

Sello Seco
No Valido Sin Sello

Aprobó
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Area Técnica.

Los datos presentados en este informe corresponden únicamente a la muestra mencionada en el encabezado del documento.
Este informe no podrá ser reproducido total y/o parcialmente sin previo aviso y autorización de LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S.
CARRERA 73 B No. 7B -35 BARRIO CASTILLA TEL 4 11 87 35 - 8 01 91 28
JULIO C SANTAMARÍA 311 513 46 37 Email : laboratorio.desuelos@yahoo.es
Bogotá, Colombia

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S	CONSOLIDACIÓN INV - 151 - 13	CODIGO : LBF22 F VERSION : 03 FECHA : 19/05/2014

Cliente	LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S.		
Proyecto	LFO 15599-1		
Dirección	CLAUSTRO LA ENSEÑANZA CALLE 72 POR CARRERA 7		
Sondeo	4	**Profundidad**	17,06 - 17,67 m
Muestra	16 SHELBY	**Fecha**	ABRIL 18 DE 2016

Diámetro de la muestra :	**50,00** mm	**Gravedad Específica :**	**2,62**
Área de la Muestra :	**19,63** cm^2	**Masa Seca :**	**67,29** g
Altura de la muestra :	**2,11** mm	**Ultima Lectura :**	**0,16** cm
Peso unitario (inicial):	**2,00** g/cm^3	**Peso unitario (final):**	**2,14** g/cm^3
Altura de Sólidos, $h_s = \frac{G_d}{A\gamma_S} =$	1,31 cm	$h_m - h_s =$	0,80 cm

	ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	w_{n1}	**23,20 %**	w_{n2}	**21,37 %**
Relación de Vacíos	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$	0,611	$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$	0,487
Saturación	$S_{r1} = \frac{\omega_{n1} G_S}{\varepsilon_1} \cdot 100$	99,36 %	$S_{r2} = \frac{\omega_{n2} G_S}{\varepsilon_2} \cdot 100$	114,91 %
Altura de sólidos	h_s	1,31 cm	h_s	1,31 cm
Ultima Lectura			Me	0,163 cm

$\varepsilon' = \frac{M}{h_m}$	**Carga, P (kg/cm^2)**	**Deformación (0,0001pulg)**	$h_m - h_s - M$ **(cm)**	**Relación de vacíos (e)**
0,000	**0,00**	**0**	**0,800**	**0,611**
0,008	**0,20**	**64**	**0,784**	**0,599**
0,015	**0,40**	**128**	**0,768**	**0,587**
0,025	**0,80**	**207**	**0,748**	**0,571**
0,039	**1,60**	**327**	**0,717**	**0,548**
0,057	**3,20**	**475**	**0,680**	**0,519**
0,084	**6,40**	**700**	**0,622**	**0,476**
0,120	**12,80**	**993**	**0,548**	**0,419**
0,107	**3,20**	**885**	**0,575**	**0,440**
0,091	**0,80**	**759**	**0,607**	**0,464**
0,077	**0,20**	**641**	**0,637**	**0,487**

Elaboró _____
Orlando Garcia M.
Laboratorista

Sello Seco
No Valido Sin Sello

Aprobó _____
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Área Técnica.

Los datos presentados en este informe corresponden únicamente a la muestra mencionada en el encabezado del documento.
Este informe no podrá ser reproducido total y/o parcialmente sin previo aviso y autorización de LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S.

CARRERA 73 B No. 78 -35 BARRIO CASTILLA TEL 4 11 87 35 - 8 01 91 28
JULIO C SANTAMARÍA 311 513 46 37 Email : laboratorio.alesuelos@yahoo.es
Bogotá, Colombia

LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S

CONSOLIDACIÓN

INV - 151 - 13

CODIGO.	: LBF22 F
VERSION	: 03
FECHA	: 19/05/2014

Cliente LFO INGENIEROS DE SUELOS S.A.S.
Proyecto LFO 15599-1
Dirección CLAUSTRO LA ENSEÑANZA CALLE 72 POR CARRERA 7

Sondeo 4 **Profundidad** 17,06 - 17,67 m
Muestra 16 SHELBY **Fecha** ABRIL 18 DE 2016

tiempo en minutos	CONSOLIDACIÓN 0,20 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 0,40 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 0,80 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 1,60 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 3,20 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 6,40 kg/cm²		CONSOLIDACIÓN 12,80 kg/cm²	
	def (0.0001)	in	def (0.0001)	in	def (0.0001)	in	def (0.0001)	in	def (0.0001)	in	def (0.0001)	in	def (0.0001)	in
0,0	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
0,1	40	0,0040	86	0,0086	161	0,0161	254	0,0254	378	0,0378	551	0,0551	796	0,0796
0,2	42	0,0042	88	0,0088	163	0,0163	259	0,0259	385	0,0385	562	0,0562	810	0,0810
0,4	45	0,0045	91	0,0091	166	0,0166	265	0,0265	394	0,0394	577	0,0577	830	0,0830
0,6	47	0,0047	92	0,0092	168	0,0168	270	0,0270	400	0,0400	587	0,0587	844	0,0844
1	49	0,0049	94	0,0094	172	0,0172	276	0,0276	409	0,0409	603	0,0603	866	0,0866
2	51	0,0051	98	0,0098	177	0,0177	286	0,0286	423	0,0423	629	0,0629	902	0,0902
4	53	0,0053	102	0,0102	183	0,0183	297	0,0297	438	0,0438	654	0,0654	935	0,0935
6	55	0,0055	104	0,0104	189	0,0189	303	0,0303	446	0,0446	666	0,0666	949	0,0949
10	57	0,0057	108	0,0108	192	0,0192	308	0,0308	454	0,0454	679	0,0679	957	0,0957
20	59	0,0059	111	0,0111	197	0,0197	314	0,0314	459	0,0459	682	0,0682	968	0,0968
40	60	0,0060	114	0,0114	200	0,0200	318	0,0318	461	0,0461	689	0,0689	975	0,0975
60	61	0,0061	118	0,0118	201	0,0201	320	0,0320	464	0,0464	689	0,0689	978	0,0978
100	62	0,0062	120	0,0120	203	0,0203	321	0,0321	468	0,0468	691	0,0691	980	0,0980
150	63	0,0063	121	0,0121	204	0,0204	322	0,0322	470	0,0470	693	0,0693	983	0,0983
200			122	0,0122	205	0,0205	323	0,0323	470	0,0470	696	0,0696	989	0,0989
300	64	0,0064	124	0,0124	207	0,0207	325	0,0325	472	0,0472	698	0,0698	993	0,0993
400									475	0,0475				
1440			128	0,0128			327	0,0327			700	0,0700		
DESCARGA			3,20 kg/cm2		885		0,80 kg/cm²		759		0,20 kg/cm²		641	

Elaboró
Orlain Garcia M.
Laboratorista

Sello Seco
No Valido Sin Sello

Aprobó
Julio Cesar Santamaria H.
Jefe de Area Técnica.

Los datos presentados en este informe corresponden únicamente a la muestra mencionada en el encabezado del documento.
Este informe no podrá ser reproducido total y/o parcialmente sin previo aviso y autorización de LABSUELOS SANTAMARIA S.A.S.
CARRERA 73 B No. 7B -35 BARRIO CASTILLA TEL 4 11 87 35 - 8 01 91 28
JULIO C SANTAMARÍA 311 513 46 37 Email : laboratorio.desuelos@yahoo.es
Bogotá, Colombia

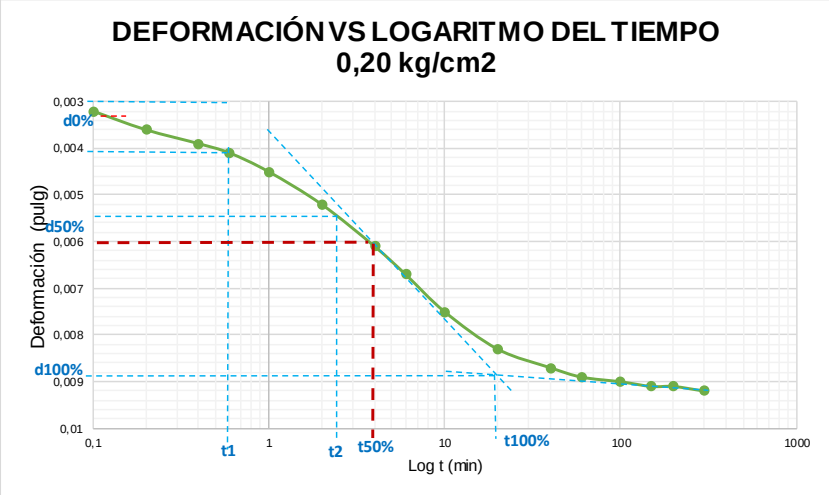
Anexo 2 Graficas

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DEL LOGARITMO DEL TIEMPO

ESTUDIO DE SUELOS	LFO-15999				
DIRECCIÓN	CALLE 72 CRA 7				
SONDEO	5	**PROFUNDIDAD (m)**	5,48	-	6,09
MUESTRA	6	**FECHA**	2/05/2016		

TIEMPO (min)	**0,20 kg/cm2 (pulg)**
0	
0,1	0,0032
0,2	0,0036
0,4	0,0039
0,6	0,0041
1	0,0045
2	0,0052
4	0,0061
6	0,0067
10	0,0075
20	0,0083
40	0,0087
60	0,0089
100	0,009
150	0,0091
200	0,0091
300	0,0092



d100	0,0089
d0	0,003
d50	0,00595
t1 (min)	0,6
t2 (min)	2,4

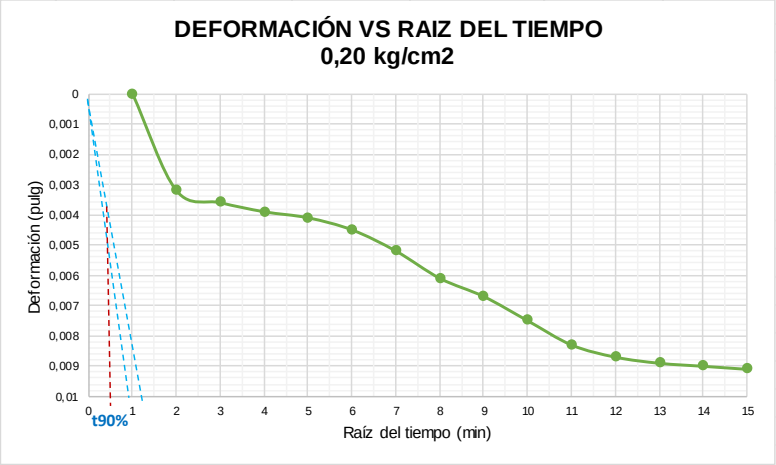
t50 (min)	3
t50 (seg)	180
H' (cm)	0,21
Cv (cm2/s)	4,827E-05

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DEL LA RAIZ CUADRADA DEL TIEMPO

ESTUDIO DE SUELOS	LFO-15999				
DIRECCIÓN	CALLE 72 CRA 7				
SONDEO	5	**PROFUNDIDAD (m)**	5,48	-	6,09
MUESTRA	6	**FECHA**	2/05/2016		

TIEMPO	**0,20 kg/cm2**
(min)	**(pulg)**
0	0
0,1	0,0032
0,2	0,0036
0,4	0,0039
0,6	0,0041
1	0,0045
2	0,0052
4	0,0061
6	0,0067
10	0,0075
20	0,0083
40	0,0087
60	0,0089
100	0,009
150	0,0091
200	
300	



O	0
Q	1
OQ	1
OR	1,15

t90 (min)	0,5
t90 (s)	30
H' (cm)	1
Cv (cm2/s)	9,42E-04

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS

ESTUDIO DE SUELOS	LFO-15999				
DIRECCIÓN	CALLE 72 CRA 7				
SONDEO	5	**PROFUNDIDAD (m)**	5,48	-	6,09
MUESTRA	6	**FECHA**	2/05/2016		

1 **Datos de entrada****

LL(%)	Gs	σ'0 (KN/m2)
39,5	2,63	108,77

Datos tomados del resumen de ensayo de laboratorio

2 **Relación de vacíos en el límite líquido**

Calculado por medio de la siguiente expresión

$$e_L = \left[\frac{LL(\%)}{100}\right] G_s$$

eL	1,03885

3. **Coeficiente de consolidación**

$$C_v = \left[\frac{1 + e_L(1.23 - 0.276 \log \sigma'_0)}{e_L}\right]\left[\frac{10^{-3}}{(\sigma'_0)^{0.353}}\right]$$

Cv (cm2/s)	3,11E-04

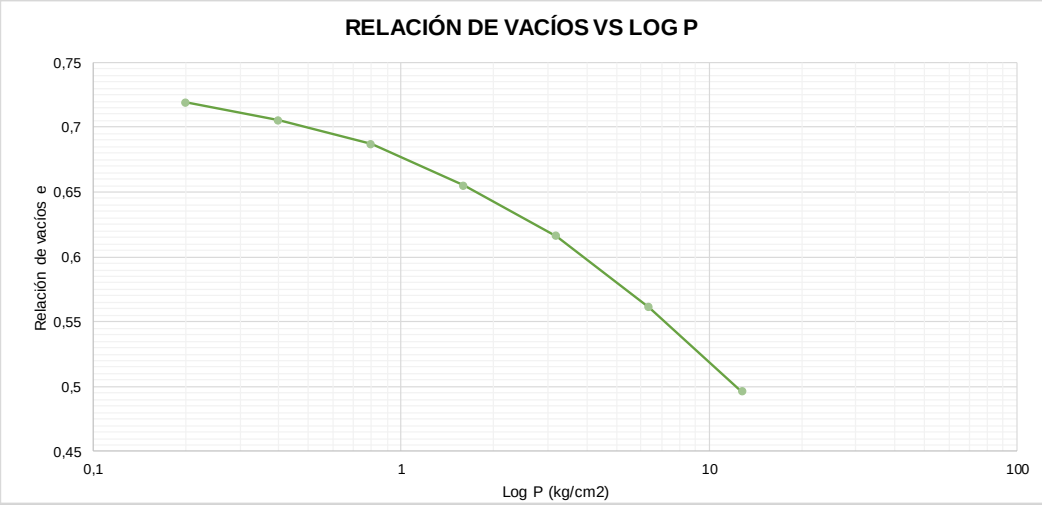
Nota: Este método fue propuesto para predecir el coeficiente de consolidación de arcillas normalmente consolidadas no cementadas

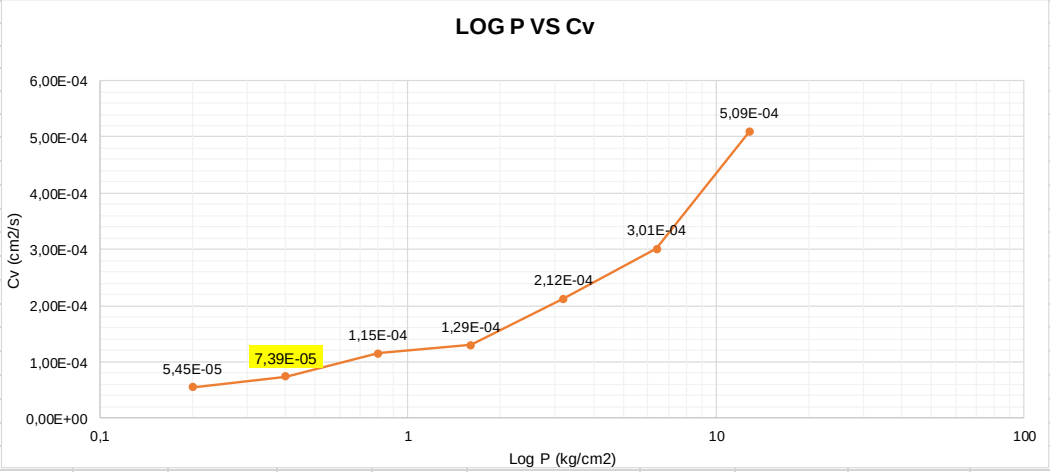
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DE CORRELACIÓN CON EL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD**

ESTUDIO DE SUELOS	LFO-15999				
DIRECCIÓN	CALLE 72 CRA 7				
SONDEO	5	**PROFUNDIDAD (m)**	5,48	-	6,09
MUESTRA	6	**FECHA**	2/05/2016		

LL	LP	eprom	Tipo de Arcilla	Cv /cm2/s)
39,5	20,2	0,647125	Caolinita	7,39E-05

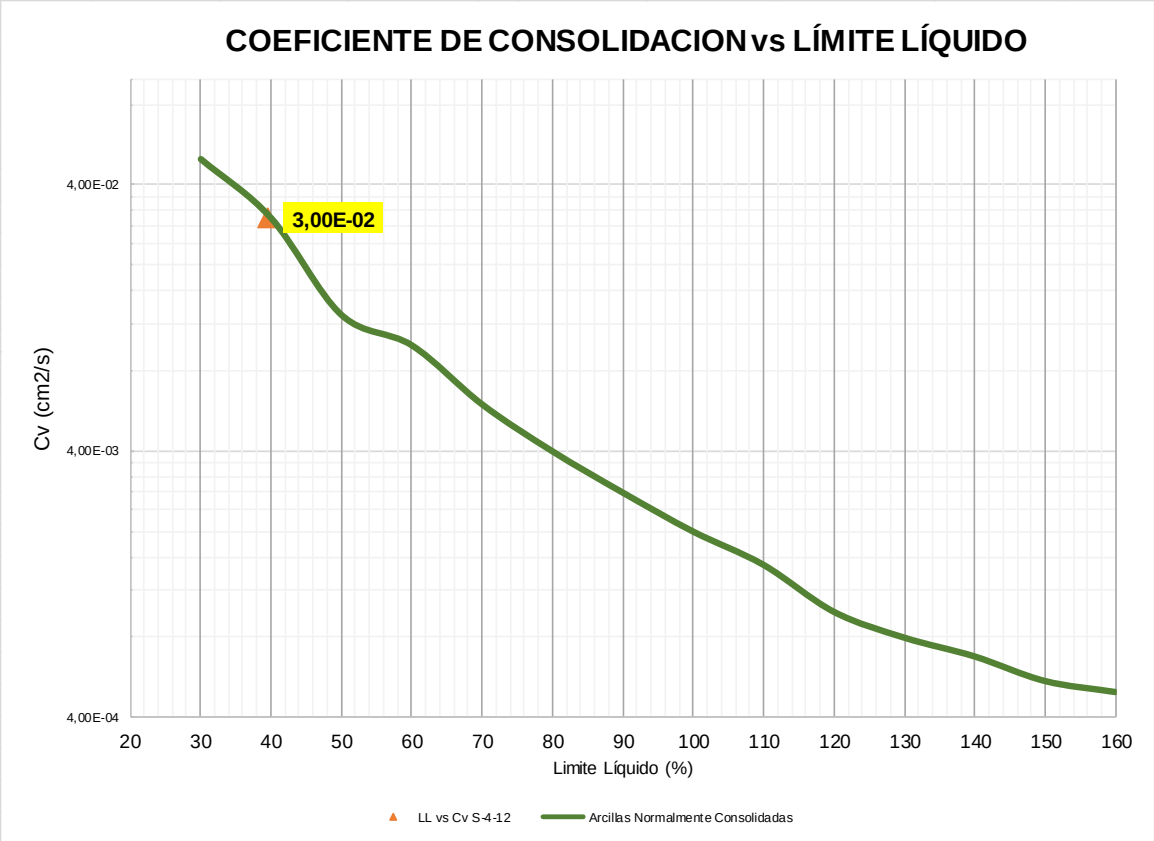
P(kg/cm2)	e	Δe	Δσ'	eav	av (kg/cm2)^-1	mv (cm2/s)	γw (kg/cm3)	k(cm/s)	Cv (cm2/s)
0	0,738								
0,2	0,719	0,019	0,2	0,0345714	0,095	0,0918255	0,001	5,00E-09	5,45E-05
0,4	0,705	0,014	0,2	0,0345714	0,070	0,0676609	0,001	5,00E-09	7,39E-05
0,8	0,687	0,018	0,4	0,0345714	0,045	0,0434963	0,001	5,00E-09	1,15E-04
1,6	0,655	0,032	0,8	0,0345714	0,040	0,0386634	0,001	5,00E-09	1,29E-04
3,2	0,616	0,039	1,6	0,0345714	0,024	0,0235605	0,001	5,00E-09	2,12E-04
6,4	0,561	0,055	3,2	0,0345714	0,017	0,0166132	0,001	5,00E-09	3,01E-04
12,8	0,496	0,065	6,4	0,0345714	0,010	0,0098169	0,001	5,00E-09	5,09E-04





UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - CORRELACIÓN ENTRE EL LÍMITE LIQUIDO Y Cv.**

ESTUDIO DE SUELOS	LFO-15999				
DIRECCIÓN	CALLE 72 CRA 7				
SONDEO	5	**PROFUNDIDAD (m)**	5,48	-	6,09
MUESTRA	6	**FECHA**	2/05/2016		



Sondeo	Muestra	Profundidad (m)			Limite Líquido (%)	Cv (cm2/s)
5	6	5,48	-	6,09	39,5	3,00E-02

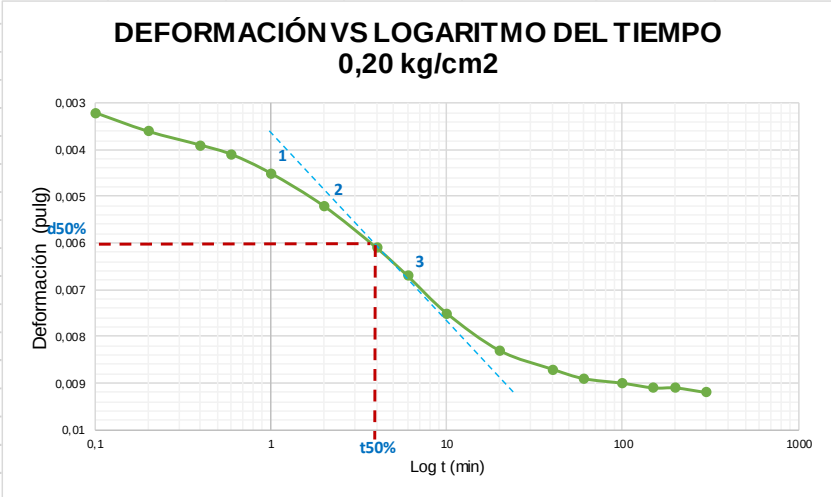
Nota: La curva de consolidación se tomo de l tabla 1.24 del libro Fundamentos de ingenieria de Cimentaciones (Braja M Das), y es utilizada por el departamento de la Marina de Estados Unidos los valores que muesta la curva de LL vs Cv aplican para arcillas normalmente consolidadas

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO COMPUTACIONAL

ESTUDIO DE SUELOS	LFO-15999				
DIRECCIÓN	CALLE 72 CRA 7				
SONDEO	5	**PROFUNDIDAD (m)**	5,48	-	6,09
MUESTRA	6	**FECHA**	2/05/2016		

TIEMPO (min)	0,20 kg/cm2 (pulg)
0	
0,1	0,0032
0,2	0,0036
0,4	0,0039
0,6	0,0041
1	0,0045
2	0,0052
4	0,0061
6	0,0067
10	0,0075
20	0,0083
40	0,0087
60	0,0089
100	0,009
150	0,0091
200	0,0091
300	0,0092



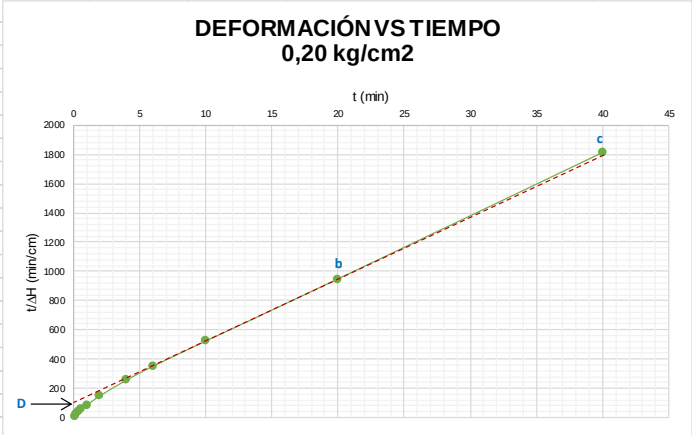
d1	0,0045			**t1**	1, min	60, seg
d2	0,0052			**t2**	2, min	120, seg
d3	0,0067			**t3**	6, min	360, seg
		H' (cm)	0,21			
d0	0,0028101			**d100**	0,0076528	
		Cv (cm2/s)	0,0004863			

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DE LA HIPÉRBOLA RECTANGULAR

ESTUDIO DE SUELOS	LFO-15999				
DIRECCIÓN	CALLE 72 CRA 7				
SONDEO	5	**PROFUNDIDAD (m)**	5,48	-	6,09
MUESTRA	6	**FECHA**	2/05/2016		

TIEMPO (min)	0,20 kg/cm2 (pulg)	ΔH (cm)	t/ΔH (min/cm)
0			
0,1	0,0032	0,008128	12,30
0,2	0,0036	0,009144	21,87
0,4	0,0039	0,009906	40,38
0,6	0,0041	0,010414	57,61
1	0,0045	0,01143	87,49
2	0,0052	0,013208	151,42
4	0,0061	0,015494	258,16
6	0,0067	0,017018	352,57
10	0,0075	0,01905	524,93
20	0,0083	0,021082	948,68
40	0,0087	0,022098	1810,12
60	0,0089	0,022606	2654,16
100	0,009	0,02286	4374,45
150	0,0091	0,023114	6489,57
200	0,0091	0,023114	8652,76
300	0,0092	0,023368	12838,07



b (t/ΔH)	948,68	**m**	43,072	
c (t/ΔH)	1810,12			
		D	120, min/cm	7200, seg/cm
b (t)	20			
c (t)	40	**H' (cm)**	0,21	

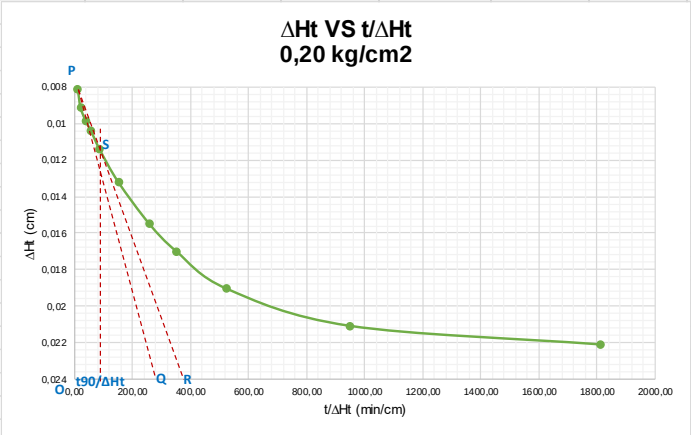
Cv (cm2/s)	7,914E-05

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO ΔHt - t / ΔHt

ESTUDIO DE SUELOS	LFO-15999				
DIRECCIÓN	CALLE 72 CRA 7				
SONDEO	5	**PROFUNDIDAD (m)**	5,48	-	6,09
MUESTRA	6	**FECHA**	2/05/2016		

TIEMPO (min)	0,20 kg/cm2 (pulg)	ΔHt (cm)	t/ΔHt (min/cm)
0			
0,1	0,0032	0,008128	12,30
0,2	0,0036	0,009144	21,87
0,4	0,0039	0,009906	40,38
0,6	0,0041	0,010414	57,61
1	0,0045	0,01143	87,49
2	0,0052	0,013208	151,42
4	0,0061	0,015494	258,16
6	0,0067	0,017018	352,57
10	0,0075	0,01905	524,93
20	0,0083	0,021082	948,68
40	0,0087	0,022098	1810,12
60	0,0089	0,022606	2654,16
100	0,009	0,02286	4374,45
150	0,0091	0,023114	6489,57
200	0,0091	0,023114	8652,76
300	0,0092	0,023368	12838,07



OQ	280	**t90/ΔHt**	87,49	
OR	372,4	**S ΔHt**	0,0114	
H' (cm)	0,21	**t90**	1, min	59,8 seg

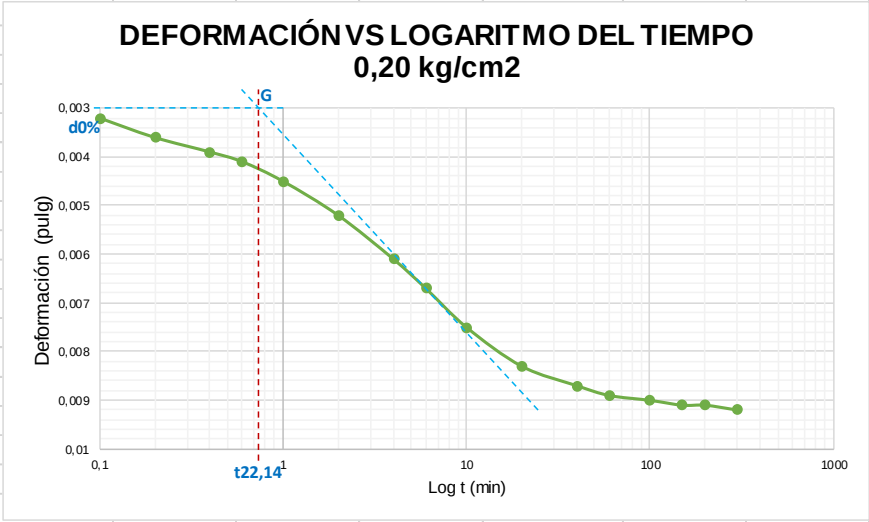
Cv (cm2/s) 0,0006249

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN POR DISTINTOS MÉTODOS EN ARCILLAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ - MÉTODO DE LA ETAPA TEMPRANA DEL LOGARITMO DEL TIEMPO

ESTUDIO DE SUELOS	LFO-15999				
DIRECCIÓN	CALLE 72 CRA 7				
SONDEO	5	**PROFUNDIDAD (m)**	5,48	-	6,09
MUESTRA	6	**FECHA**	2/05/2016		

TIEMPO (min)	**0,20 kg/cm2 (pulg)**
0	
0,1	0,0032
0,2	0,0036
0,4	0,0039
0,6	0,0041
1	0,0045
2	0,0052
4	0,0061
6	0,0067
10	0,0075
20	0,0083
40	0,0087
60	0,0089
100	0,009
150	0,0091
200	0,0091
300	0,0092



H' (cm)	0,21			
t22,14	0,7 min	43,2 seg	**Cv (cm2/s)**	3,93E-05