

**DETERMINACIÓN DE LA COMPRESIBILIDAD
DE SUELOS FINOS REPRESENTATIVOS
DEL MUNICIPIO DE VÉLEZ**

ANDRES FERNANDO BELLO FLOREZ

LUIS EDUARDO NIÑO JAIMES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS**

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

BUCARAMANGA

2016

**DETERMINACIÓN DE LA COMPRESIBILIDAD
DE SUELOS FINOS REPRESENTATIVOS
DEL MUNICIPIO DE VÉLEZ**

**ANDRES FERNANDO BELLO FLOREZ
LUIS EDUARDO NIÑO JAIMES**

**Trabajo de Grado presentado como Requisito para obtener el título de
Ingeniero Civil**

**Directora:
HEBENLY CELIS LEGUIZAMO
Ingeniera Civil – M.sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

Dedico este libro a mi madre Luz Marina Flores junto al resto de mi familia sin lugar a dudas el motor de mi vida. Por su amor infinito, su cofinancia y enseñanzas que han iluminado mi camino y me motivan a seguir soñando.

A mis amigos, personas maravillosas por su apoyo incondicional y por los incontables momentos de alegría.

A mi compañero de proyecto Luis Niño Jaimes una gran persona a la que tengo la fortuna considerarlo un amigo.

Andrés Fernando Bello Flórez

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres Luis Niño Moreno y Flor de María Jaimes que con su sacrificio me han brindado la oportunidad de realizar mis estudios, por su infinita fortaleza y su constante enseñanza, consejos y valores que me han permitido escoger el camino del bien.

A mis compañeros de estudio que durante todo el camino contribuyeron al crecimiento y apoyo intelectual como ser humano.

A mi compañero de proyecto Andrés F. Bello una gran persona a la que tengo la fortuna considerarlo un amigo.

Y finalmente a una persona que ha estado presente en los momentos más difíciles y más alegres durante gran parte de mí vida a ti Cindy R. Jaimes S. que con su apoyo y constante aliento me impulsaron a realizar este pequeño pero gran logro de corazón muchas Gracias.

Luis Eduardo Niño Jaimes

AGRADECIMIENTOS

Por su excelente orientación le agradecemos a nuestra Directora de proyecto, la ingeniera Hebenly Celis Leguizamo, queremos agradecerle por su paciencia, sus enseñanzas y sus conocimientos.

A los auxiliares de laboratoristas Jairo “La mechuda”, Álvaro “amasijo”, y German Hernández por compartir sus conocimientos y experiencia siempre dispuestos ante cualquier inquietud.

A nuestros compañeros de ingeniería civil por su apoyo durante esta etapa de nuestras vidas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. SELECCIÓN DE MUESTRAS	19
3. CARACTERIZACION DE LAS MUESTRAS	20
4. ENSAYO DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL.....	21
4.1 CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO EN EL SOFTWARE EDS.	22
4.2 BASE DE DATOS.....	23
4.3 PREPARACIÓN Y MONTAJE DE LA MUESTRA.....	24
4.4 EJECUCIÓN DE TOMA DE DATOS.....	26
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
5.1 DETERMINACIÓN DE LOS INDICES DEL SUELO.....	31
6. CONCLUSIONES	32
7. DISCUSIÓN O RECOMENDACIONES.....	33
BIBLIOGRAFIA.....	35
ANEXOS.....	36

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1-4. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el primer día de carga.	30
Figura 5. Grafica e Vs Presión del apique N° 42 mostrada en el software EPAEDO.	31
Figura 6. Datos de los ensayos de granulometría y limites apique N° 1	37
Figura 7. Datos de los ensayos de granulometría y limites apique N° 1.	39
Figura 8. Datos de los ensayos de granulometría y limites apique N° 1.	41
Figura 9. Datos de los ensayos de granulometría y limites apique N° 42	43
Figura 10. Método de logaritmo del tiempo para determinar el coeficiente de consolidación.	52
Figura 11. Método de la raíz cuadrada para determinar el coeficiente de consolidación.	53
Figura 12. Método para calcular la presión de sobre-consolidación.	55

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Número de muestras obtenidas y analizadas.	19
Tabla 2. Datos de muestras a analizar y sus respectivas convenciones de colores.	21
Tabla 3. Resultados de la caracterización de las muestras a analizar.	21
Tabla 4. Intervalos de tiempos para la toma de datos.	23
Tabla 5. Series de cargas y de presiones aplicadas en el porta-pesas.	27
Tabla 6. Datos del apique N° 42.	29
Tabla 7. Resultados de coeficiente de consolidación, índice de compresión, coeficiente de compresibilidad, módulo edométrico e índice de hinchamiento de las muestras analizadas.	32
Tabla 8. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 1	36
Tabla 9. Datos del apique N° 1.	37
Tabla 10. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 4	38
Tabla 11. Datos del apique N° 4.	39
Tabla 12. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 25.	40
Tabla 13. Datos del apique N° 25.	41
Tabla 14. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 42	42
Tabla 15. Datos del apique N° 42.	43

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
GRÁFICA 1. Puntos de localización de apiques en el municipio de Vélez.	20
GRÁFICA 2. Árbol de muestras EDS.	23
GRÁFICA 3. Datos de muestras EDS.	24
GRÁFICA 4. Elementos de célula edométrico con muestra en la anilla.	25
GRÁFICA 5. Edómetro de carga central, unidad de adquisición de datos, ordenador.	26
GRÁFICA 6. Ventana de monitorización EDS.	28
GRÁFICA 7. <i>Representación de suelo homogéneo, cohesivo y saturado</i>	45
GRÁFICA 8. <i>Las partículas del suelo y el agua son incompresibles</i>	46
GRÁFICA 9. Muestra de suelo con compresión unidimensional.	46
GRÁFICA 10. Muestra infinitesimal de suelo con flujo unidimensional.....	47
GRÁFICA 11. Estado inicial en el tiempo cero.	48
GRÁFICA 12. Estado intermedio de tiempo.	48
GRÁFICA 13. Resumen de los estados de tiempo.....	49
GRÁFICA 14. Deformación apropiada en el ensayo.	49
GRÁFICA 15. Transferencia de presiones en la etapa inicial.....	50
GRÁFICA 16. Transferencia de presiones para tiempos mayores a cero	50

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA, LÍMITES, GRAVEDAD ESPECÍFICA Y CONTENIDO DE AGUA.	36
ANEXO B FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS.	44
ANEXO C PROCEDIMIENTO DETERMINACIÓN C_v Y DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN.	51

RESUMEN

TITULO: DETERMINACION DE LA COMPRESIBILIDAD DE SUELOS FINOS REPRESENTATIVOS DEL MUNICIPIO DE VELEZ.*

AUTORES: ANDRES FERNANDO BELLO FLOREZ
LUIS EDUARDO NIÑO JAIMES**

PALABRAS CLAVES: Ensayo consolidación unidimensional, software Epaedo, Eds.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto plantea el análisis y procedimiento realizado en ensayos de consolidación unidimensional utilizando el edómetro de carga central, adquirido por la escuela de Ingeniería Civil para el provecho de sus estudiantes y mejoramiento del servicio prestado por sus laboratorios al público en general, aprovechando las ventajas del uso de softwares dedicados a la gestión y el almacenamiento de los datos recolectados durando el ensayo como lo son Epaedo y Eds de la empresa PROETI S.A.

Las muestras de suelo a estudiar son procedentes de apiques extraídos para el estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del municipio de Vélez, Santander, a las cuales se les realizo ensayos de granulometría, límites y corte directo por la empresa ingeniería y suelos s.a.s. de allí se seleccionaron cuatro muestras finales de las cuales se obtuvieron los coeficientes de consolidación, índice de compresión, coeficiente de compresibilidad, módulo edométrico e índice de hinchamiento, esto con la finalidad no solamente de ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de estos suelos sino también para educar acerca del manejo de este tipo de softwares y equipos mediante la elaboración de videos tutoriales y material de apoyo basado en la normativa decretada por el Instituto Nacional de Vías.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Ingeniera M.Sc Hebenly Celis

ABSTRACT

TITLE: DETERMINACION DE LA COMPRESIBILIDAD DE SUELOS FINOS REPRESENTATIVOS DEL MUNICIPIO DE VELEZ.*

AUTHOR: ANDRES FERNANDO BELLO FLOREZ
LUIS EDUARDO NIÑO JAIMES**

KEYWORDS: one-dimensional consolidación test, software Epaedo, Eds.

DESCRIPTION:

This project involves the analysis and procedures for one-dimensional consolidation tests using a centre-loading oedometer, acquired by the School of Civil Engineering for the benefit of their students and the like improving the service provided by his laboratories to General Public, taking advantage of the use of dedicated softwares to management and data storage collected during the test, as are Epaedo and Eds by Proeti S.A.

The soil samples studied are from thin-wall soil samples, extracted for the study of threat, vulnerability and risk by mass movements of the municipality of Velez, Santander, to which I underwent tests granulometry, limits and direct cutting for Ingenieria y suelos company S.A.S. there four final samples were selected which obtained were in this test are the coefficients of consolidation, compression ratio and compressibility, also the oedometer module and swelling index, this in order not only to expand knowledge about the behavior of these soils but also to educate about handling this type of software and equipment by developing videos tutorials and support materials based on the rules enacted by the National Roads Institute.

* degree work

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Directora: Engineer M.Sc Hebenly Celis

INTRODUCCIÓN

Al estudiar el comportamiento de un suelo debemos tener en cuenta los desafíos que este presenta, un suelo es un material heterogéneo y anisotrópico, esto quiere decir que sus propiedades físicas dependen de la dirección en que es estudiada, Muchas de las teorías de que disponemos para modelar el comportamiento mecánico de los materiales que se usan en ingeniería, suponen que los materiales son homogéneos e isotrópicos; debemos suponer en muchos casos una respuesta esfuerzo-deformación lineal, pero para calcular adecuadamente se deben aplicar grandes correcciones empíricas o factores de seguridad a nuestros diseños, para calcular el comportamiento real del material. [1]

Aunque los estudios geotécnicos mediante sondeos y ensayos de laboratorios nos proporcionan datos relevantes para comprender el comportamiento y estabilidad del suelo analizado, no son suficientes puesto que la variación en sus propiedades físicas genera grandes incertidumbres que podrían generar inconvenientes en las estructuras o taludes.

Uno de los factores determinados a partir de los estudios geotécnicos es la deformación vertical o asentamiento del suelo al sometido a cargas externas como lo son las cargas generadas en la cimentación de las estructuras. Los suelos al igual que todos los materiales sufren deformaciones cuando experimentan cambios en sus condiciones de esfuerzos naturales, los asentamientos dependen del tipo de suelo, de su estado de consistencia, de la forma en la que es cargado y de su capacidad de drenaje, podrían ocurrir de manera instantánea o a lo largo de un periodo de tiempo mayor.

En los suelos finos cohesivos como es el caso de las arcillas y los limos plásticos el asentamiento es lento y se le denomina consolidación, este proceso se divide en tres etapas, la consolidación inicial generado por la expulsión y compresión de aire, este evento sucede de forma casi instantánea, la consolidación primaria producida por un aumento de presión intersticial disipada por la expulsión de agua de los

vacíos, en esta etapa las cargas que antes eran soportadas por el agua son transferidas a las partículas sólidas del suelos, por último la consolidación secundaria es causada por un reajuste del esqueleto mineral para que pueda soportar toda la carga impuesta.

Con el fin de estandarizar el procedimiento y análisis en los ensayos de laboratorios referentes a la ingeniería civil, Colombia implemento varias normas técnicas destinadas a exigir calidad y precisión en estos ensayos, para los estudios de suelos rigen las normas decretadas por el Instituto Nacional de Vías INVÍAS. En el caso específico de este proyecto la norma utilizada es la I.N.V.E - 151 Consolidación Unidimensional de suelos [2], este ensayo de laboratorio asume que la posición relativa de las partículas sobre un mismo plano horizontal permanece esencialmente igual, el movimiento de las mismas sólo puede ocurrir verticalmente.

Debido a las necesidades de infraestructura requerida por la globalización, la demanda de estudios geotécnicos ha tenido un auge notable en los últimos años, de ahí la urgencia por transformar la metodología que hasta la fecha ha sido empleada. Una mayor tecnificación de los laboratorios es un factor fundamental en esta etapa. Esto se traduce en mayor precisión y confiabilidad de los datos y en la optimización tanto de tiempo como de recursos. Debemos aceptar y asimilar los avances que año tras año la ciencia y tecnología nos brinda.

En las últimas décadas el sector tecnológico e informático ha crecido a un ritmo exponencial, los avances en la creación de software junto al desarrollo de equipos cada vez más precisos y eficientes han surgidos como una herramienta poderosa; La implementación de estos avances tecnológicos en los laboratorios han permitido evolucionar tan la toma de datos como en su gestión, este es el caso del edómetro informatizado, este sistema consta de un edómetro de carga central, una unidad de adquisición de datos, un ordenador con el Software para ensayos edométricos.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las características de consolidación de los suelos representativos del municipio de Vélez.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos de consolidación unidimensional a las muestras representativas escogidas con un estudio previo de caracterización
- Obtener los módulos de deformación y coeficientes de consolidación por medio del software EPAEDO.
- Elaborar videos tutoriales como alternativa de enseñanza sobre el manejo del equipo y de los software Eds y Epaedo para el ensayo de consolidación unidimensional de suelos

2. SELECCIÓN DE MUESTRAS

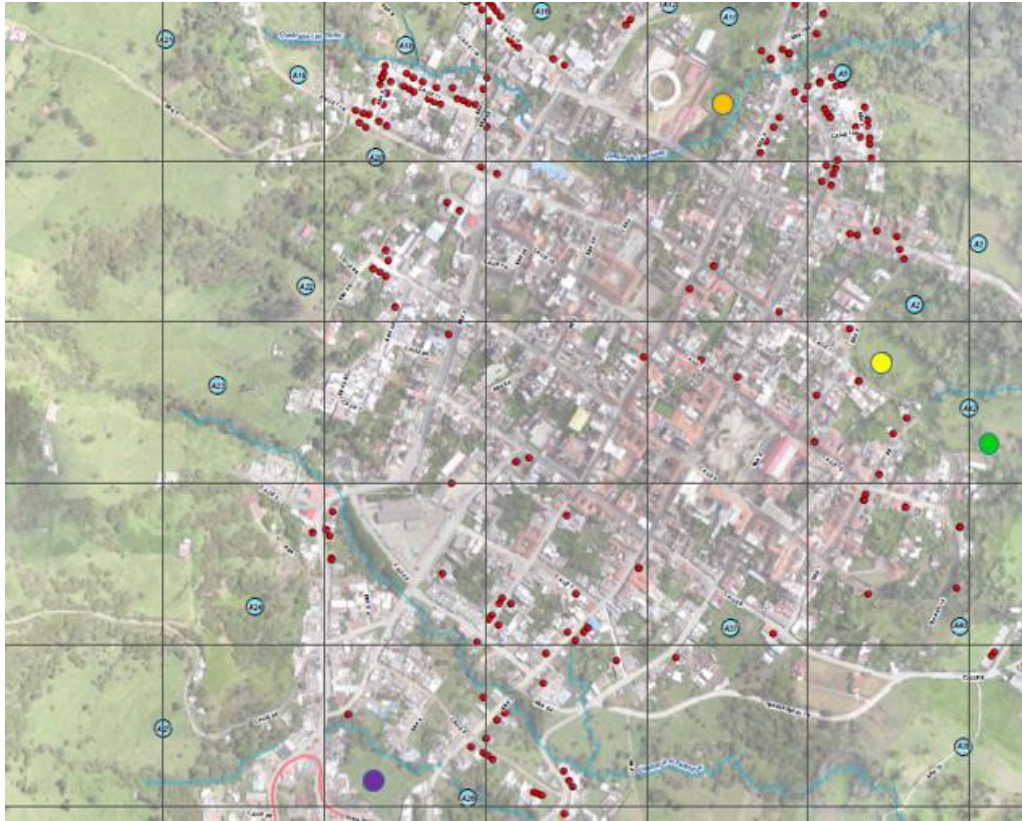
Los datos de sondeos y apiques con los cuales se trabajó en el presente proyecto fue proporcionada por el grupo de investigación geomática de la Universidad Industrial de Santander, debido a la gran cantidad de datos que se manejó y la presencia de información inconsistente se excluyeron algunas muestras, posteriormente se buscaron los apiques con los cuales se podían trabajar, así se seleccionaron cuatro muestras según su granulometría, límites de atterberg y su ubicación de tal manera que fueran representativas del municipio de Vélez, Santander.

Tabla 1. Número de muestras obtenidas y analizadas.

Total de muestras	Muestras en físico	Total analizadas
25	10	4

La Tabla 1 especifica la cantidad de muestras obtenidas, estas muestras fueron analizadas por la empresa ingeniera y suelos s.a.s. y como resultado nos brindaron los datos de granulometría, corte directo y de límites de consistencia. Posterior a esto se procedió a verificar el total de muestras guardadas en el laboratorio y con cantidad de material suficiente para realizar los ensayos de consolidación unidimensional, teniendo finalmente un total de 6 muestras, de las cuales se seleccionaron cuatro según su ubicación geográfica con el fin de escoger una muestra representativa en el municipio de Vélez, esta ubicación se puede observar en la **Grafica 1**.

GRÁFICA 1. Puntos de localización de apiques en el municipio de Vélez.



Fuente: Grupo de investigación Geomática, localización de los apiques propuestos para el área urbana del municipio de Vélez, Santander.

3. CARACTERIZACION DE LAS MUESTRAS

Las muestras con las que se realizaron los ensayos para este trabajo de grado, se seleccionaron primeramente según su clasificación por el sistema U.S.C.S. [3] Seguidamente se tuvo en cuenta el índice de plasticidad. En la **Tabla 2.** Se muestran estos datos de las muestras a ensayar.

Tabla 2. Datos de muestras a analizar y sus respectivas convenciones de colores.

Apique	Clasificación	Índice de Plasticidad
1	CL	19
4	CH	26
25	ML	18
42	MH	21

A partir de las muestras y de su clasificación se realizaron ensayos de:

- Gravedad específica
- Contenido de Agua (Humedad)

En el **Anexo A**. Se pueden encontrar los resultados detallados de los ensayos de granulometría, límites, Gravedad específica y contenido de agua.

El resumen de los resultados obtenidos de cada una de las muestras se describe en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Resultados de la caracterización de las muestras a analizar.

Apique	W %	Granulometría			Límites			Peso Especifico
		% Gravas	% Arenas	% Finos	LL	LP	IP	
1	34.92	3.7	12.5	83.8	45	26	19	2.7
4	41.33	0.3	6.1	93.7	54	28	26	2.55
25	14.16	1.8	6.3	91.9	50	32	18	2.62
42	15.38	0	5.5	94.5	58	37	21	2.64

4. ENSAYO DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL

La teoría utilizada para el ensayo de consolidación y las hipótesis tenidas en cuenta para este ensayo se presentan de manera clara y detallada en el ANEXO B. Los ensayos de consolidación unidimensional de suelos están basados en las normas INV E-151, ASTM D 2435-90, UNE 103 405-94 y AASHTO T216. [4]

Este proyecto se realizó utilizando el edómetro informático desarrollo por PROETI S.A, un sistema que integra la tecnología de equipos de alta precisión y aplicaciones creadas específicamente para asistir los ensayos de laboratorio en suelos. [5]

El software está dividido en dos aplicaciones, cada una destinada a diferentes fases del ensayo. EDS es la aplicación diseñada para la toma de datos y EPAEDO es la encargada del procesamiento de los datos obtenidos en el ensayo. Estas aplicaciones a su vez están compuestas por numerosos paquetes de ensayos que agrupan ensayos similares. El ensayo de consolidación se encuentra dentro del paquete de ensayos edométricos.

4.1 CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO EN EL SOFTWARE EDS.

El software para ensayos de suelos EDS es una herramienta útil en la toma de datos, ya que presenta al usuario una interfaz agradable e intuitiva, que permite aprovechar su característica más importante, su versatilidad.

Debido a la implementación de normas técnicas, el ensayo de consolidación unidimensional requiere ajustarse a los parámetros establecidos en INV E-151. Para ello se debe programar detalladamente el registro de datos. Mediante la opción configurar ensayo podemos crear un ensayo donde el registro de datos es continuo, por valores predeterminados, o por eventos. Estos registros son tomados dentro de un número determinado de escalones de carga y descarga, cada uno con una duración determinada según las necesidades del usuario.

Las muestras analizadas fueron sometidas a cinco escalones de cargas y cinco escalones de descarga de acuerdo al método A (incremento de carga constante durante 24 horas o un múltiplo de éste); En cada escalón de carga y de descarga es preciso fijar los intervalos de tiempo en donde se registra la deformación presentada en la muestra. Con base en la norma se definieron los siguientes intervalos:

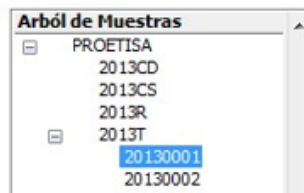
Tabla 4. Intervalos de tiempos para la toma de datos.

10	[seg]	8	[min]	4	[hr]
25	[seg]	15	[min]	8	[hr]
50	[seg]	30	[min]	16	[hr]
2	[min]	1	[hr]	24	[hr]
4	[min]	2	[hr]		

4.2 BASE DE DATOS.

EDS emplea un sistema de organización de datos en forma de árbol compuesta por niveles, permitiendo así una visualización agradable. Las muestras están agrupadas en expedientes que a su vez están vinculados al nombre de un cliente. Ver **Grafica 2.**

GRÁFICA 2. Árbol de muestras EDS.



Fuente: *Captura de pantalla del programa EDS de PROETI S.A.*

Cada muestra de suelo sometida a un ensayo de laboratorio compatible con EDS está ligada a ciertos parámetros que necesariamente deben ser proporcionados, para que ésta pueda ser incluida en el sistema de gestión dentro de la base de datos de la aplicación; es por ello que el operador antes de dar inicio a una prueba de laboratorio debe completar los datos de cada nivel del árbol de muestras.

A continuación, se observan los parámetros vinculados a cada muestra:

GRÁFICA 3. Datos de muestras EDS.

The image shows a screenshot of a software interface for EDS (Edometric Sampling) data entry. It is divided into three main sections, each with a title and a set of input fields:

- Parámetros de Cliente:** Includes fields for 'Nombre del Cliente', 'Dirección del Cliente', and 'Observaciones del Cliente'.
- Parámetros de Expediente:** Includes fields for 'Nombre de Expediente', 'Nombre de Obra', and 'Observaciones del Expediente'.
- Parámetros de Muestra:** Includes fields for 'Nombre de Muestra', 'Tipo de Material', and 'Observaciones de Muestra'.

Each section has a vertical scrollbar on the right side of its input area, indicating that the text fields are scrollable.

Fuente: Captura de pantalla del programa EDS de PROETI S.A.

4.3 PREPARACIÓN Y MONTAJE DE LA MUESTRA

Como se establece en la norma colombiana, las muestras de suelo a emplear en este ensayo deben ser relativamente inalteradas; acorde a los requisitos de la norma la extracción de muestras se realizó cumpliendo satisfactoriamente con INV E – 105 *Obtención de muestras para probetas de ensayo mediante tubos de pared delgada*.

Siguiendo las indicaciones en INV E- 151 la muestra de suelo dentro del tubo de muestreo debe ser forzada directamente al interior del anillo de consolidación, procurando disminuir la alteración de la muestra en este proceso. Una vez la muestra se haya moldeado por completo dentro del anillo, sus superficies, superior e inferior, deben ser enrazadas y suavizada. El anillo usado para

confinar lateralmente el suelo durante estos ensayos posee las siguientes dimensiones: Diámetro: 50 [mm] y altura 20 [mm].

Posteriormente, se determina la masa de la muestra dentro del anillo de consolidación y su espesor inicial se obtiene del promedio de al menos cuatro mediciones desde la cara superior a la inferior. Usando el diámetro del anillo y el espesor de la muestra se calcula su volumen.

Con el suelo residual del proceso de moldeado se determina su contenido de humedad natural y densidad específica con base en las Normas INV E-122 e INV E-128 respectivamente.

En la clasificación del suelo se debe encontrar el límite líquido según la norma INV E – 125, límite plástico conforme a la norma INV E – 126 y la granulometría de acuerdo con la norma INV E – 123. Este proyecto toma como punto de partida estudios realizados previamente para la clasificación de la muestra de suelo.

El ensamble de la muestra dentro de la célula edométrica comienza con la ubicación de la piedra porosa inferior en el fondo, seguida del anillo de consolidación con papel filtro en sus caras superior e inferior, teniendo en cuenta que sobre el anillo debe ir la piedra porosa superior con el anillo guía del pistón fijado y atornillado. Con el fin de evitar pérdidas de humedad en la muestra las piedras porosas fueron humedecidas previamente.

GRÁFICA 4. Elementos de célula edométrica con muestra en la anilla.



El dispositivo porta-pesas en el edómetro puede ser posicionado en tres lugares de la leva o brazo, su posición influye en la carga aplicada a la muestra. La carga aplicada en la porta pesas genera una carga 11 veces menor en el pistón sobre la muestra si el porta-pesas es ubicado en la posición más distante; en la posición intermedia se reduce 1/10 y su posición más cercana a la célula es reducida 1/9.

Después de atornillar el dispositivo porta-pesas en la ubicación deseada, la célula edométrica es acoplada sobre el platillo del aparato y sobre ella es posicionado el pistón de carga, su función es distribuir uniformemente la presión en la muestra. Posterior a esto se encaja la punta redondeada del soporte de carga con la superficie cóncava del pistón de carga de tal forma que permanezca perpendicular al eje horizontal de la leva o brazo. Por último, se ajusta el sensor justo en el medio de la cara superior del soporte de carga, teniendo en cuenta que el sensor deberá disponer de la suficiente libertad de movimiento para registrar no solamente las deformaciones producidas por asentamiento sino también las producidas por hinchamientos.

GRÁFICA 5. Edómetro de carga central, unidad de adquisición de datos, ordenador.



4.4 EJECUCIÓN DE TOMA DE DATOS

Antes de iniciar con registro de datos en la aplicación EDS, se aplica una carga de asentamiento de 5 [KPa] por un tiempo de 5 minutos, durante este proceso la

cédula de consolidación es llenada con agua hasta el nivel de la piedra porosa superior, la función del agua dentro de la célula es simular condiciones extremas a las que el suelo puede ser sometido debido a factores climáticos o externos.

Una vez transcurrido los 5 minutos con la carga inicial, se procede a aplicar una serie de cargas sobre el consolidómetro basada en las especificaciones de la norma. Para este proyecto se estableció la serie de cargas que generan las siguientes presiones sobre la muestra:

Tabla 5. Series de cargas y de presiones aplicadas en el porta-pesas.

Carga en el porta-pesas	Presión en la muestra
0.3 [Kg]	15.291 [KPa]
0.6 [Kg]	30.582 [KPa]
1.2 [Kg]	61.164 [KPa]
2.4 [Kg]	122.328 [KPa]
4.8 [Kg]	244.657 [KPa]
9.6 [Kg]	489.315 [KPa]

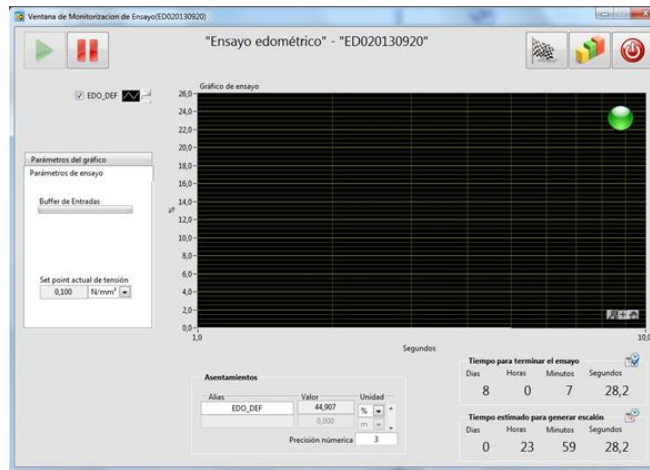
*La presión en la muestra está calculada con el porta-pesas en la posición intermedia (1/10).

Para evitar sobresaltos al momento de cambiar la carga en el porta-pesas, se recomienda ajustar primero el seguro ubicado en la base del aparato de manera que este tan solo roce la leva o brazo.

Cuando la carga correspondiente a primer escalón esté en el porta-pesas podemos ejecutar en el EDS el ensayo de consolidación previamente programado. Durante la fase de registro de datos es posible visualizar las deformaciones producidas en la muestra mediante la gráfica en tiempo real del

asentamiento vs tiempo y el tiempo estimado para generar el siguiente escalón junto con la estimación de tiempo total para terminar el ensayo.

GRÁFICA 6. Ventana de monitorización EDS.



Fuente: Captura de pantalla del programa EDS de PROETI S.A.

Al momento de finalizar cada escalón en el ensayo, la aplicación EDS detiene el registro de datos y da lugar a una ventana emergente donde se pide al usuario ingresar el valor de la presión en la muestra del siguiente escalón, como justo después de ingresar el dato requerido el ensayo se reanuda debemos cambiar el peso en el porta-pesas antes de cerrar la ventana emergente.

Mientras el ensayo se esté ejecutando, EDS permite realizar el cambio de unidades de la gráfica y la posibilidad de exportar los datos obtenidos hasta el momento en formato .xls y .txt, también es posible detener el ensayo y reanudarlo en cualquier momento.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los datos tiempo – deformación registradas durante cada una de las etapas de carga de (15.3, 30.6, 122.2, 244.64 [KPa] ó 300, 600, 1200, 2400, 4800 [g] respectivamente) es posible determinar el coeficiente de consolidación C_v , para cada uno de los incrementos de carga.

A continuación, se entregarán los resultados analíticos del Apique N° 42, en el **ANEXO D**, se encuentran los cálculos de cada una de las muestras utilizadas.

Tabla 6. Datos del apique N° 42.

TOMA DE LECTURAS ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN					
MUESTRA:		APIQUE 42		Clasificación: ML	
PROFUNDIDAD. (m):		1			

DIMENSIONES DE LA MUESTRA		
	INICIAL	FINAL
Diámetro, D (cm.)	4.998	
Altura, H (cm.)	1.998	
W.Anillo (gr.)	30.3	
W.Anillo + Muestra (gr.)	110.1	114

HUMEDAD		
	INICIAL	FINAL
Recipiente No	15	3
W.m. Hum + Rec. (gr.)	20.00	18.40
W.m Seca + Rec. (gr.)	19.20	17.45
W.r (gr.)	14.00	8.50
Humedad. (%)	<u>15.38</u>	<u>10.61</u>

TIEMPO (t)		LECTURA DEL DIAL (1 mm)			
Minutos	Raizde (t)	0,6 Kg./cm ²	1,2 Kg./cm ²	2,45 Kg./cm ²	5 Kg./cm ²
		0	0.02892	0.304411	0.773212
0.15	0.39	0.00387	0.12959	0.52828	1.02502
0.25	0.50	0.00552	0.14745	0.551033	1.05252
1.00	1.00	0.00664	0.15226	0.556503	1.05867
2.00	1.41	0.00672	0.16898	0.58145	1.09247
4.00	2.00	0.00775	0.18508	0.60757	1.13445
8.00	2.83	0.00862	0.20325	0.63384	1.18316
15.00	3.87	0.01095	0.21871	0.65791	1.23120
30.00	5.48	0.01356	0.23539	0.67951	1.27795
60.00	7.75	0.01449	0.25073	0.70372	1.31581
120.00	10.95	0.01621	0.26364	0.72380	1.34495
250.00	15.81	0.0194	0.27807	0.74143	1.36556
480.00	21.91	0.02394	0.291301	0.75535	1.38282
960.00	30.98	0.02676	0.300235	0.76699	1.39234
1440.00	37.95	0.02892	0.304411	0.773212	1.39833

DESCARGA	
5 A 2,45	1.314809
2,45 A 1,2	1.15885
1,2 A 0,6	0.975457

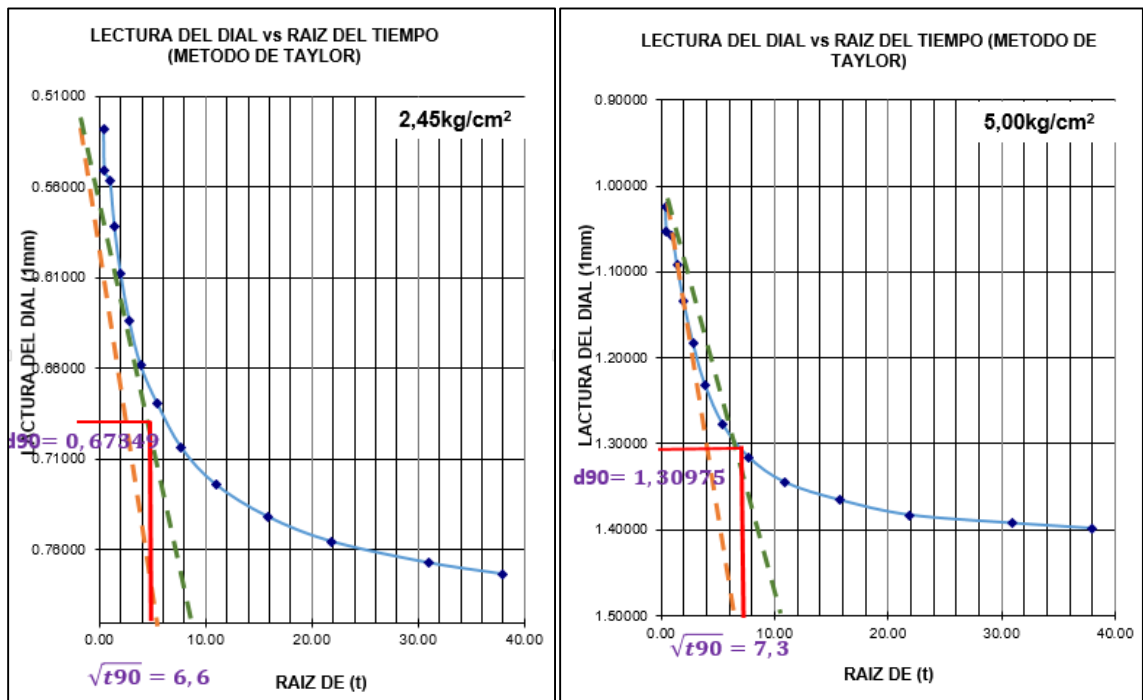
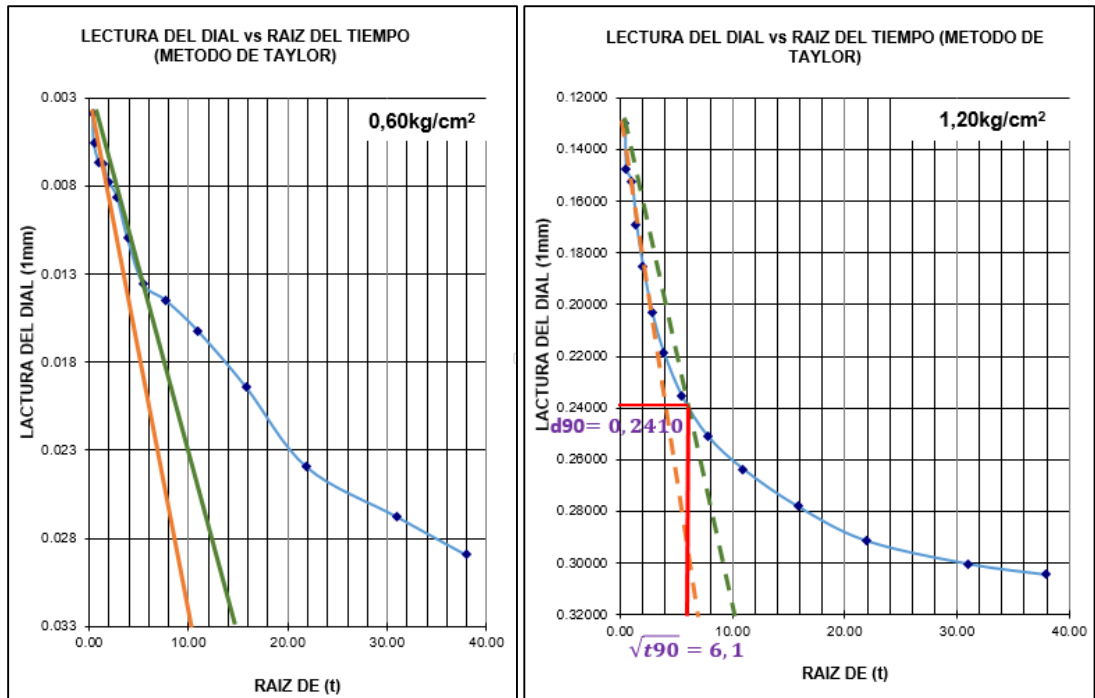
Carga Aplicada (kg/cm²)	Relación de Vacíos e
0.6	0.4958
1.2	0.4749
2.45	0.4396
5	0.3926
2.45	0.3989
1.2	0.4106
0.6	0.424

Coficiente de Consolidación CV	0.02601	0.0222	0.01814	0.01386
---------------------------------------	---------	--------	---------	---------

Indice de Compresión CC	0.09190
Módulo edométrico mv	0.01054

Coef. de Compresibilidad Av	0.01843
Indice de hinchamiento Cs	0.03410

Figura 1-4. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el primer día de carga.



5.1 DETERMINACIÓN DE LOS INDICES DEL SUELO

De cada escalón de carga se obtiene el índice de poros que posteriormente se grafica en el eje de las ordenadas y en el eje de abscisas se ubica la presión de cada escalón, de esta curva se determinan los coeficientes C_c , Av , mv , C_s .

De aquí se encuentran el índice de compresión (C_c), coeficiente compresibilidad (av), módulo edométrico (mv) e índice de hinchamiento (C_s).

$$C_c = \frac{\delta e}{\log(\delta p)} = \frac{0,4958 - 0,4396}{\log(2,45) - \log(0,6)} = 0,0919$$

$$av = -\frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} = -\frac{0,3926 - 0,4396}{5 - 2,45} = 0,01843$$

$$mv = -\frac{av}{1 + e_o} = \frac{0,01843}{1 + 0,149909} = 0,01054$$

$$C_s = \frac{\delta e}{\log(\delta p)} = \frac{0,424 - 0,3925}{\log(5) - \log(0,6)} = 0,03410$$

Para tener un análisis detallado y resumido a continuación mostraremos en la **Tabla 6**, los módulos de deformación y coeficientes de consolidación, obtenidos de las muestras analizadas.

Figura 5. Grafica e Vs Presión del apique N° 42 mostrada en el software EPAEDO.

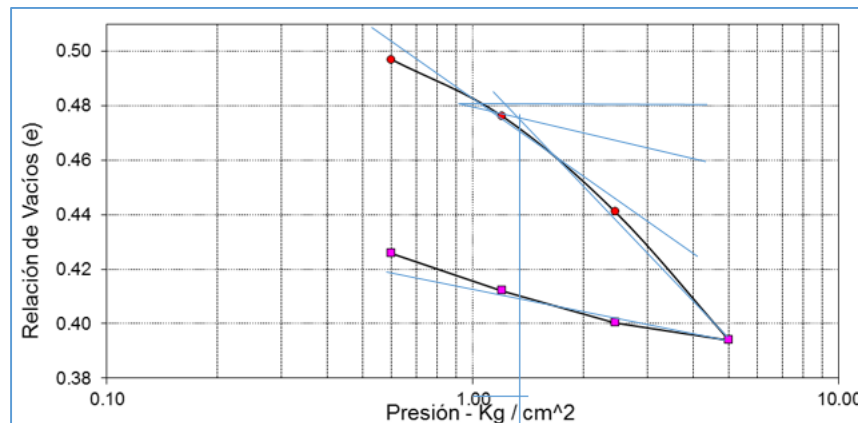


Tabla 7. Resultados de coeficiente de consolidación, índice de compresión, coeficiente de compresibilidad, módulo edométrico e índice de hinchamiento de las muestras analizadas.

	MUESTRA N° 1		MUESTRA N°4		MUESTRA N° 25		MUESTRA N°42	
	CLASIFICACION: CL		CLASIFICACION: CH		CLASIFICACION: ML		CLASIFICACION: MH	
	Presión (kg/cm2)	Taylor	Presión (kg/cm2)	Taylor	Presión (kg/cm2)	Taylor	Presión (kg/cm2)	Taylor
Coeficiente de consolidación Cv (cm2/min)	0,15	0,03665	0,31	0,04512	0,6	0,01192	0,6	0,02601
	0,30	0,03233	0,62	0,03157	1,2	0,01133	1,2	0,02220
	0,62	0,02556	1,22	0,02645	2,45	0,00859	2,45	0,01814
	1,22	0,02247	2,45	0,02295	5,0	0,00748	5,0	0,01386
	2,45	0,01647	5,0	0,01997				
índice de compresión Cc	0,06045		0,0945		0,10458		0,0919	
coeficiente de compresibilidad av	0,03952		0,02808		0,00991		0,01843	
Módulo edométrico mv	0,02302		0,01481		0,00673		0,01054	
Índice de hinchamiento Cs	0,03815		0,01508		0,03041		0,03410	

6. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en esta investigación de la exploración de campo y laboratorio se pudieron destacar que los suelos en el municipio de Vélez, generalmente están compuestos por arcillas (CL y CH) y limos (ML y MH) que presentan un índice de compresión (Cc) entre 0,060 y 0,104 e índices de hinchamiento con valores cercanos a 0,03.

Implementar productos tecnológicamente sofisticados que contribuyen a la dinamización y evolución de los procesos de laboratorio brinda valiosos recursos para labores de investigación.

Una de las características a destacar en este proyecto es la interfaz en las aplicaciones EDS, de una manera simple e intuitiva permite al usuario la posibilidad de configurar todos los parámetros del ensayo, esto garantiza su adaptación a cualquier instrumento normativo, Así mismo, se cuenta la capacidad de motorizar el ensayo a lo largo de su desarrollo por medio de la visualización en tiempo real de la gráfica Asentamiento vs Tiempo.

La aplicación de post-análisis EPAEDO está diseñada para ser una herramienta de estudio, no de presentación de informes. En los ensayos edométricos solo se generan las dos graficas que nos muestra en el informe. El grafico de curva de consolidación y el grafico de curva edométrica., cualquier otro cálculo se debe hacer empleando los datos exportados a Excel o Word.

Los videos tutoriales de este proyecto están orientados para ser una plataforma en la cual el talento humano pueda desarrollar conocimientos metodológicos y las habilidades técnicas asociadas a la implementación de esta tecnología.

7. DISCUSIÓN O RECOMENDACIONES

La aplicación gratuita de post-análisis EPAEDO están diseñadas para ser una herramienta de estudio, no de presentación de informes. En los ensayos edométricos solo se generan las dos graficas que nos muestra en el informe. El grafico de curva de consolidación y el grafico de curva edométrica., cualquier otro cálculo se debe hacer empleándolos datos exportados a Excel o Word.

El edómetro informático cuenta con un sensor de precisión 0.001mm, vital para la obtención de datos fiables, también emplea una unidad de adquisición de datos que funcionan con hasta 16 canales, es decir con un solo ordenador y una unidad de este tipo podemos controlar y realizar al mismo tiempo hasta 16 ensayos diferentes, además de un sistema que permite almacenar la información en caso de un apagón.

A pesar de las ventajas mencionadas el sistema presenta algunas falencias que son notorias, una de ellas es la compatibilidad del sistema operativo con el que trabaja, las aplicaciones hacen uso de una versión antigua de Windows 7 por lo cual es fundamental restringir las actualizaciones del sistema ya que cambios en este repercutirían en el desempeño de los softwares utilizados.

Es claro que la implementación de este tipo de tecnología constituye una inversión que permitan elevar la calidad de los servicios ofrecidos y logra mayor productividad, pero también requiere de una mano de obra especializada.

Aunque EDS implementa una base de datos que permite una mejor gestión de los datos dentro de la plataforma y garantiza el fácil acceso es fundamental realizar copias de respaldo.

Una de las grandes dificultades que se presentaron en la realización de este proyecto fue la irregularidad del voltaje que alimentan los equipos. Se recomienda la instalación de dispositivos de almacenamiento de energía temporales capaces de estabilizar el flujo eléctrico

BIBLIOGRAFIA

ARANGO V, Antonio. Ingeniero Antonio Arango V. Manual de laboratorio de mecánica de suelos. Universidad Nacional de Colombia. Seccional Medellín.

ASTM D 2435-90 AASHTO T 216 Ensayo de Consolidación Unidimensional de los Suelos. Competencias Técnicas de Laboratorista en Mecánica de Suelos. [Citado el 15 de febrero de 2016]. Disponible en <http://es.slideshare.net/guest7fb308/consolidacin-unidimensional-de-los-suelos-1622178>

Catálogo de Consolidación – Edómetro de Carga Central. [Citado el 29 marzo de 2016]. Disponible en <http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=188>

Holtz D. Robert y Kovacs D. William. Capítulo 1, An Introduction to Geotechnical Engineering. [Citado: el 4 de abril de 2016]. Disponible en <http://www.smig.org.mx/archivos/pdf/IntrIngGoet.pdf>

Norma INV E-151-07. Consolidación Unidimensional de los Suelos. Instituto Nacional de Vías. [Citado el 12 de junio de 2015]. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/146985994/Norma-INV-E-151-07#scribd>

Rodríguez M, Ángel. Manual de mecánica del suelo y cimentaciones. Capítulo 1: caracterización.

ANEXO A ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA, LÍMITES, GRAVEDAD ESPECÍFICA Y CONTENIDO DE AGUA.

- APIQUE N° 1.

Tabla 8. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 1

LÍMITE LÍQUIDO			
Determinación No	1	2	3
Número de Golpes	36	24	12
Recipiente No.	4	9	36
P ₁	27.9	30.3	31.7
P ₂	24.2	25.7	26.5
P ₃	15.8	15.6	15.7
P _w	3.70	4.60	5.20
P _s	8.40	10.10	10.80
W%	44.05	45.54	48.15

LÍMITE PLÁSTICO			Humedad Natural
Recipiente No.	2	8	1
P ₁	27.00	27.20	805.30
P ₂	24.70	24.90	646.20
P ₃	15.70	15.90	9.60
P _w	2.30	2.30	159.10
P _s	9.00	9.00	636.60
W%	25.56	25.56	24.99

Fuente: Ensayos realizados por ingeniería y suelos s.a.s. suministrados por el grupo de investigación geomática.

Peso inicial:		636.60	gr	Peso final:			103.40 gr		
Tamiz, plg	Tamiz, mm	Peso (gr)	% Reten.	% Ret.Acum	% Pasa				
3"	76.10								
2 1/2"	64.00				100.0%				
2"	50.80				100.0%				
1 1/2"	38.10				100.0%				
1"	25.40				100.0%				
3/4"	19.00				100.0%				
1/2"	12.70	2.7	0.4%						
3/8"	9.51	10.7	1.7%	2.1%	97.9%				
4	4.76	10.4	1.6%	3.7%	96.3%				
8	2.38								
10	2.00	11.1	1.7%	5.5%	94.5%				
12	1.68	9.4	1.5%						
16	1.19								
30	0.59								
40	0.42	10.4	1.6%	8.6%	91.4%				
50	0.30	11.8	1.9%						
80	0.18								
100	0.15	16.0							
200	0.07	20.9	3.3%	16.2%	83.8%				
Pasa 200		533.2	83.8%	100.0%	0.0%				
Total		636.6							

RESULTADOS

P₁ = Peso Recipiente + Suelo Húmedo, en g

P₂ = Peso Recipiente + Suelo Seco, en g

P₃ = Peso Recipiente, en g

P_w = Peso del Agua, en g
Líquido 45.4

$$P_w = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_3} \times 100\%$$

P_s = Peso Suelo Seco, en g
Plástico 25.6

$$P_s = \frac{P_2 - P_3}{P_1 - P_3} \times 100\%$$

W = Contenido de agua, en %
Plástico 19.8

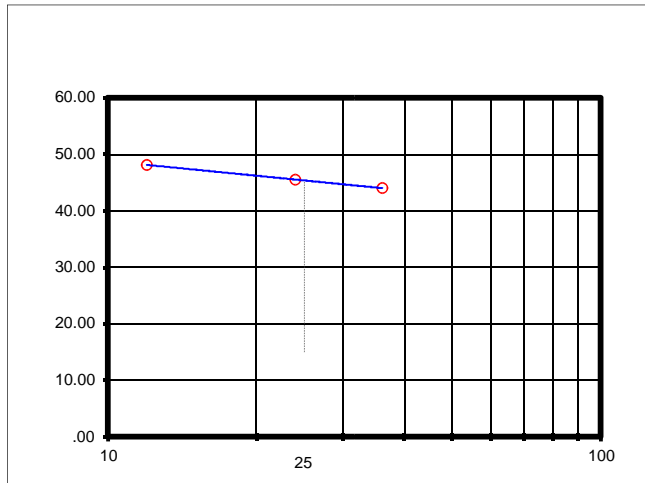
$$w = \frac{P_w}{P_s} \times 100\%$$

Límite

Límite

Índice

Figura 6. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 1



Gravas 3.7%
Arenas 12.5%
Finos 83.8%

CLASIFICACIÓN

Índice de Grupo 18
A.A.S.H.T.O. A - 7 - 6
U.S.C. CL

OBSERVACIONES:

INGENIERIA Y SUELOS S.A.S.
NIT. 900.492.967-1

No se permiten diferencias mayores al 2% entre dos ensayos de LP del mismo material

JOSE DAVID ESTEBAN
REALIZÓ

JAVIER CABALLERO
REVISÓ

Fuente: Ensayos realizados por ingeniería y suelos s.a.s. suministrados por el grupo de investigación geomática.

Tabla 9. Datos del apique N° 1.

HUMEDAD		
	NATURAL	FINAL
Recipiente No	15	1
W.m. Hum + Rec. (gr.)	15.30	168.80
W.m Seca + Rec. (gr.)	13.10	161.40
W.r (gr.)	6.80	134.50
Humedad. (%)	34.92	27.51

PESO ESPECIFICO DEL SUELO		
Temp. del ensayo (Tx)	°C	18
W.Pic.+ agua temp Tx (Wa)	gr.	652.60
W.Pic+Muestra+agua (Wb)	gr.	703.60
Peso Muestra Seca (Wo)	gr.	81.00
Peso especifico suelo (Gs)	gr/cm ³	2.700

APIQUE N°4

LÍMITES DE CONSISTENCIA GRADACIÓN

Tabla 10. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 4

LÍMITE LIQUIDO			
Determinación No	1	2	3
Número de Golpes	34	25	14
Recipiente No.	2	8	16
P ₁	33.9	35.6	35.2
P ₂	27.7	28.7	28
P ₃	15.7	15.9	16
P _w	6.20	6.90	7.20
P _s	12.00	12.80	12.00
W%	51.67	53.91	60.00

LÍMITE PLÁSTICO			Humedad Natural
Recipiente No.	19	39	1
P ₁	26.60	26.50	801.40
P ₂	24.20	24.10	596.30
P ₃	15.40	15.80	9.60
P _w	2.40	2.40	205.10
P _s	8.80	8.30	586.70
W%	27.27	28.92	34.96

Fuente: Ensayos realizados por ingeniería y suelos s.a.s. suministrados por el grupo de investigación geomática.

Peso inicial: 586.70 gr		Peso final: 37.20 gr			
Tamiz, plg	Tamiz, mm	Peso (gr)	% Reten.	% Ret.Acum	% Pasa
3"	76.10				
2 ½"	64.00				100.0%
2"	50.80				100.0%
1 ½"	38.10				100.0%
1"	25.40				100.0%
¾"	19.00				100.0%
½"	12.70				
¾"	9.51				100.0%
4	4.76	1.7	0.3%	0.3%	99.7%
8	2.38				
10	2.00	1.6	0.3%	0.6%	99.4%
12	1.68	1.4	0.2%		
16	1.19				
30	0.59				
40	0.42	1.4	0.2%	1.0%	99.0%
50	0.30	1.6	0.3%		
80	0.18				
100	0.15	2.2			
200	0.07	27.3	4.7%	6.3%	93.7%
Pasa 200		549.5	93.7%	100.0%	0.0%
Total		586.7			

P₁ = Peso Recipiente + Suelo Húmedo, en g
 P₂ = Peso Recipiente + Suelo Seco, en g
 P₃ = Peso Recipiente, en g

P_w = Peso del Agua, en g
 Líquido 54.3

$$P_w = \frac{P_1 - P_2}{P_3} \times 100\%$$

P_s = Peso Suelo Seco, en g
 Plástico 28.1

$$P_s = \frac{P_2 - P_3}{P_3} \times 100\%$$

W = Contenido de agua, en %
 Plástico 26.2

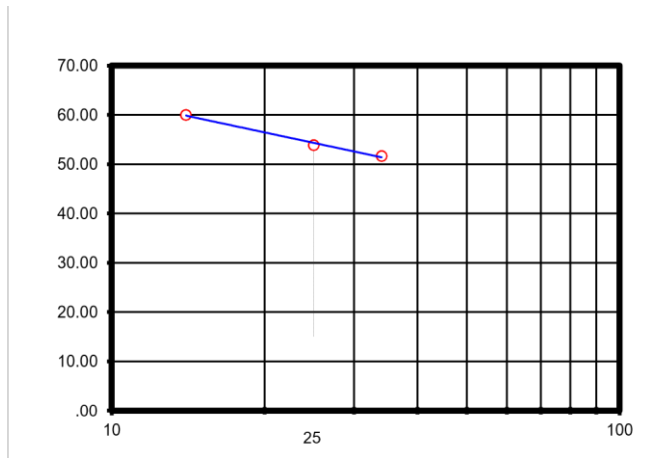
$$w = \frac{P_w}{P_s} \times 100\%$$

RESULTADOS

Límite _____
 Límite _____
 Índice _____

 GravAS 0.3%

Figura 7. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 1.



Arenas 6.1%
Finos 93.7%

CLASIFICACIÓN

Índice de Grupo 29 A.A.S.H.T.O. A -
7 - 6
U.S.C CH

OBSERVACIONES:

INGENIERIA Y SUELOS S.A.S.
NIT. 900.492.967-1

No se permiten diferencias mayores al 2% entre dos ensayos de LP del mismo material

JOSE DAVID ESTEBAN REALIZÓ
JAVIER CABALLERO REVISÓ

Fuente: Ensayos realizados por ingeniería y suelos s.a.s. suministrados por el grupo de investigación geomática.

Tabla 11. Datos del apique N° 4.

HUMEDAD		
	NATURAL	FINAL
Recipiente No	15	3
W.m. Hum + Rec. (gr.)	17.50	39.30
W.m Seca + Rec. (gr.)	14.40	31.20
W.r (gr.)	6.90	8.40
Humedad. (%)	41.33	35.53

PESO ESPECIFICO DEL SUELO		
Temp. del ensayo (Tx)	°C	18
W.Pic.+ agua temp Tx (Wa)	gr.	653.10
W.Pic.+Muestra+agua (Wb)	gr.	705.30
Peso Muestra Seca (Wo)	gr.	85.90
Peso especifico suelo (Gs)	gr/cm ³	2.549

- **APIQUE N° 25**

Tabla 12. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 25.

LÍMITE LÍQUIDO			
Determinación No	1	2	3
Número de Golpes	38	27	20
Recipiente No.	16	17	18
P ₁	19.9	20.44	20.17
P ₂	15.61	15.6	15.23
P ₃	5.74	5.71	5.88
P _w	4.29	4.84	4.94
P _s	9.87	9.89	9.35
W%	43.47	48.94	52.83

LÍMITE PLÁSTICO			Humedad Natural
Recipiente No.	19	20	4
P ₁	11.12	10.98	214.10
P ₂	9.75	9.62	183.45
P ₃	5.51	5.42	54.16
P _w	1.37	1.36	30.65
P _s	4.24	4.20	129.29
W%	32.31	32.38	23.71

Fuente: Ensayos realizados por ingeniería y suelos s.a.s. suministrados por el grupo de investigación geomática.

Peso inicial: 129.29 gr		Peso final: 10.45 gr			
Tamiz, plg	Tamiz, mm	Peso (gr)	% Reten.	% Ret.Acum	% Pasa
3"	76.10				
2 ½"	64.00				100.0%
2"	50.80				100.0%
1 ½"	38.10				100.0%
1"	25.40				100.0%
¾"	19.00				100.0%
½"	12.70				
3/8"	9.51	1.2	1.0%	1.0%	99.0%
4	4.76	1.1	0.9%	1.8%	98.2%
8	2.38				
10	2.00	1.9	1.5%	3.3%	96.7%
12	1.68	0.3	0.3%		
16	1.19				
30	0.59				
40	0.42	2.5	1.9%	5.5%	94.5%
50	0.30	0.8	0.6%		
80	0.18				
100	0.15	1.4			
200	0.07	1.3	1.0%	8.1%	91.9%
Pasa 200		118.8	91.9%	100.0%	0.0%
Total		129.3			

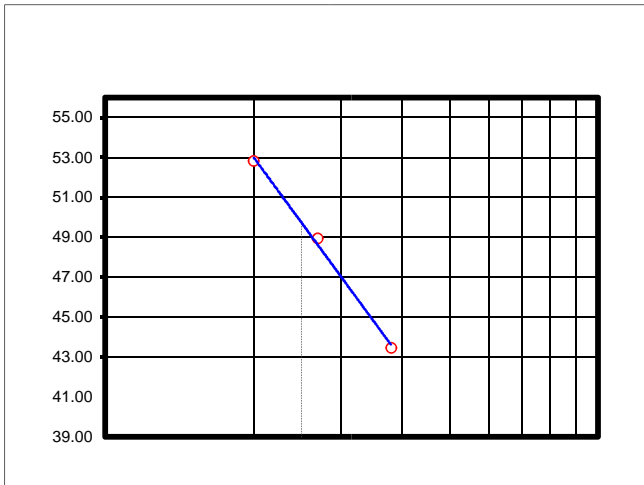
P_1 = Peso Recipiente + Suelo Húmedo, en g
 P_2 = Peso Recipiente + Suelo Seco, en g
 P_3 = Peso Recipiente, en g

P_w = Peso del Agua, en g $P_w = P_1 - P_2$
 P_s = Peso Suelo Seco, en g $P_s = P_2 - P_3$
 W = Contenido de agua, en % $w = (P_w / P_s) \times 100$

RESULTADOS

Límite Líquido 49.7 %
 Límite Plástico 32.3 %
 Índice Plástico 17.4 %

Figura 8. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N°1.



Gravas 1.8% Arenas 6.3%
 Finos 91.9%

CLASIFICACIÓN

Índice de Grupo 20
 A.A.S.H.T.O. A - 7 - 5
 U.S.C ML

OBSERVACIONES: No se permiten diferencias mayores al 2% entre dos ensayos de
 DAVID ESTEBANJAVIER CABALLERO JOSE
 LP del mismo
 material REALIZÓ REVISÓ

Fuente: Ensayos realizados por ingeniería y suelos s.a.s. suministrados por el grupo de investigación geomática.

Tabla 13. Datos del apique N°25

HUMEDAD		
	NATURAL	FINAL
Recipiente No	15	3
W.m. Hum + Rec. (gr.)	32.40	39.30
W.m Seca + Rec. (gr.)	29.30	36.67
W.r (gr.)	7.40	8.10
Humedad. (%)	14.16	9.21

PESO ESPECIFICO DEL SUELO		
Temp. del ensayo (Tx)	°C	18
W.Pic.+ agua temp Tx (Wa)	gr.	653.10
W.Pic+Muestra+agua (Wb)	gr.	705.30
Peso Muestra Seca (Wo)	gr.	81.23
Peso especifico suelo (Gs)	gr/cm ³	2.798

- **APIQUE 42**

Tabla 14. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 42

LÍMITE LÍQUIDO			
Determinación No	1	2	3
Número de Golpes	38	27	20
Recipiente No.	16	17	18
P ₁	17.44	18.88	19.35
P ₂	12.72	13.54	13.58
P ₃	4.06	4.13	4.07
P _w	4.72	5.34	5.77
P _s	8.66	9.41	9.51
W%	54.50	56.75	60.67

LÍMITE PLÁSTICO			Humedad Natural
Recipiente No.	19	20	10
P ₁	10.48	10.04	206.74
P ₂	8.81	8.44	176.46
P ₃	4.16	4.15	51.06
P _w	1.67	1.60	30.28
P _s	4.65	4.29	125.40
W%	35.91	37.30	24.15

Fuente: Ensayos realizados por ingeniería y suelos s.a.s. suministrados por el grupo de investigación geomática.

Peso inicial: 125.40 gr		Peso final: 6.84 gr			
Tamiz, plg	Tamiz, mm	Peso (gr)	% Reten.	% Ret.Acum	% Pasa
3"	76.10				
2 ½"	64.00				100.0%
2"	50.80				100.0%
1 ½"	38.10				100.0%
1"	25.40				100.0%
¾"	19.00				100.0%
½"	12.70				
3/8"	9.51				100.0%
4	4.76				100.0%
8	2.38				
10	2.00	1.6	1.2%	1.2%	98.8%
12	1.68	0.2	0.2%		
16	1.19				
30	0.59				
40	0.42	1.0	0.8%	2.2%	97.8%
50	0.30	0.3	0.2%		
80	0.18				
100	0.15	0.9			
200	0.07	2.8	2.2%	5.5%	94.5%
Pasa 200		118.6	94.5%	100.0%	0.0%
Total		125.4			

RESULTADOS

P₁ = Peso Recipiente + Suelo Húmedo, en g
P₂ = Peso Recipiente + Suelo Seco, en g
P₃ = Peso Recipiente, en g

P_w = Peso del Agua, en g P_w = P₁ - P₂
Líquido 58.3 %

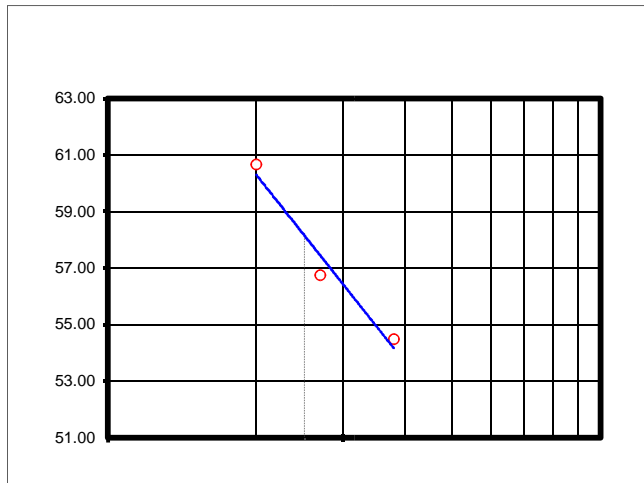
Límite

P_s = Peso Suelo Seco, en g
 Plástico 36.6
 W = Contenido de agua, en %
 Plástico 21.7

$P_s = P_2 - P_3$
 %
 $w = (P_w / P_s) \times 100$
 %

Límite
 Índice

Figura 9. Datos de los ensayos de granulometría y límites apique N° 42



Gravas 0.0% Arenas 5.5%
 Finos 94.5%

CLASIFICACIÓN

Índice de Grupo 27
 A.A.S.H.T.O. A - 7 - 5
 U.S.C. MH

OBSERVACIONES:

INGENIERIA Y SUELOS S.A.S.
 NIT. 900.492.967-1

No se permiten diferencias mayores al 2% entre dos ensayos de LP del mismo material

JOSE DAVID ESTEBAN REALIZÓ
 JAVIER CABALLERO REVISÓ

Fuente: Ensayos realizados por ingeniería y suelos s.a.s. suministrados por el grupo de investigación geomática.

Tabla 15. Datos del apique N° 42

HUMEDAD			
	NATURAL	FINAL	
Recipiente No	15	3	
W.m. Hum + Rec. (gr.)	20.00	18.40	
W.m. Seca + Rec. (gr.)	19.20	17.45	
W.r (gr.)	14.00	8.50	
Humedad. (%)	15.38	10.61	

PESO ESPECIFICO DEL SUELO		
Temp. del ensayo (Tx)	°C	18
W.Pic.+ agua temp Tx (Wa)	gr.	653.60
W.Pic+Muestra+agua (Wb)	gr.	704.10
Peso Muestra Seca (Wo)	gr.	81.20
Peso específico suelo (Gs)	gr/cm ³	2.645

ANEXO B FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS.

Al someter una masa de suelo saturado a un incremento de carga, ésta es soportada inicialmente por el agua contenida en los poros, ya que ella es incompresible en comparación con la estructura del suelo. La presión que resulta en el agua a causa del incremento de la carga es llamada exceso de presión hidrostática. A medida que el agua drena de los poros del suelo, el incremento de carga es transmitido a la estructura del suelo. La transferencia de carga es acompañada por un cambio en el volumen del suelo igual al volumen de agua drenada. Este proceso es conocido como consolidación.

Este es un proceso que tiene un tiempo acotado de ocurrencia, comienza cuando se aplica el incremento de carga, y finaliza cuando la presión de los poros es igual a la hidrostática, o lo que es lo mismo, cuando se ha producido la totalidad de la transferencia de carga del agua a la estructura de suelo. Terminado este proceso llamado consolidación primaria, el suelo continúa deformándose, aunque en menor magnitud, debido a un reajuste de los granos. A este último proceso se le denomina consolidación secundaria.

El asiento total, suponiendo que el último valor medido coincide con el momento en que desaparece toda la sobrepresión intersticial creada al aplicar la carga, es una medida de la deformación del esqueleto del suelo. Si se realizan varios escalones de carga, se obtendrá una curva de compresibilidad, que relaciona la presión efectiva (en escala logarítmica) con la deformación del esqueleto mineral, expresada por el índice de poros o relación de vacíos.

El propósito fundamental del ensayo de consolidación es determinar ciertos parámetros que se utilizan para predecir la velocidad y la magnitud del asentamiento de estructuras fundadas sobre arcillas. Además, el ensayo permite obtener información acerca de la historia de presiones a que ha sido sometido el suelo.

Los parámetros más importantes que se obtienen del suelo al realizar el ensayo son:

- a) El coeficiente de consolidación (C_v), que indica el grado de asentamiento del suelo bajo un cierto incremento de carga y vinculando a la velocidad del mismo.
- b) El índice de compresión (C_c), que expresa la compresibilidad de una muestra.
- c) Coeficiente de compresibilidad (a_v), mide la razón de variación de la relación de vacíos con la presión.

- **HIPOTESIS FUNDAMENTALES EN LA TEORÍA DE CONSOLIDACIÓN**

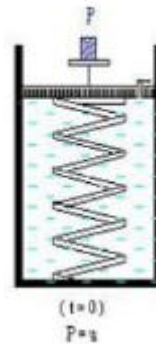
Se supone al suelo homogéneo, cohesivo y saturado.

GRÁFICA 7. *Representación de suelo homogéneo, cohesivo y saturado.*



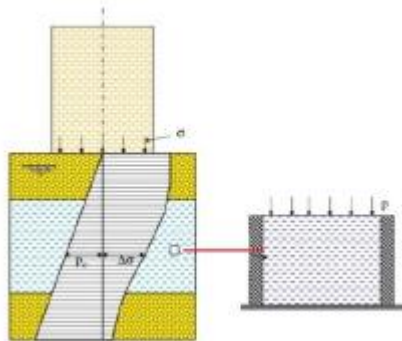
Las partículas de suelo y el agua son incompresibles.

GRÁFICA 8. *Las partículas del suelo y el agua son incompresibles.*



La compresión del suelo in situ es unidimensional.

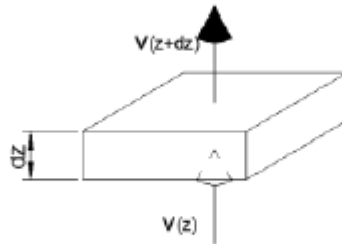
GRÁFICA 9. *Muestra de suelo con compresión unidimensional.*



La variación de volumen tiene su origen en la relajación del exceso de presión de poros.

El flujo es unidimensional.

GRÁFICA 10. Muestra infinitesimal de suelo con flujo unidimensional.



- V_z es la velocidad vertical del flujo que entra en el elemento
- $V_{(z+dz)}$ es la velocidad vertical del flujo que sale del elemento

El coeficiente de consolidación C_v y permeabilidad K , permanecen constantes a lo largo del proceso.

Se cumple la ley de Darcy.

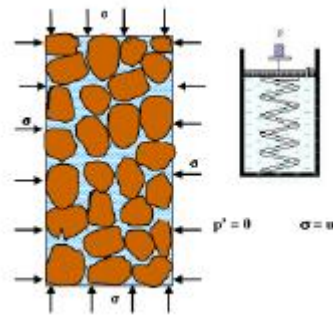
- PRINCIPIO: LEY DE DARCY

Supongamos un elemento de suelo blando y saturado que tiene la posibilidad de drenar el agua contenido en sus poros según la ley de Darcy y al que sometemos a una presión hidrostática “ σ ” exterior.

Estado inicial tiempo $t = 0$

- Toda la tensión externa la toma el agua que es incompresible por lo que no hay cambio de volumen.
- Los granos no interfieren entre sí por lo tanto no generan tensiones de fricción lo que equivale a decir que no hay tensión efectiva.

GRÁFICA 11. Estado inicial en el tiempo cero.

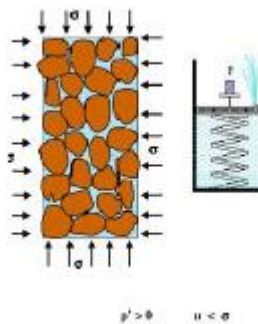


Estado inicial tiempo $t = 0$

El agua comienza a drenar, el volumen total disminuye y los granos comienzan a tocarse entre sí, por lo tanto, generan tensiones de fricción lo que equivale a decir que hay tensión efectiva.

El agua sigue con presión y disminuyendo por lo tanto la presión neutra es menor a la presión σ aplicada.

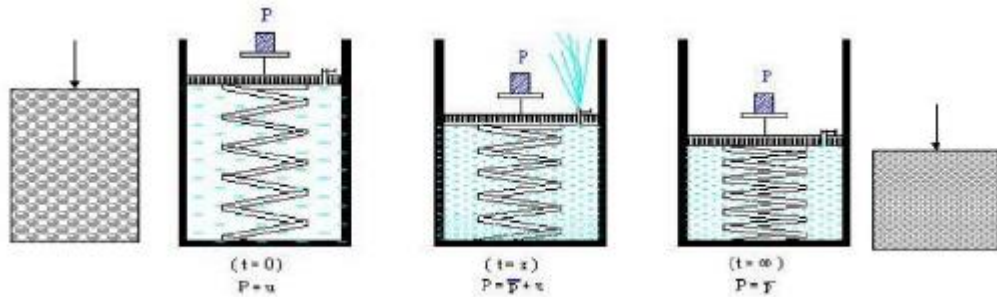
GRÁFICA 12. Estado intermedio de tiempo.



Estado final tiempo $t = \infty$.

El agua drenó, el volumen disminuyó, lo que provocó un mayor contacto entre los granos, de tal forma que ahora la estructura granular es capaz de tomar la totalidad de la carga externa, por lo tanto no hay más presión neutra

GRÁFICA 13. Resumen de los estados de tiempo.

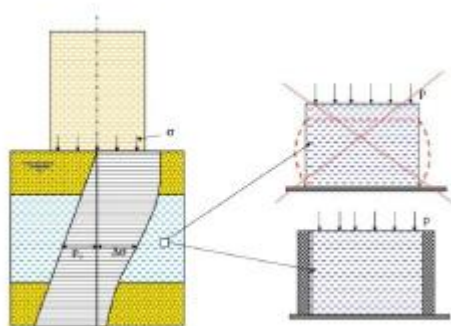


La transferencia de presión neutra “U” a tensión efectiva “p” se mide con el porcentaje de consolidación U%

$$U\% = \frac{P_{efectiva}}{P_{total}} * 100$$

Obteniendo una muestra inalterada del manto de suelo compresible, tenemos que tratar bajo un estado de carga unidimensional, se deforme de la misma forma que lo hace en el terreno.

GRÁFICA 14. Deformación apropiada en el ensayo.



Otro aspecto relevante para tener en cuenta es que el proceso de consolidación es la transferencia de presiones neutras a presiones efectivas dentro de la masa del suelo. Y la consecuencia de todo ello son los asentamientos.

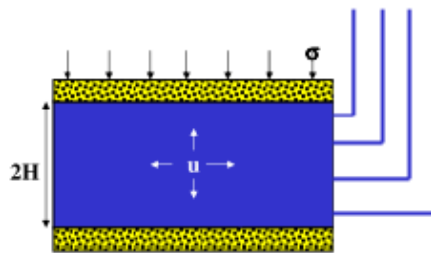
En $t=0$, $\sigma = u$ (No drenada)

$$\Delta U \approx \Delta \sigma u$$

$$\Delta \sigma' = \Delta \sigma u - \Delta u$$

$$\Delta \sigma' = 0 ; \epsilon_v = 0$$

GRÁFICA 15. Transferencia de presiones en la etapa inicial.

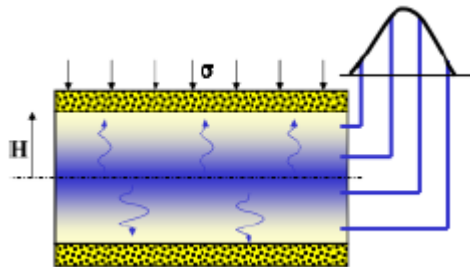


En $t=0$, $\sigma = \sigma' + u$ (Drenada)

El agua empieza a desplazarse hacia las piedras porosas recorriendo un camino máximo = H .

El tiempo necesario para que $u = 0$ dependerá de la tensión aplicada, de la permeabilidad del suelo y de la distancia H .

GRÁFICA 16. Transferencia de presiones para tiempos mayores a cero



ANEXO C PROCEDIMIENTO DETERMINACIÓN C_v Y DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN.

A partir de los datos de tiempo-deformación registrados durante cada una de las etapas de carga, es posible determinar el coeficiente de consolidación, C_v , para cada uno de los incrementos de carga.

Dos son los procedimientos de mayor aplicación para este propósito, el método del logaritmo de tiempo y el método de la raíz cuadrada del tiempo.

- **Método de Casagrande o método del logaritmo del tiempo**

Para determinar la carga de Pre consolidación, utilizamos un método gráfico empírico propuesto por el profesor Casagrande que consiste en:

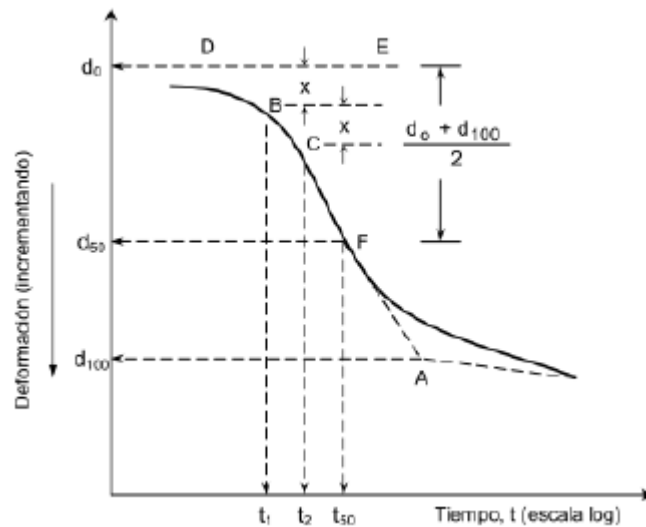
- Extender la porción de línea recta de la consolidación primaria y secundaria, hasta que se intercepte en el punto A. la ordenada de A es representada por d_{100} , esto es, la deformación en el 100% de consolidación primaria.
- La porción de curva inicial del gráfico deformación vs $\log t$ es aproximadamente una parábola en la escala natural. Seleccionando tiempos **t_1** y **t_2** sobre la porción curva de tal forma **$t_2=4t_1$** . Hacer que la diferencia de deformación de la muestra durante el tiempo (t_2-t_1) sea igual a x .
- Dibujar una línea horizontal **DE** tal que la distancia vertical **BD** sea igual a x . La deformación correspondiente a la línea **DE** es igual a **d_0** (esto es, la deformación al 0% de consolidación).

- La ordenada del punto **F** sobre la curva de consolidación representa la deformación al 50% de consolidación primaria, y la abscisa representa el tiempo correspondiente (**t₅₀**).
- Para 50% de grado de consolidación promedio **T₅₀ = 0.197**.

$$Cv = \frac{0,197H_{ef}^2}{t_{50}}$$

Para muestras drenadas en la parte superior y en el fondo, **H_{ef}** es igual a la mitad de la altura promedio de la muestra durante la consolidación. Para muestras drenadas solamente sobre un lado, **H_{ef}** es igual a la altura efectiva de la muestra durante la consolidación.

Figura 10. Método de logaritmo del tiempo para determinar el coeficiente de consolidación.



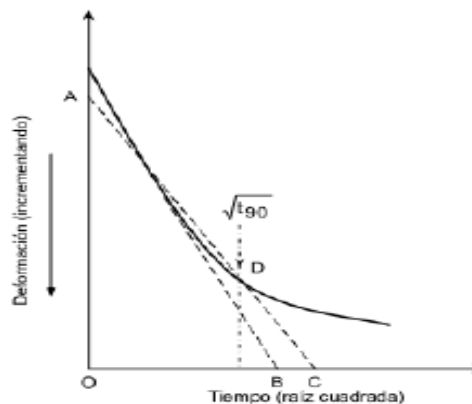
- **Método de Taylor o raíz cuadrada de tiempo**

En este método, se realiza un gráfico deformación vs raíz cuadrada de tiempo para una carga incremental según se muestra en la siguiente figura. Se requiere también las siguientes construcciones gráficas:

- Dibujar una línea **AB** a través de la porción inicial de la curva.
- Dibujar una línea **AC** de tal forma que **OC=1.15OB**. la abscisa del punto **D**, la cual es la intersección de **AC** y la curva de consolidación, nos da la raíz cuadrada de tiempo correspondiente al **90%** de consolidación (**t90**).
- Para 90% de la consolidación, **T90=0.848**.

$$Cv = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}}$$

Figura 11. Método de la raíz cuadrada para determinar el coeficiente de consolidación.



- **Calculo de OCR.**

El OCR (del inglés Over Consolidation Ratio) es la relación de sobre consolidación de un suelo (término generalmente empleado en materiales cohesivos como limos y arcillas).

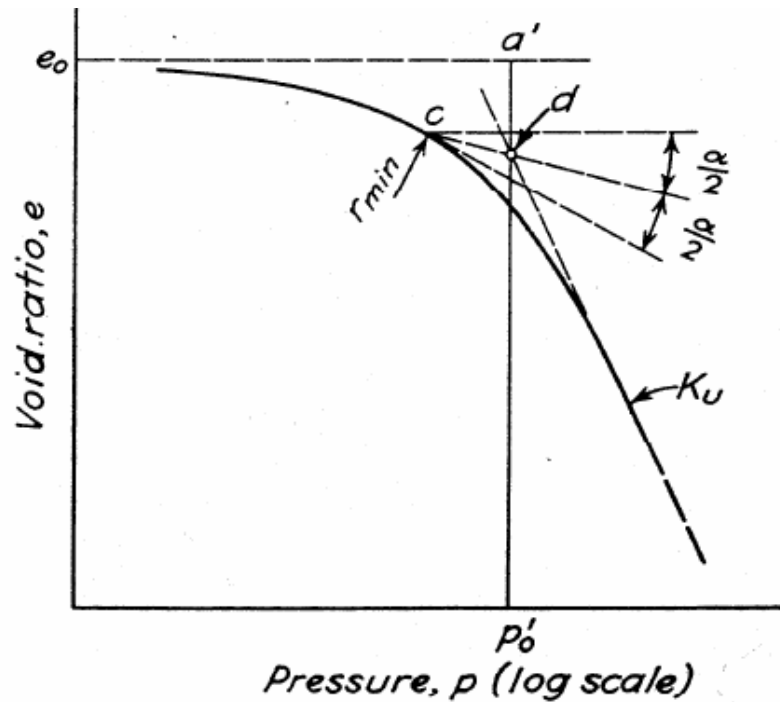
Un suelo, como cualquier materia en esto que llamamos mundo, tiene historia, es decir, está sujeto a una serie de eventos que sucedieron antes del tiempo presente. Específicamente, la historia de esfuerzos influye significativamente en el comportamiento del material. Cuando el suelo en la actualidad está recibiendo un nivel de esfuerzos igual o superior al que soportó en el pasado, decimos que está Normalmente Consolidado (NC), esta condición es también conocida como virgen (suelo virgen). Por el contrario, 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. El OCR para un suelo normalmente consolidado es uno (OCR=1), y para un suelo sobre consolidado es mayor que uno (OCR>1).

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_o}$$

Donde, σ'_p es la presión de sobre consolidación, máximo esfuerzo a que ha estado sometido el suelo en su historia. Y σ'_o es el esfuerzo efectivo inicial del suelo por peso propio.

El proceso para calcular la presión de sobre consolidación es el siguiente:

Figura 12. Método para calcular la presión de sobre-consolidación.



- Localizar el punto de máxima curvatura en la curva de consolidación (0)
 - Se traza una tangente por el punto de mayor curvatura de la curva.
- Por ese punto de tangencia se traza una línea horizontal.
- Se traza la bisectriz del ángulo formado por la tangente y la línea horizontal.
- Se prolonga la recta virgen hasta interceptar la bisectriz.
- En el punto de intercepción del tramo recto y la bisectriz se traza una vertical que permite leer en el eje de las abscisas el valor de la carga de pre consolidación.