

**EVALUACION DEL MEJORAMIENTO DE SUELO POR MEDIO DE DRENES
VERTICALES ACOMPAÑADOS DE PRE-CARGA**

Daniela Mogollón Vargas

000230511

Estefanny Yazmin Rodríguez Sarmiento

000255833

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2018

**EVALUACION DEL MEJORAMIENTO DE SUELO POR MEDIO DE DRENES
VERTICALES ACOMPAÑADOS DE PRE-CARGA**

Daniela Mogollon Vargas

000230511

Estefanny Yazmin Rodríguez Sarmiento

000255833

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Director del Proyecto

MSc. Julián André Flores Galvis

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2018

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Octubre 2018

Dedicatoria

Este trabajo de grado va dedicado a todas aquellas personas que aportaron un granito de arena para lograr esta meta.

A Dios que me dio la salud y la sabiduría para afrontar todos los obstáculos que se presentaron en el camino.

A mis padres quienes han sido mi apoyo incondicional en esta linda etapa que ya culmina. Esto es por ellos y para ellos.

A mis hermanos y mi sobrina quienes siempre han estado presentes durante todo este proceso.

A cada uno de los profesores y amigos que conocí durante toda mi carrera de cada uno aprendí algo nuevo.

Daniela Mogollón Vargas

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado primeramente a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida tan importante y anhelada para mí.

A mis padres que siempre me brindaron su apoyo incondicional para que yo pudiera seguir adelante con mi carrera profesional.

A mi hijo que es lo que más amo en la vida, por darme las ganas para luchar día tras día.

Estefanny Yazmin Rodríguez Sarmiento

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director de tesis, el ingeniero Msc Julián André Galvis Flórez, por su comprensión, colaboración y disposición en este trabajo de grado. Al personal del laboratorio quienes fueron un gran apoyo para el desarrollo de cada ensayo y a cada una de las personas que aportaron un granito de arena en este proceso.

Daniela Mogollón Vargas, Estefanny Yazmin Rodríguez Sarmiento

Tabla de Contenidos

1	INTRODUCCIÓN.....	13
2	DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	14
3	ANTECEDENTES.....	15
4	JUSTIFICACIÓN.....	18
5	OBJETIVOS.....	20
5.1	General.....	20
5.2	Específicos	20
6	MARCO TEÓRICO	21
6.1	Tipos de técnicas para mejoramiento de suelos.	21
6.2	mejoramiento de suelos con drenes verticales.	21
6.3	Ventajas y desventajas de mejoramiento de suelos con drenes	24
6.4	Proceso constructivo de los drenes verticales.	25
6.5	Granulometría en suelos	25
	Análisis granulométrico por tamizado	26
	Análisis granulométrico por hidrómetro	26
6.6	Plasticidad y limites	27
6.6.1	Límites de Atterberg	27
6.6.1.1	Limite líquido.....	27
7	METODOLOGIA	29
7.1	Selección de material	29
7.2	Ensayos de caracterización	29
7.3	Análisis granulométricos de suelos por tamizado (INV E-123)	30
7.4	Determinación de limite líquido, limite plástico (INV E-125 e INV E126).....	30
7.5	Ensayo estándar de compactación (INV E-141).....	31
7.6	Ensayo de corte directo (INV E-154)	31
7.7	Ensayo de consolidación (INV E-151)	33
7.8	Construcción del modelo a escala.....	34
7.9	Cálculos de asentamientos	35
7.10	Comparación de resultados	35
8	RESULTADOS	36
8.1	Ensayos de caracterización	36
	Análisis granulométricos de suelos por tamizado (INV E-123)	36
	Determinación límite líquido y límite plástico (INV E-125 - INV E-126).....	37
	Clasificación del suelo según S.U.C.S.....	37
8.2	Ensayo estándar de compactación (INV E-141).....	38
8.3	Ensayo Corte directo (INV E-154)	38
8.4	Ensayo consolidación unidimensional de suelos (INV E-151).....	41
	Cálculo de OCR	42
	Índice de compresibilidad C_c	43
	Índice de expansibilidad C_s	43
	Asentamientos para suelos.....	43
	Asentamiento en función del tiempo	43

	8
8.5 Resultados modelo a escala	46
9 COMPARACION DE RESULTADOS	48
10 MODELACIÓN DE DRENES VERTICALES EMPLEANDO SOFTWARE SETTLE	49
10.1 TEORIA DEL SOFTWARE.....	49
10.2 MODELACIONES	49
11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
12 BIBLIOGRAFÍA.....	55
13 ANEXOS.....	56
13.1 ANEXO A: ENSAYO DE GRANULOMETRIA	57
13.2 ANEXO B: ENSAYOS LIMITES.....	59
13.3 ANEXO C : ENSAYO ESTANDAR DE COMPACTACION	61
13.4 ANEXO D: ENSAYO CORTE DIRECTO	62
13.5 ANEXO E: ENSAYO DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS	66

Lista de Figuras

Figura 1. Drenes en carretes de 1,5 m a 2,0 m	22
Figura 2. Equipo utilizado para profundidades de hasta 32 metros	23
Figura 3. Pasos para colocación de drenes verticales.....	23
Figura 4. Empleo de drenes verticales bajo construcciones	24
Figura 5. Instalación de drenes verticales.....	25
Figura 6. Límites de Atterberg	27
Figura 7. Dispositivo de ensayo Casagrande	28
Figura 8. Grafica ensayos granulométricos	36
Figura 9. Carta de plasticidad S.U.C.S	37
Figura 10. Grafica ensayo de compactación.....	38
Figura 11. Grafica deformación horizontal vs carga.....	39
Figura 12. Grafica esfuerzo normal vs esfuerzo cortante máximo	40
Figura 13. Curva relación de vacíos vs logaritmo de presión	41
Figura 14. Datos de carga rectangular 0,5mx0,5m	50
Figura 15. Se agregan el estrato de triturado de 0,5m y sus propiedades.....	50
Figura 16. Se agrega el estrato de suelo limoso de 0,77m y sus propiedades ...	51
Figura 17. Se agrega el estrato de suelo arenoso de 0,10m y sus propiedades .	52
Figura 18. Modelo con su respectiva carga y tres estratos de suelo	52
Figura 19. Asentamiento máximo por medio del software 13,6mm= 1,36 cm.....	53
Figura 20. Curva de consolidación para carga 0.5 kg/cm ²	66
Figura 21. Curva consolidación para carga 1.0 kg/cm ²	67
Figura 22. Curva consolidación para carga 2.0 kg/cm ²	68
Figura 23. Curva consolidación para carga 4.0 kg/cm ²	69
Figura 24. Curva de consolidación para descarga 2.0 kg/cm ²	70
Figura 25. Curva consolidación para descarga 1.0 kg/cm ²	71
Figura 26. Curva de consolidación para descarga 0.5 kg/cm ²	72
Figura 27. Curva de consolidación para descarga 0.0 kg/cm ²	73

Lista de Fotos

Foto 1. Fuente de selección del material	29
Foto 2. Cuarteo del material	29
Foto 3. Lavado de material tamiz 200	30
Foto 4. orden de tamices	30
Foto 5. Muestras límites para secado	30
Foto 6. Limite liquido en máquina de Casagrande	30
Foto 7. Preparación de las capas a compactar	31
Foto 8. ejecución ensayo de compactación	31
Foto 9. Enrazado del material compactado	31
Foto 10. preparación de pastillas para ensayo de corte	31
Foto 11. Pastillas para corte directo	31
Foto 12. muestra en cámara de corte	32
Foto 13. Muestra más piedra porosa	32
Foto 14. Cámara de corte con carga muerta	32
Foto 15. muestra en equipo de corte directo	32
Foto 16. ensayo corte directo en ejecución	32
Foto 17. Muestra 1 fallada	32
Foto 18. Muestra 2 fallada	32
Foto 19. Muestra 3 fallada	32
Foto 20. Preparación de muestra para consolidación	33
Foto 21. muestra en anillo de consolidación	33
Foto 22. Muestra en molde de consolidación	33
Foto 23. Ensayo de consolidación en ejecución	33
Foto 24. Modelo a escala	34
Foto 25. Instalación de drenes en modelo	34
Foto 26. Drenes en ejecución	35
Foto 27. Modelo a escala cargado	35
Foto 28. Modelo a escala con carga y deformímetros instalados	35

Lista de tablas

Tabla 1. Antecedentes de drenes verticales	17
Tabla 2. Orden tamices según norma INVIAS	26
Tabla 3. Análisis granulométrico	36
Tabla 4. Determinación limite líquido y plástico.	37
Tabla 5. Ensayo modificado de compactación	38
Tabla 6. Esfuerzo normal vs esfuerzo cortante máximo	39
Tabla 7. Resultados ángulo de fricción y cohesión	40
Tabla 8. Datos de profundidades	41
Tabla 9. Relación OCR	42
Tabla 10. Relación teórica U (%) - T	44
Tabla 11. Calculo del t50	45

Tabla 12. Lecturas deformímetro modelo a escala	47
Tabla 13. Cuadro comparativo resultados modelo a escala y ensayo de consolidación	49
Tabla 14. Lecturas del dial para carga 0,5 kg/cm ²	66
Tabla 15. Lecturas diales para carga 1.0 kg/cm ²	67
Tabla 16. Lecturas diales para carga 2.0 kg/cm ²	68
Tabla 17. Lecturas diales para carga 4.0 kg/cm ²	69
Tabla 18. Lecturas diales para descarga 2.0 kg/cm ²	70
Tabla 19. Lecturas diales para descarga 1.0 kg/cm ²	71
Tabla 20. Lecturas diales para descarga 0.5 kg/cm ²	72
Tabla 21. Lecturas diales para descarga 0.0 kg/cm ²	73

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DEL MEJORAMIENTO DE SUELO POR MEDIO DE DRENES VERTICALES ACOMPAÑADOS DE PRE-CARGA

AUTOR(ES): DANIELA MOGOLLON VARGAS
ESTEFANNY RODRIGUEZ SARMIENTO

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): JULIAN ANDRE FLOREZ

RESUMEN

El método de mejoramiento de suelos mediante drenes verticales acompañados de pre carga, es una técnica que resulta viable para diversos tipos de proyectos en el ámbito de la ingeniería civil ya que, en este, se alcanza un grado de consolidación aceptable y a su vez reduce tiempo; además es una alternativa de solución a los problemas geotécnicos en suelos blandos poco permeables, ya que ayuda acelerando el proceso de consolidación en el suelo a tratar. En este trabajo de grado, se ensayó una muestra de suelo limoso de baja plasticidad en el laboratorio para determinar sus propiedades y el tiempo de consolidación teóricos, se diseñó un modelo experimental en un cajón metálico implementando la técnica de drenes verticales y se modeló el estrato de suelo en el software SETTLE 3D, con el fin de comparar los resultados y confirmar la viabilidad de esta técnica.

**PALABRAS
CLAVE:**

mejoramiento de suelos, consolidación, drenes verticales

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF SOIL IMPROVEMENT THROUGH
VERTICAL DRAINS ACCOMPANIED BY PRE-LOAD

AUTHOR(S): DANIELA MOGOLLON VARGAS
ESTEFANNY RODRIGUEZ SARMIENTO

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: JULIAN ANDRE FLOREZ

ABSTRACT

The method of soil improvement through vertical systems accompanied by preload is a technique that is viable for various types of projects in the field of civil engineering and that, in this, an acceptable degree of consolidation can be achieved and, in turn, reduce the time; It is also a solution alternative to geotechnical problems in soft, low permeable soils, which helps by accelerating the consolidation process in the soil to be treated. In this degree work, a sample of low plasticity silty soil is shown in the laboratory to determine its theoretical properties and time of consolidation, an experimental model was designed and the vertical drainage technique was implemented and the soil stratum was modeled in the SETTLE 3D software, in order to compare the results and confirm the viability of this technique.

KEYWORDS:

soil improvement, consolidation, vertical drains

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo de grado, se realiza la evaluación del mejoramiento del suelo implementando la técnica de drenes verticales acompañados de una precarga, dicha técnica es utilizada para acelerar el tiempo de consolidación, ya que los drenes ayudan a expulsar el agua contenida en el suelo.

La finalidad general del proyecto busca evaluar el comportamiento del suelo y así obtener los resultados satisfactorios en cuanto al comportamiento mecánico para el mejoramiento de suelos de baja plasticidad, realizando un modelo a escala que simule la utilización de la técnica y comparar los resultados de los tiempos de consolidación y los asentamientos producidos en los ensayos de laboratorio y el modelo utilizando el software SETTLE3D.

2 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Cuando se desea construir sobre suelos blandos, algunas estructuras debido a sus cargas pueden colapsar o presentar asentamientos importantes, que amenazan la estabilidad del proyecto. Debido a esto, surge la necesidad de buscar nuevas técnicas de mejoramiento de suelos que sean económicas, efectivas y que permitan evacuar el exceso de agua del suelo, logrando así una aceleración de la consolidación en el terreno y dejando la superficie viable para la construcción, esta técnica se conoce como drenes verticales acompañados de una precarga.

3 ANTECEDENTES.

Título del artículo	Autor (es)	Resumen
"GENERAL RESPONSE OBSERVED IN CYCLICALLY LOADED COHESIVE SOILS IN VERTICAL DRAINS " 2016	Andrés nieto leal y Víctor N. Kaliakin	Recopilación de los resultados de las investigaciones más relevantes, en términos generales, análisis del comportamiento de suelos cohesivos sujetos a cargas cíclicas. Además, se identifican las principales características del comportamiento de suelos cohesivos cargados cíclicamente, teniéndose en cuenta para el desarrollo de nuevos modelos constitutivos usados en la predicción del comportamiento de estos suelos.
"THE CHARACTERISTICS OF ELECTRIC VERTICAL DRAINS IN ELECTRO-OSMOTIC DEWATERING" 2016	Zhaohua Sun, Xiangjuan Yu & Kun Wu	Determinación del efecto del drenaje en drenes verticales eléctricos evaluándolos mediante la implementación de pruebas de campo.
DRENES PREFABRICADOS PARA LA ACELERACION DE LA CONSOLIDACION DE SUELOS ARCILLOSOS (REVISTA OBRAS PUBLICAS) 2010	Jesús Llorca aquesolo y Gonzalo Sánchez Díaz	Utilización de drenes verticales para la consolidación de suelos y así permitir el mejoramiento de las características resistentes y de las deformaciones del terreno, teniendo en cuenta casos especiales de baja capacidad portante y elevada compresibilidad.
"MEJORA GEOTECNICA DEL SUELO" (Revista)	Álvaro López Ruiz	Estudio de técnicas de mejoramiento para suelos finos (blandos) que controlen la erosión, tratando con más detalle la de drenes verticales.
INFLUENCIA DEL ESFUERZO CONFINANTE Y DEL PORCENTAJE DE FINOS EN LA PERMEABILIDAD DE	Norma P. López Acosta	Se presenta el estudio de la influencia del esfuerzo confinante y del porcentaje de finos en la determinación en laboratorios de la permeabilidad de dos posibles materiales a utilizarse en la

MATERIALES PARA DRENES VERTICALES DE ARENA" (REVISTA GEOTECNICA 242) 2017		construcción de drenes verticales de arena en la zona lacustre de la ciudad de México.
MEJORA DEL TERRENO DE CIMENTACIÓN MEDIANTE PRECARGA (REVISTA OBRAS PUBLICAS)	Carlos Franco Muñoz	Métodos de mejora de un terreno por la aplicación de cargas en superficie, previamente a la colocación de las cargas estructurales; estudiándose desde un punto de vista teórico, la posibilidad de eliminar el asiento de consolidación primaria e incluso reducir el de consolidación secundaria bajo carga permanente y así analizar la aceleración del proceso de mejora mediante drenes verticales.
ESTADO DEL ARTE ACERCA DE DIVERSAS TÉCNICAS USADAS PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS EN EL MUNDO. (TESIS)	Jorge Andrés Badillo torres Dirigido por: Ing. Julián André Galvis Flórez	realizar consulta bibliográfica recopilando información de las diversas mecánicas que se emplean en la actualidad y alrededor el mundo para el mejoramiento de los suelos.
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS DESPUÉS DE LA ADICIÓN DE GEOTEXTIL TEJIDO. (TESIS)	Carlos Alfonso Triana Rodríguez Diego armando Villamizar duarte Dirigido por: Ing. Gerardo Bautista	determinar el porcentaje óptimo de fibras de geotextil tejido que debe agregarse para aumentar el Angulo de fricción interna del suelo arcilloso y la longitud de la fibra que ofrece la mejor resistencia.
COMPARACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS DE LOS SUELOS ARCILLOSO EN MODELOS A ESCALA CON LOS ESTIMADOS POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE LA CONSOLIDACIÓN. (TESIS)	Álvaro Andrés Rueda Lizcano Iván Andrés Jaimes Saavedra Dirigido por: Ing. Gerardo Bautista	Medir los asentamientos producidos en arcillas de la región sometidos a presiones verticales y compararlos con los estimados a partir de la teoría de la consolidación.

ANALISIS DEL MEJORAMIENTO Y ESTABILIZACION DE SUELOS CON CAL (TESIS)	Cesar Orlando Narváez Quiñonez Dirigido por: Ing. Luz Marina Torrado Gómez	Analizar y evaluar el comportamiento mecánico de suelos arcillosos en cuanto a su mejoramiento y estabilización con cal.
ANALISIS Y ESTABILIZACION DE SUELOS CON SISTEMAS TRANSPORTADOS DE COLOIDES (STC) (TESIS)	Yefferson Alexander Ortega Miguel Ángel Ortiz Manchego Dirigido por: Ing. Julián André Galvis Flórez	Comprobar la efectividad del sistema transportado de coloides (S.T.C) en la estabilización de un suelo limoso de ligera plasticidad con baja resistencia a los esfuerzos cortantes.

Tabla 1. Antecedentes de drenes verticales

4 JUSTIFICACIÓN

Es de gran importancia realizar investigaciones que permitan contribuir a nuevas alternativas para el mejoramiento de suelos, ya que es fundamental en la planeación de proyectos, donde se evidencia las consecuencias que conllevan tanto de presupuesto y tiempo.

En la actualidad existen diferentes técnicas de mejoramiento de suelos que tienen gran impacto en los proyectos de ingeniería. Para determinar la viabilidad y factibilidad al ser implementadas como solución, se debe conocer las propiedades ingenieriles de los suelos con los que se está trabajando, y las características propias del proyecto, ya que de ello depende la aplicabilidad de cada técnica.

En este proyecto de grado, se llevará a cabo una investigación sobre los drenes verticales, la cual es una técnica de mejoramiento de suelo que es utilizada junto con una precarga, para acelerar el proceso de consolidación de un estrato poco permeable, el cual permite a la hora de construir, contar con un estrato de suelo ya consolidado, direccionando el flujo de agua hacia el dren y evacuando hacia la superficie donde es bombeada. [1]

La implementación de esta técnica es viable en obras ya que ofrece ventajas tales como; economía, fácil transporte y acopio de material, instalación rápida, alteración mínima del terreno entre otras que la convierten en una buena alternativa a la hora de sacar costos para una construcción. [2]

Para llevar a cabo este trabajo de grado, es necesario buscar una documentación que respalde que tan viable es el método a la hora de utilizarlo en la vida profesional, por ello se realizaron consultas en diferentes bases de datos, libros y revistas para determinar las diferentes formas de utilización y conocer de los diferentes tipos de drenes que existen.

Toda la investigación llevada a cabo en este proyecto de grado es con la finalidad de realizar la evaluación del mejoramiento del suelo por medio de drenes verticales acompañados de una precarga y comparar resultados antes y después de implementar estos drenes, determinar los asentamientos teóricos que se producen a la hora de ser sometidos por esta carga y verificarlos mediante el uso del software.

Además, implementar un modelo a escala donde se pueda apreciar las deformaciones del suelo, dependiendo de los parámetros involucrados y materiales necesarios para su construcción, este modelo a escala, se realizó en material metálico con la finalidad de realizar los ensayos establecidos que nos permitirá determinar el comportamiento de la masa de suelos a ensayar y así determinar las deformaciones que se presentarán.

5 OBJETIVOS

5.1 General

Evaluar el comportamiento y efectividad del método de mejoramiento de suelo conocido como drenes verticales, empleando un modelo a escala y realizando ensayos de laboratorio.

5.2 Específicos

- Realizar ensayos de laboratorio a una muestra de suelo de comportamiento blando cohesivo, clasificar el suelo y determinar la magnitud de los asentamientos mediante el ensayo de consolidación.
- Elaborar un modelo a escala, utilizando un suelo con condiciones apropiadas para emplear la técnica de drenes verticales, acompañados de precarga para consolidar el suelo.
- Determinar los asentamientos del suelo antes y después de la utilización de los drenes verticales, por medio del software SETTLE.
- Comparar los resultados del ensayo en el laboratorio versus el modelo a escala, para determinar qué tan afectiva es la técnica de los drenes verticales.

6 MARCO TEÓRICO

6.1 Tipos de técnicas para mejoramiento de suelos.

Existen diversas técnicas de mejoramiento en suelos, se debe seleccionar el tipo de método a utilizar dependiendo de la geología del terreno, entre estos métodos los más comunes a utilizar son:

- Inyecciones de lechada: se aplican a los poros del suelo por medio de un líquido (mortero o lechada), esto aumenta la resistencia del mismo impermeabilizando el suelo a través de un tiempo determinado logrando incrementar las propiedades mecánicas del suelo.
- Compactación dinámica: esta técnica tiene como fin mejorar las propiedades del suelo por medio de la capacidad portante dejando caer martillos de gran peso a una altura determinada sobre el suelo a mejorar y así lograr alcanzar la densidad deseada.
- Columnas de grava: esta técnica de mejoramiento de suelos es utilizada en terrenos blandos (granulares), en los cuales existe un desplazamiento por parte del material a tratar y las cuales generan vibraciones producidas durante la penetración del tubo utilizado en la ejecución, con una profundidad mínima de 20 metros [3].
- Estabilización con cal: por medio de esta técnica se logra mejorar las características del suelo aumentando la capacidad de carga, ya que la utilización de cal mejora las características plásticas del suelo y además posee costos moderados, fácil manejo y existencia abundante.
- Jet grouting: consiste en mejorar la consolidación del terreno por medio de inyección de lechada de cemento a alta presión [4], el proceso de instalación se realiza por tres etapas, la primera es la perforación de la cota final, la segunda es cuando se inyecta la lechada y por último se procede a la recuperación de la tubería para cerciorarse que la lechada llegue hasta el punto deseado y así pueda mejorar la capacidad portante del suelo.

6.2 mejoramiento de suelos con drenes verticales.

Los drenes verticales se han venido utilizando desde los años 70, su principal uso es poder reducir el asentamiento en terrenos donde el suelo no es muy firme y no deja llevar a cabo una construcción.

Esta técnica hace que el tiempo de ejecución en infraestructura sea más corto y a su vez el proceso de mejora este bajo control ya que esta mejora del terreno

tiene muchas ventajas principalmente en suelos granulares no muy profundos y obras superficiales para disminuir asentamientos diferenciales.

La función de los drenes es facilitar la evacuación del agua de los poros de la superficie, permitiendo una rápida consolidación del suelo en el que se desea construir. [5]

Esta técnica consiste principalmente en introducir los drenes verticalmente en el terreno con equipos especiales, uno de estos equipos puede ser una lanza de 140mm, que es accionada por medios hidráulicos o vibratorios, de esta manera se procede a la perforación por medio de un mandril generalmente cerrado de material geotextil, ya que sirve para reforzar, filtrar, drenar, permeabilizar y proteger.

Los drenes normalmente vienen en carretes de 1,5 m a 2,0 m de diámetro y se colocan con una separación de 1,5 m a 3 m. (figura 3)

Figura 1. Drenes en carretes de 1,5 m a 2,0 m



Fuente [6]

Las velocidades de instalación pueden oscilar habitualmente de 0,3 m/s a 0,6 m/s. El promedio de rendimiento de la instalación puede ser de hasta 6.000 m/día/equipo.

La consolidación de suelos cohesivos con precarga y acelerada con drenes suele ser de hasta 20 metros, aunque con equipos especiales se han alcanzado profundidades de 30 metros, e incluso mayores, como se puede apreciar en la figura 2.

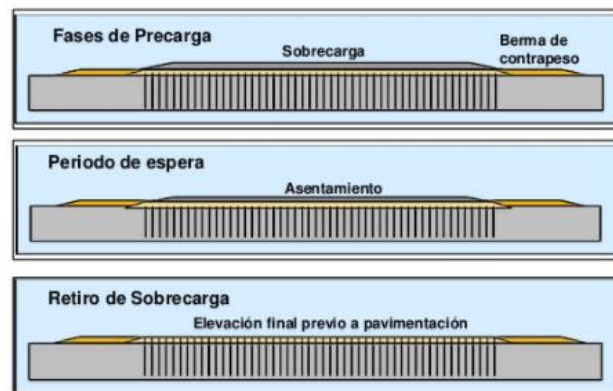
Figura 2. Equipo utilizado para profundidades de hasta 32 metros



Fuente Soletanche bachy cimas [7]

Después de esto, se instala el dren dentro de un perfil metálico que la mayoría de veces posee forma romboidal y que sirve para evitar su contacto con el terreno durante la hincada, de esta manera se obtiene una mejor relación entre la alteración mínima posible del terreno durante la instalación ya que se colocan de acuerdo a la profundidad de diseño; [8] y ya por último se procede a la construcción deseada en el terreno, ya sea para terraplenes para las vías de comunicación, áreas de almacenamiento de cielo abierto a industrias y puertos, donde se evalúa el periodo de espera y retiro de sobrecarga. [9]

Figura 3. Pasos para colocación de drenes verticales

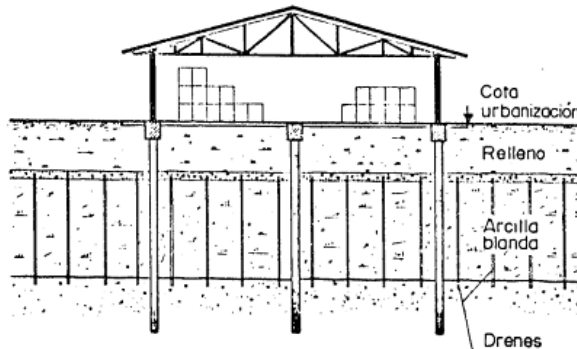


Fuente mejora del terreno mediante precarga [5]

Los drenes verticales están compuestos por una camisa filtrante, que envuelve un alma que es por donde se evacua el agua que expulsa el suelo durante el proceso de consolidación; esta camisa debe cumplir una doble condición, por una parte,

debe tener una permeabilidad igual o mayor que la del propio suelo a consolidar y por otra, debe retener las partículas más finas del suelo.

Figura 4. Empleo de drenes verticales bajo construcciones



Fuente Revista obras publicas

También existen otros casos, en donde esta técnica de mejoramiento es utilizada de la misma manera pero introduciéndole corriente a los drenes, con el fin de determinar el efecto del drenaje en drenes verticales eléctricos evaluándolos mediante la implementación de pruebas de campo. [9]

6.3 Ventajas y desventajas de mejoramiento de suelos con drenes

Esta técnica de mejoramiento posee muchas ventajas, tales como: [2]

- Más económicos
- Instalación rápida
- Proceso mecanizado con supervisión elemental
- Continuidad del dren asegurada
- Alteración mínima del terreno
- Fácil transporte y acopio del material
- Limpieza del emplazamiento
- Drenaje de agua garantizado, aun en el caso de alta presión de suelo y deformación
- Pequeña perturbación para las diferentes capas de suelo

En cuanto al uso de precarga:

- Sólo requiere el uso de maquinaria convencional de movimiento de tierras (rodillos, bulldozers, etc.).
- No requiere especialización o calificación en cuanto al operador de los equipos de maquinaria pesada.

Esta técnica de mejoramiento también posee algunas desventajas, tales como:

En cuanto al uso de precarga:

- El área de relleno para la precarga debe ser de 10 m más allá del área a construir.
- La precarga requiere el transporte de grandes cantidades de material para el relleno.
- El relleno para la precarga puede permanecer en su lugar durante tiempos prolongados, lo que retrasa la construcción.

6.4 Proceso constructivo de los drenes verticales.

- Estudio de la geología del terreno, para establecer tipo de suelo y mirar si se puede utilizar esta técnica
- Selección de separación entre cada hueco donde se implementarán los drenes verticales
- Se procede instalar los drenes verticales en el suelo mediante el tubo metálico; este se coloca sobre un mástil sujetado al brazo de una excavadora.
- Cuando se alcanza la profundidad requerida, se empieza a retirar el tubo y se corta el dren unos 20 cm por encima de la plataforma de trabajo. [1]
- En el caso de un hincado estático simple, la resistencia de punta de las capas penetradas, incluyendo la plataforma de material granular, debe ser menor a 5 MPa. En el caso de suelos compactos, se puede utilizar un sistema de vibro-hincador o bien realizar perforaciones previas.

Figura 5. Instalación de drenes verticales



Fuente Suelos Ingeniería S.A.S [2]

6.5 Granulometría en suelos

En los primeros años de investigación sobre las propiedades de los suelos, se creía que éstas dependían directamente de la distribución de las partículas según sus tamaños; debido a esto la preocupación principal de los ingenieros era la búsqueda de métodos acertados para obtener esta distribución. [10]

Existen dos métodos principales que se utilizan para la separación de un suelo en diferentes fracciones: la separación por tamices y el método del hidrómetro.

Análisis granulométrico por tamizado

Es utilizado cuando las partículas tienen un tamaño superior o igual a 75mm. Este método consiste en pasar una muestra de suelo por diferentes mallas o tamices los cuales son ordenados de manera descendente según el tamaño de su apertura, de tal manera que se pueda lograr la distribución de las partículas presentes en una muestra de suelo.

Los tamices según la norma (INV E-123) se deben utilizar en el siguiente orden:

Tamiz	Abertura (mm)
3"	75.000
2"	50.000
1 1/2"	37.500
1"	25.000
1/4"	19.000
3/8"	9.500
No. 4	4.750
No. 8	2.360
No.10	2.000
No.16	1.100
No. 20	0.850
No. 30	0.600
No. 40	0.425
No. 50	0.300
No. 60	0.250
No. 80	0.180
No. 100	0.150
No. 140	0.106
No. 200	0.075

Tabla 2. Orden tamices según norma INVIAS

Análisis granulométrico por hidrómetro

Es utilizado cuando las partículas tienen un tamaño inferior a 75mm. Se basa en el hecho de que la velocidad de sedimentación de partículas en un líquido es función de su tamaño. Éste último método se entiende que está fundamentado en Stokes, ya que proporciona una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo en un fluido y el tamaño de esas partículas.

6.6 Plasticidad y límites

La plasticidad es la propiedad que tiene los suelos de deformarse sin perder volumen ni agrietarse, cuando son sometidos a fuerzas de compresión. Esta propiedad depende del contenido de agua y varía de un suelo a otro.

Atterberg determinó 4 estados de consistencia del suelo según su contenido de humedad, un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco, Al agregársele agua poco a poco, va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico y, finalmente, líquido.

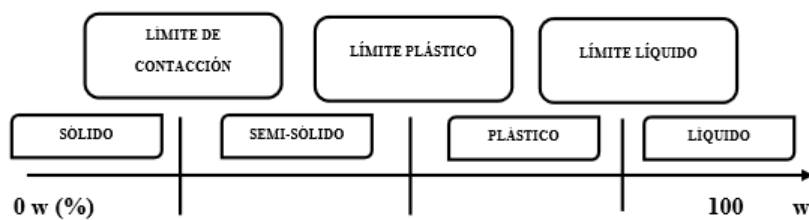


Figura 6. Límites de Atterberg

Fuente [11]

Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

6.6.1 Límites de Atterberg

Los límites de mayor interés en los suelos son el límite líquido y el plástico, ya que estos presentan una alta deformación y drástica reducción de su capacidad portante.

6.6.1.1 Límite líquido

El límite líquido de un suelo es determinado por medio de la copa de Casagrande, y se define como el contenido de agua con el cual se cierra una ranura mediante 25 golpes.

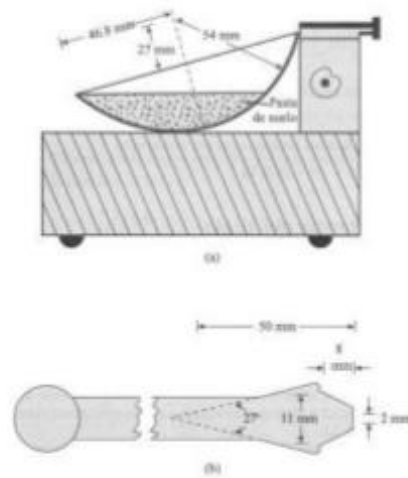


Figura 7. Dispositivo de ensayo Casagrande

Fuente [11]

6.6.1.2 Limite plástico

Se define como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 3 mm de diámetro.

6.6.1.3 Índice de plasticidad

Es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

$$IP = LL - LP$$

7 METODOLOGIA

7.1 Selección de material

Se realizó una búsqueda por diferentes ladrilleras de la ciudad de Bucaramanga con el fin de encontrar un material de carácter limoso. Dicho material utilizado en este trabajo de grado fue extraído de senderos aledaños a la universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga



Foto1.Fuente de selección del material

7.2 Ensayos de caracterización

Después de extraer el material, se procede a cuartear una muestra del material para realizar los respectivos ensayos de caracterización, como granulometría, límites de Atterberg y humedad óptima, para determinar las propiedades físicas y ver que sea un material apto para utilizar en este trabajo de grado.



Foto 2.Cuarteo del material

7.3 Analisis granulometricos de suelos por tamizado (INV E-123)

Con el fin de corroborar que el material seleccionado corresponde a un suelo limoso, se realizaron 2 ensayos de granulometría por tamizado con su respectivo lavado por el tamiz N.º 200. Ver anexo A



Foto 3. Lavado de material tamiz 200



Foto 4. orden de tamices

7.4 Determinacion de limite liquido, limite plastico (INV E-125 e INV E126)

Una vez verificado que el material seleccionado es un material fino, es decir, más del 50% pasa el tamiz N.º 200, se procedió a realizar 2 ensayos de límite líquido y límite plástico, con el fin de determinar su ubicación en la carta de plasticidad de Casagrande. Ver anexo B.



Foto 6. Limite liquido en máquina de Casagrande



Foto 5. Muestras límites para secado

7.5 Ensayo estandar de compactacion (INV E-141)

Con el fin de determinar la humedad óptima y el peso seco máximo del suelo, se realizaron ensayos de compactación tipo Proctor estándar. Dichos parámetros se utilizaron tanto para la preparación de las muestras de laboratorio para los ensayos de corte directo y consolidación, así como también para la compactación en la construcción del modelo a escala. Ver anexo C.



Foto 7. Preparación de las capas a compactar



Foto 8. ejecución ensayo de compactación



Foto 9. Enrazado del material compactado

7.6 Ensayo de corte directo (INV E-154)

Se realizó el ensayo de corte directo a 3 muestras de suelo, tomadas del ensayo de proctor estándar con la humedad óptima, para determinar el ángulo de fricción y la cohesión presente en el suelo. Ver anexo D.



Foto 10. preparación de pastillas para ensayo de corte



Foto 11. Pastillas para corte directo



Foto 12. muestra en cámara de corte



Foto 13. Muestra más piedra porosa



Foto 14. Cámara de corte con carga muerta

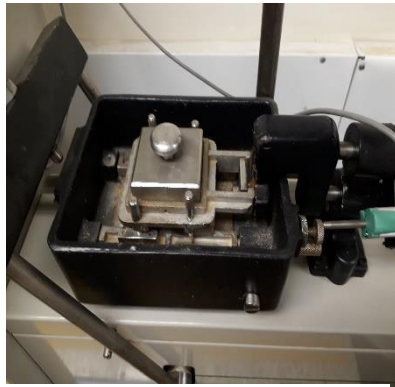


Foto 15 muestra en equipo de corte directo



Foto 16 ensayo corte directo en ejecución



Foto 17. Muestra 1 fallada



Foto 18. Muestra 2 fallada



Foto 19. Muestra 3 fallada

7.7 Ensayo de consolidación (INV E-151)

Se realizó un ensayo de consolidación, con 4 etapas de carga y 4 de descarga, con el fin de obtener las curvas de compresibilidad y a partir de ellas estimar las relaciones de vacíos bajo ciertas cargas, y calcular los asentamientos. Ver anexo E.



Foto 20. Preparación de muestra para consolidación



Foto 21 muestra en anillo de consolidación



Foto 22. Muestra en molde de consolidación



Foto 23. Ensayo de consolidación en ejecución

7.8 Construcción del modelo a escala

Se empleó un cajón de acero de dimensiones 70x70x100 cm, en el cual se compactó el suelo debidamente ensayado en el laboratorio por capas de 15 cm de espesor, iniciando con una capa de arena de 10 cm y finalizando con grava, todo el estrato de suelo siempre permaneció saturado.

Se colocó una placa de 50x50 cm en el medio del cajón y en ella se instalaron mangueras de polietileno que simulan los drenes verticales, de diámetro 3 mm y 70 cm de largo, las cuales tienen múltiples perforaciones por donde es expulsada el agua, fueron instaladas con la ayuda de una varilla con el fin de que quedaran verticales en el estrato de suelo, con una separación de 5 cm.

Para la postura de la sobrecarga se realizó una base en madera de tal manera que el peso no tapara los drenes, y sobre ella se instaló una carga con bloques de concreto de 250 kg y los respectivos deformímetros.



Foto 24. Modelo a escala



Foto 25. Instalación de drenes en modelo



Foto 27. Modelo a escala cargado



Foto 28. Modelo a escala con carga y deformímetros instalados



Foto 26. Drenes en ejecución

7.9 Cálculos de asentamientos

Con los resultados obtenidos en el ensayo de consolidación, se calcularon los asentamientos teóricos empleando las teorías clásicas de mecánica de suelos y verificaron estos asentamientos por medio del software SETTLE 3D, esperando que estos asentamientos coincidieran con los mostrados por el modelo a escala, teniendo en cuenta el espesor de la capa limosa y la sobrecarga utilizada.

7.10 Comparación de resultados

Finalmente se hace una comparación de resultados de los asentamientos calculados teóricamente, con el software y en el modelo a escala para establecer similitudes, diferencias, errores y tendencias.

8 RESULTADOS

8.1 Ensayos de caracterización

Siguiendo la metodología se obtuvieron los siguientes resultados:

Análisis granulométricos de suelos por tamizado (INV E-123)

Se realizaron 2 ensayos al material escogido para determinar la composición del suelo según el porcentaje de gravas, arenas y finos.

	% Gravas	%Arenas	%Finos
Prueba 1	0.98	46.83	52.19
Prueba 2	0.70	45.98	53.31
Promedio	0.84	46.40	52.75

Tabla 3. Análisis granulométrico

Según el promedio de las 2 pruebas realizadas al suelo se determinó que el material está compuesto por 0.84% de gravas 46.40% de arena y 52.75% de fino, siendo este un suelo limoso o arcilloso ya que más del 50% es retenido en el tamiz N. ° 200, sin embargo, se realizó el ensayo de límites de Atterberg para saber con exactitud a qué tipo de suelo corresponde.

La curva granulométrica obtenida de las 2 pruebas realizadas al material es la siguiente:

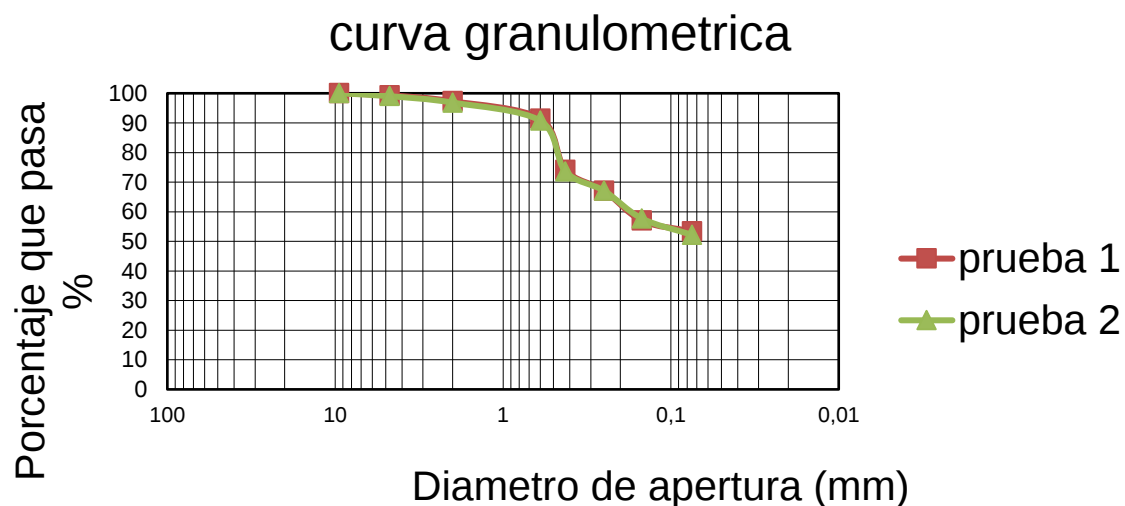


Figura 8. Grafica ensayos granulométricos

Fuente: los autores

Determinación límite líquido y límite plástico (INV E-125 - INV E-126)

Se realizaron 2 ensayos para la determinación del límite líquido y 2 para el límite plástico, y de esta manera clasificar correctamente el suelo por medio de la S.U.C.S

	L. Líquido	L. Plástico	I. Plasticidad
Prueba 1	38,6	26,2	12
Prueba 2	39,4	26,3	13
promedio	39	26,25	12,5

Tabla 4. Determinación límite líquido y plástico.

Clasificación del suelo según S.U.C.S

Debido a que el suelo presenta un porcentaje de finos mayor al 50%, su clasificación está dada por medio de la carta de plasticidad de Casagrande en la cual se ingresa con el promedio del límite líquido y el índice de plasticidad obtenidos en los ensayos anteriormente descritos. Presentando un índice de plasticidad superior al 7% y un límite líquido inferior al 50% que corresponden a un limo de baja plasticidad (ML).

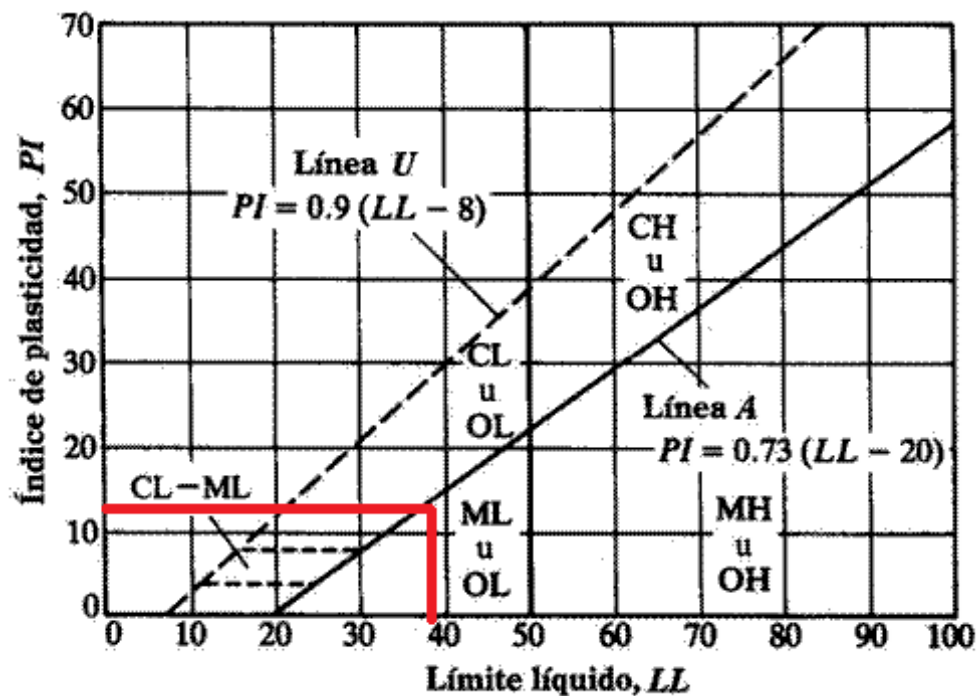


Figura 9. Carta de plasticidad S.U.C.S

8.2 Ensayo estándar de compactación (INV E-141)

Se realizó 1 ensayo con el fin de determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo.

Ensayo	Humedad óptima (%)	Densidad seca máxima(gr/cm ³)
1	16,78	1,436

Tabla 5. Ensayo modificado de compactación.

El suelo ensayado inicialmente tenía una humedad del 2%, la cual se fue incrementando cada 2%, hasta llegar a una humedad del 25%, en la cual se evidencio que la muestra ya había disminuido el peso específico.

Con los datos obtenidos se realizó una gráfica en la cual se determina una humedad óptima del 16,78% y una densidad seca máxima del 1,436 gr/cm³.

La curva de compactación obtenida de la muestra de suelo es la siguiente:

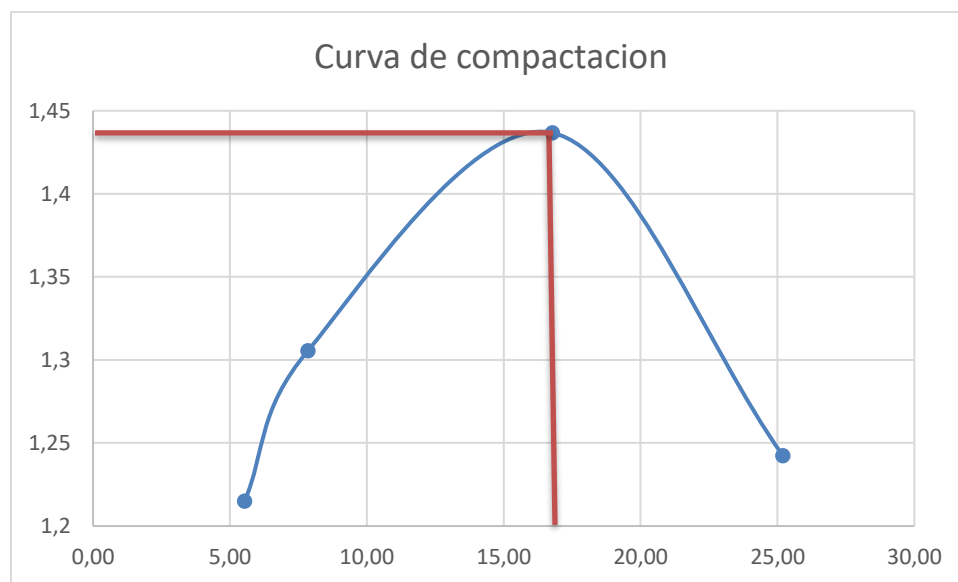


Figura 10. Grafica ensayo de compactación.

Fuente: los autores

8.3 Ensayo Corte directo (INV E-154)

Se realizó un ensayo de corte directo a 3 muestras de suelo con esfuerzos de 0,5 kg/cm², 1 kg/cm² y 2 kg/cm² para determinar el ángulo de fricción y la cohesión, obteniendo los siguientes resultados:

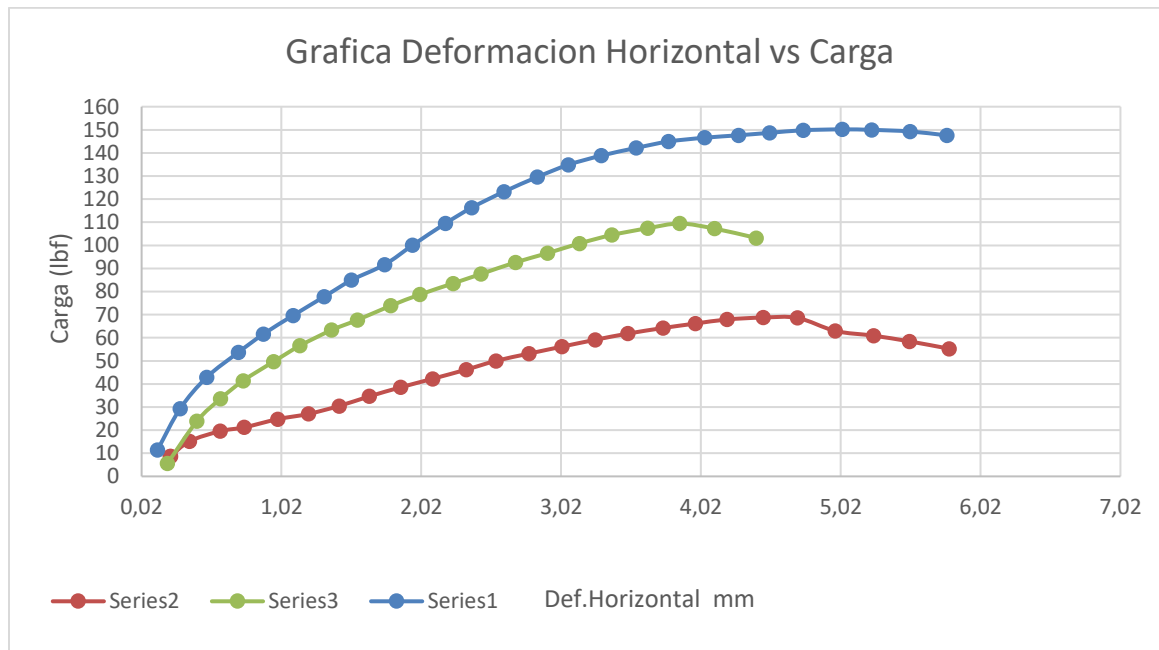


Figura 11. Grafica deformación horizontal vs carga

Fuente: los autores

La gráfica anterior muestra las deformaciones horizontales vs la carga para los 3 esfuerzos anteriormente descritos con las unidades estipuladas en la norma (INV E-154).

Esfuerzo normal (lbf/pulg²)	Esfuerzo cortante (lbf/pulg²)
7,11	3,89
14,22	6,19
28,44	8,49

Tabla 6. Esfuerzo normal vs esfuerzo cortante máximo

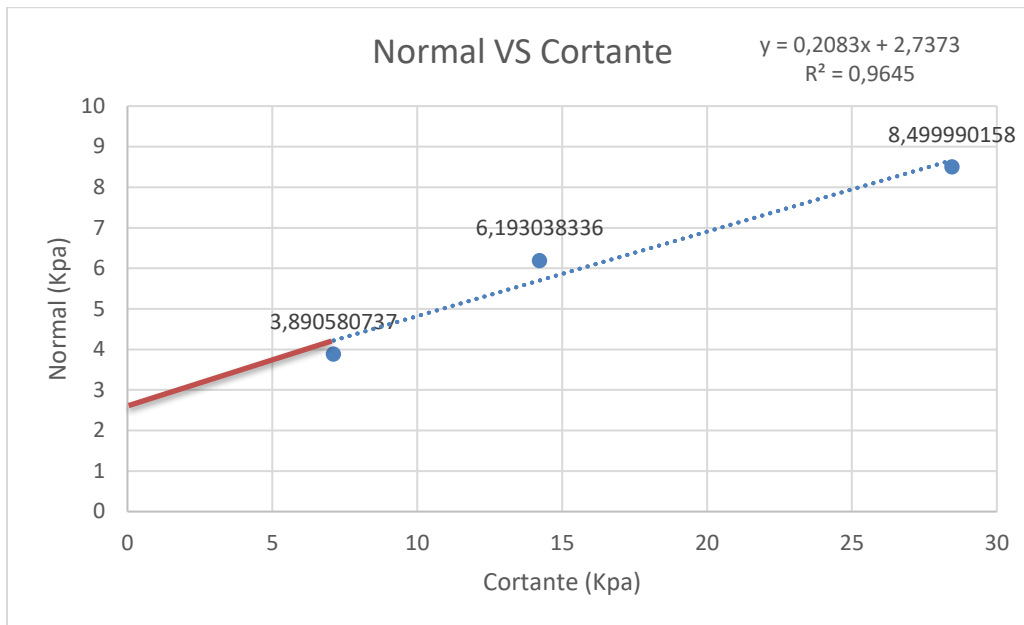


Figura 12. Grafica esfuerzo normal vs esfuerzo cortante máximo

Fuente: los autores

ángulo de fricción	11,78	grados
Cohesión	2,7	Kpa

Tabla 7. Resultados ángulo de fricción y cohesión

La gráfica anterior corresponde a los esfuerzos normales vs el esfuerzo cortante máximo de cada punto de corte con los cuales realizando una regresión lineal se determinó el ángulo de fricción de 11, 78° y la cohesión 2,7 Kpa.

8.4 Ensayo consolidación unidimensional de suelos (INV E-151)

Carga	Carga, P	Lectura, M (1/1000)in	$\varepsilon' = \frac{M}{h_m}$	$\frac{h_m - h_s}{M}$ (cm)	$e = \frac{h_m - h_s - M}{h_s}$
I	0,50	30,9	0,004	0,73	0,57
II	1,00	106,0	0,013	0,71	0,56
III	2,00	224,1	0,028	0,68	0,54
IV	4,00	315,0	0,040	0,66	0,52
V	2,00	305,9	0,039	0,66	0,52
VI	1,00	276,0	0,035	0,67	0,53
VII	0,50	248,9	0,032	0,68	0,53
VIII	0,00	60,0	0,008	0,72	0,57

Tabla 8.Datos de profundidades

Los valores de las relaciones de vacíos inicial y final presentados en la tabla anterior se obtuvieron de la curva de consolidación, esto se puede apreciar en la siguiente gráfica:

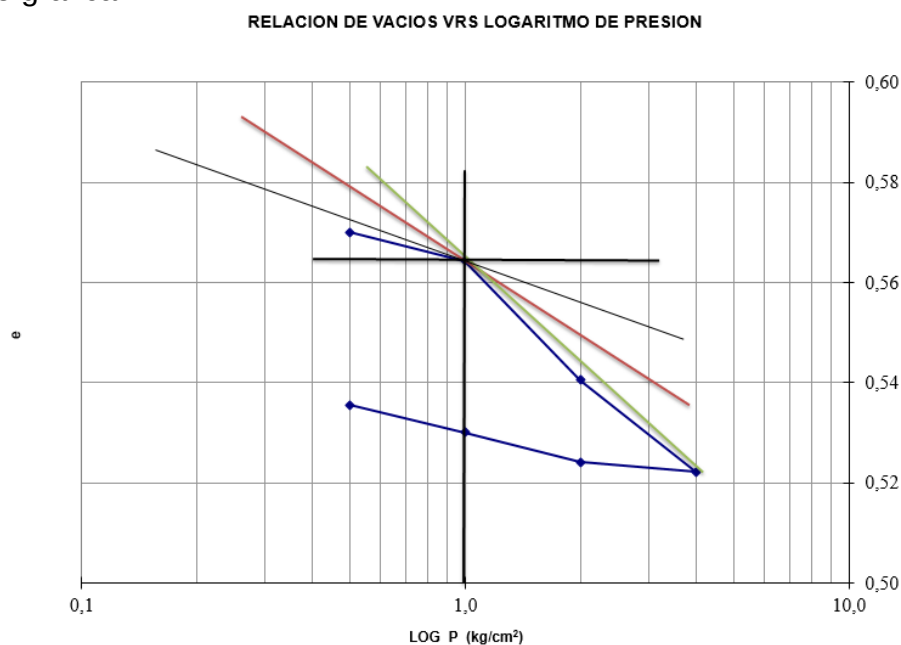


Figura 13. Curva relación de vacíos vs logaritmo de presión

Fuente: los autores

De la gráfica anterior, se observa que el suelo presenta un esfuerzo de pre-consolidación es decir la carga histórica máxima que ha sentido la masa de suelo y es la carga que genera deformación de 1 kg/cm².

Calculo de OCR

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma'_v}$$

$$\mu = \varphi_w * H_w$$

$$\mu = 1 \frac{t}{m^3} * 0,385 m$$

$$\mu = 0,385 t/m^2$$

$$\sigma_v = \varphi * H$$

$$\sigma_v = 1,49 \frac{t}{m^3} * (0,77m/2)$$

$$\sigma_v = 0,573 T/m^2$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu$$

$$\sigma'_v = 0,573 T/m^2 - 0,385 T/m^2$$

$$\sigma'_v = 0,188 t/m^2$$

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma'_v}$$

$$OCR = \frac{10 T/m^2}{0,188 T/m^2}$$

$$OCR = 53,19$$

OCR >1	Sobre-consolidado
OCR=1	Normalmente consolidado

Tabla 9. Relación OCR

Según la tabla anterior al ser la OCR mayor que 1, se considera un suelo sobre-consolidado, es decir que ha soportado presiones mayores a la que soportaba en el terreno en el momento de la muestra.

Se procede hallar el Índice de compresibilidad C_c y el índice de expansibilidad C_s:

Índice de compresibilidad C_c

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log P_2 - \log P_1}$$

$$C_c = \frac{0,522 - 0,541}{\log(2,00) - \log(4,00)}$$

$$C_c = 0,063$$

Índice de expansibilidad C_s

$$C_s = \frac{e_3 - e_4}{\log P_4 - \log P_3}$$

$$C_s = \frac{0,536 - 0,530}{\log(1,00) - \log(0,50)}$$

$$C_s = 0,019$$

Asentamientos para suelos

$$S = \frac{C_s * H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma + \Delta\sigma}{\sigma}$$

$$S = \frac{0,019 * 0,77}{1 + 0,57} \log \frac{0,188 + 10}{0,188}$$

$$S = 0,016m = 1,6 \text{ cm} \rightarrow \text{asentamiento teorico}$$

Asentamiento en función del tiempo

El factor tiempo T se determina en el proceso de consolidación con la ecuación:

$$T = \frac{C_v * t}{H^2}$$

Relación teórica U (%) – T	
U (%)	T
0	0.000
10	0.008
15	0.018
20	0.031
25	0.049
30	0.071
35	0.096
40	0.126
45	0.159
50	0.197
55	0.238
60	0.287
65	0.342
70	0.405
75	0.477
80	0.565
85	0.684
90	0.848
95	1.127
100	∞

Tabla 10. Relación teórica U (%) - T

De la tabla anterior para un porcentaje de U=50%, se obtuvo un T=0,197.

T50	0,197
H (pastilla) Cm	1,125
H (estrato) Cm	38,5

Tabla 11. Datos para el cálculo de t50

carga	D0	D100	D50	t50(min)
0,5	0,0381	0,078486	0,058293	10
1	0,18288	0,26924	0,22606	70
2	0,494792	0,569214	0,532003	4
4	0,69342	0,8001	0,74676	1
T50 (promedio)	85 min	5100 seg		

Tabla 12. Calculo del t50

Los datos de la tabla anterior fueron sacados por medio de las gráficas del ensayo de consolidación, con los cuales se procede hallar el coeficiente de consolidación C_v , y el tiempo que tarda el suelo en consolidarse sin la utilización de la técnica de drenes verticales:

$$C_v = \frac{T * H^2}{t}$$

$$C_v = \frac{0,197 * 1.125^2 cm}{5100 seg}$$

$$C_v = 4,88879 * 10^{-5} cm^2/seg$$

$$t = \frac{T * H^2}{c_v}$$

$$t = \frac{0,197 * 38,5^2 cm}{4,88879 * 10^{-5} cm^2/seg}$$

$$t = 5972918,519 seg$$

$$t = 69,13 dias$$

Para que el suelo ensayado en el laboratorio alcance una consolidación del 100% sin la utilización de la técnica de drenes verticales se necesitan 69.13 días.

8.5 Resultados modelo a escala

Las lecturas de las deformaciones en el modelo a escala fueron tomadas diariamente durante 50 días consecutivos de lunes a sábado obteniendo los siguientes resultados:

días	Deformaciones	
	0.01 mm	Mm
16-jul	0.00	0.0
17-jul	35	0,35
18-jul	52	0,52
19-jul	69	0,69
21-jul	84	0,84
23-jul	99	0,99
24-jul	123	1,23
25-jul	157	1,57
26-jul	184	1,84
27-jul	211	2,11
28-jul	259	2,59
30-jul	295	2,95
31-jul	347	3,47
01-ago	389	3,89
02-ago	413	4,13
03-ago	462	4,62
04-ago	496	4,96
06-ago	532	5,32
08-ago	581	5,81
09-ago	600	6
10-ago	643	6,43
11-ago	680	6,8
13-ago	697	6,97
14-ago	730	7,3
15-ago	779	7,79
16-ago	790	7,9
17-ago	838	8,38
20-ago	869	8,69
21-ago	888	8,88
22-ago	903	9,03
23-ago	940	9,4
24-ago	1010	10,1
27-ago	1041	10,41
28-ago	1059	10,59
29-ago	1071	10,71
30-ago	1093	10,93
31-ago	1101	11,01

1-ago	1109	11,09
3-sep	1118	11,18
4-sep	1140	11,4
5-sep	1151	11,51
6-sep	1160	11,6
7-sep	1188	11,88
8-sep	1194	11,94
10-sep	1205	12,05
11-sep	1211	12,11
12-sep	1220	12,2
13-sep	1222	12,22
14-sep	1223	12,23
15-sep	1224	12,24

Tabla 13. Lecturas deformímetro modelo a escala

El asentamiento producido por el estrato de suelo con ayuda de los drenes verticales y una precarga fue de 12.24 mm.

Porcentaje de error:

Asentamiento teórico y experimental:

$$\%Error = \frac{1.6 - 1.22}{1.6} * 100\%$$

$$\%Error = 0.23\%$$

Se obtuvo un porcentaje de error de 0.23% del asentamiento producido en el ensayo de consolidación de laboratorio y el asentamiento producido en el modelo a escala.

9 COMPARACION DE RESULTADOS

A continuación, se presenta una comparación de los resultados obtenidos en el modelo a escala y el ensayo de consolidación realizado en el laboratorio al suelo, con el fin de determinar la efectividad de los drenes verticales en la estabilización de suelos blandos.

ASENTAMIENTOS OBTENIDOS	
POR MEDIO DEL ENSAYO DE CONSOLIDACION	POR MEDIO DEL MODELO A ESCALA
Muestra de suelo: <u>Limo</u> <u>baja plasticidad (ML)</u>	Muestra de suelo: <u>Limo</u> <u>baja plasticidad (ML)</u>
Altura de la muestra <u>H=2.0 cm</u>	Altura de la muestra <u>H=77 cm</u>
Para el ensayo de consolidación se aplicaron las siguientes cargas, según la norma INVIAS: <u>0.5 kg/cm²</u> <u>1 kg/cm²</u> <u>2 kg/cm²</u> <u>4 kg/cm²</u>	Se creó un modelo a escala para simular los asentamientos reales. Con una carga determinada de: <u>250kg</u>
Cada carga tuvo un tiempo de: <u>24 Horas*4= 96 horas (4 días tiempo total fase de carga)</u>	Tiempo aplicación de la carga: <u>50 Días</u>
Esfuerzo de pre consolidación determinada: <u>1 kg/cm²</u>	Superficie donde se aplica la carga: <u>L: 0,50 m</u> <u>B: 0,50 m</u>
Asentamiento por consolidación primaria: <u>1.6 cm</u>	Asentamiento por método de drenes verticales: <u>1.22 cm</u>

Tabla 14. Cuadro comparativo resultados modelo a escala y ensayo de consolidación

10 MODELACIÓN DE DRENES VERTICALES EMPLEANDO SOFTWARE SETTLE

10.1 TEORIA DEL SOFTWARE

SETTLE 3D

Settle 3D es un programa tridimensional para el análisis de la consolidación vertical y asentamientos en cimientos, terraplenes y cargas superficiales. El programa combina simplicidad del análisis unidimensional con las capacidades de potencia y visualización de programas tridimensionales más sofisticados.

Puede crear rápidamente perfiles de suelo complejos y condiciones de carga y ver los resultados en 3 dimensiones. El modelado puede ser escalonado y el análisis de consolidación dependiente del tiempo puede realizarse incluyendo la consolidación primaria y secundaria (fluencia) a intervalos de tiempo definidos por el usuario. Se puede modelar una variedad de tipos de materiales lineales y no lineales. La elevación del agua subterránea puede ser puesta en escena y las condiciones horizontales y verticales del drenaje se pueden especificar.

El asentamiento, el esfuerzo y la presión de poro se calculan a lo largo del volumen tridimensional, y los resultados pueden contornearse a lo largo de cualquier plano horizontal o vertical, o trazarse a lo largo de cualquier línea. La deformación del asentamiento se puede ver en 3 dimensiones, ampliada por un factor de escala definido por el usuario. La presentación de datos es muy interactiva, y los contornos y gráficos se actualizan en tiempo real a medida que cambia el tipo de datos, la profundidad o la ubicación. Los resultados se pueden exportar a Excel con un solo clic del ratón. [12]

10.2 MODELACIONES

A continuación, se presenta la modelación y construcción del modelo empleando el software SETTLE 3D de RockScience.

Figura 14. Datos de carga rectangular 0,5mx0,5m

Edit Load

Rectangle Properties

Length (m): 0.5

Width (m): 0.5

Angle from X axis: 0

Load Properties

Load Type: Rigid

☒ Pressure (t/m²): 10 ☐ Variable: Define...

☐ Force (t): 1 Mx (t.m): 0 My (t.m): 0

Depth (m): 0

Installation stage: Stage 1

☐ Advanced staging

Display Properties OK Cancel

Fuente. Los autores.

Figura 15. Se agregan el estrato de triturado de 0,5m y sus propiedades

Soil Properties

Name: Gravas Color: Hatch:

Unit Weight (t/m³): 1.35 Sat. Unit Wt. (t/m³): 1.835 Poisson Ratio: 0.2

☒ Immediate Settlement

Es (t/m²): 9687.3 Esur (t/m²): 1019.7

☐ Primary Consolidation

Material Type: Non-Linear

Cc: 0.3 Cr: 0.1 e0: 1.1 Pc (t/m²): 10.2 OCR: 1 OCM (t/m²): 0

Time-dependent Consolidation Analysis:

☒ Cv (m²/y): 1 ☐ K (m/y): 0.01 B-bar: 1 Cvr (m²/y): 1 Kr (m/y): 0.01

☐ Secondary Consolidation

Method: Standard

Ca: 0.03 Car: 0.03

☐ Properties vary by depth ☐ Strain based Cc, Cr and Ca Layer Modulus... Wick Drains...

☐ Show only used properties OK Cancel

Fuente. Los autores.

Figura 16. Se agrega el estrato de suelo limoso de 0,77m y sus propiedades

Soil Properties

☒ Limo
 ☐ Arena
 ☐ Gravas
 ☐ Soil Property 4
 ☐ Soil Property 5
 ☐ Soil Property 6

Name: Color: Hatch:

Unit Weight (t/m³):
 Sat. Unit Wt. (t/m³):
 Poisson Ratio:

☐ Immediate Settlement

Es (t/m²):
 Esur (t/m²):

☒ Primary Consolidation

Material Type:

Cc:
 Cr:
 e0:
 Pc (t/m²):
 OCR: ☒
 OCM (t/m²):

Time-dependent Consolidation Analysis:

☒ Cv (m²/y):
 Cv1 (m²/y):
 K (m/y):
 K1 (m/y):
 B-bar:
 Variable K...

☐ Secondary Consolidation

Method:

Ca:
 Car:

☐ Properties vary by depth
 ☐ Strain based Cc, Cr and Ca

☐ Show only used properties

Fuente. Los autores.

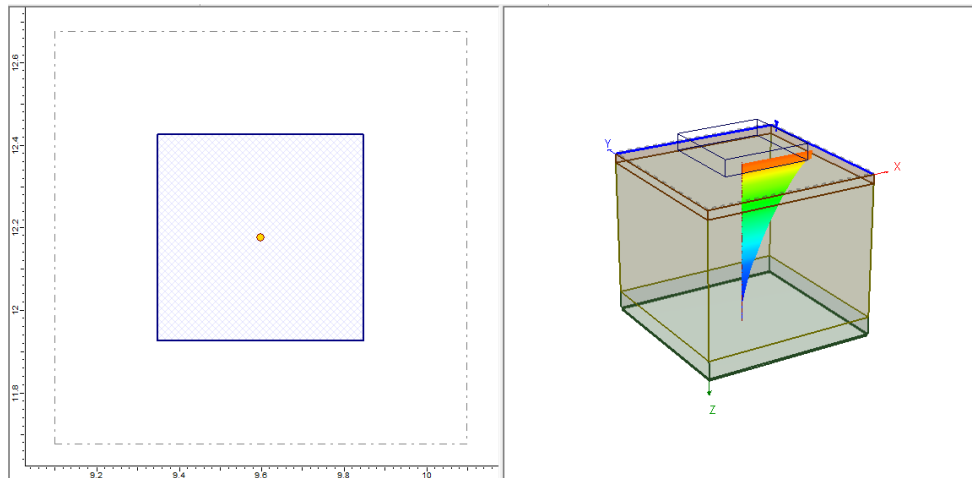
Figura 17. Se agrega el estrato de suelo arenoso de 0,10m y sus propiedades

The 'Soil Properties' dialog box is shown with the 'Arena' layer selected. The properties are as follows:

- Name:** Arena
- Color:** Green
- Hatch:** Black
- Unit Weight (t/m^3):** 1.835
- Sat. Unit Wt. (t/m^3):** 1.835
- Poisson Ratio:** 0.2
- Immediate Settlement:** ☒
 - E_s (t/m^2):** 5353.51
 - E_{sur} (t/m^2):** 1019.7
- Primary Consolidation:** ☐
 - Material Type:** Non-Linear
 - C_c :** 0.3
 - C_r :** 0.1
 - e_0 :** 1.1
 - P_c (t/m^2):** 10.2
 - OCR :** 1
 - OCM (t/m^2):** 0
- Time-dependent Consolidation Analysis:**
 - C_v (m^2/y):** 1
 - K (m/y):** 0.01
 - B -bar:** 1
 - C_{vr} (m^2/y):** 1
 - K_r (m/y):** 0.01
 - Variable K :** [Button]
- Secondary Consolidation:** ☐
 - Method:** Standard
 - C_a :** 0.03
 - C_{ar} :** 0.03
- Properties vary by depth:** ☐ **Strain based C_c , C_r and C_a :** ☐ **Layer Modulus...** **Wick Drains...**
- Show only used properties:** ☐
- Buttons:** OK, Cancel

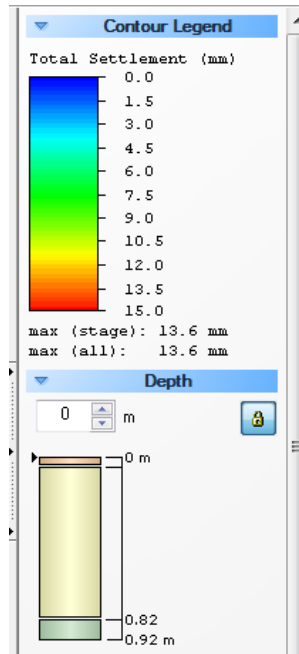
Fuente. Los autores

Figura 18. Modelo con su respectiva carga y tres estratos de suelo



Fuente. Los autores.

Figura 19. Asentamiento máximo por medio del software 13,6mm= 1,36 cm.



Fuente. Los autores.

El asentamiento obtenido mediante la modelación del estrato de suelo en el software es de 1.36 cm, comparado con los asentamientos obtenidos anteriormente (modelo a escala $S=1,22$ cm y ensayo de consolidación $S=1,6$ cm) evidencia que el método es eficiente para ser utilizado en la estabilización de suelos blandos.

11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalizado los datos del presente trabajo de grado se concluyó que:

- ✓ Los asentamientos teóricos determinados con las ecuaciones clásicas de comportamiento de suelo son muy similares a los asentamientos resultantes del modelo a escala y verificados con los resultantes del uso del software, lo que evidencia que efectivamente el suelo se comporta con las mismas propiedades.
- ✓ Se evaluó el comportamiento y efectividad del método de mejoramiento de suelo conocido como drenes verticales, empleando un modelo a escala y

realizando los respectivos ensayos de laboratorio, con un porcentaje de error de 0.23% calculado de los asentamientos obtenidos del ensayo de consolidación en el laboratorio y el modelo a escala.

- ✓ Se obtuvo una reducción del 27% del tiempo de consolidación del suelo con la utilización de la técnica de drenes verticales, comprobando así su efectividad para ser utilizada en la estabilización de suelos blandos.
- ✓ Se realizaron ensayos de laboratorio a la muestra de suelo de comportamiento blando cohesivo, donde por medio de esta se clasifico y se determinó la magnitud de los asentamientos mediante el ensayo de consolidación.
- ✓ Los drenes verticales aceleraron la expulsión de agua; esto se evidencia en el modelo a escala, la placa de concreto permite observar este comportamiento, ayudante a la expulsión del volumen de vacíos de la muestra total.

Recomendaciones:

- ✓ se recomienda realizar el montaje del modelo a escala en un lugar aislado y cubierto, en el cual las condiciones climáticas no afecten las lecturas de los deformímetros.
- ✓ Para la toma de las lecturas de los asentamientos, se recomienda que el suelo se encuentre en condiciones saturadas, con el objetivo de tener una mejor evaluación de efectividad del método en las peores condiciones.

12 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Mexico, «www.menard.com.mx,» 10 enero 2013. [En línea].
- [2] S. I. S.A.S, «www.suelosingenieria.com,» 21 octubre 2013. [En línea].
- [3] J. A. J. Salas, Geotecnia y cimientos III cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia, Madrid, 1980.
- [4] J. P. Valcarcel, *Mejora Y Consolidación De Terrenos*, La Coruña.
- [5] C. F. Muñoz, «Mejora del terreno mediante precarga,» *Obras publicas*, p. 210 a 215, 2011.
- [6] «fceia,» 2012. [En línea]. Available:
https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Metodos_reduccion_tiempo_cons.pdf.
- [7] «soletanche bachy cimas,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.soletanche-bachy.com.co/web/detalle-soluciones/detalle/drenes-verticales-491>.
- [8] J. L. Aquesolo y G. S. Diaz, «Los drenes prefabricados para la aceleracion de la consolidacion de suelos arcillosos,» *Obras Publicas*, vol. 1, p. 255 a 264, 1985.
- [9] Z. S. X. Y. y K. W. , «The characteristics of electric vertical drains in electro-osmotic dewatering,» de *Drying Technology An international Journal*, 2017, p. 263 a 271.
- [10] j. Badillo, MECÁNICA DE SUELOS, FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA DE SUELOS, mexico: limusa, 2005.
- [11] B. M. Das, Fundamentos De Ingeniería Geotécnica, Mexico: Cengage learning, 2015.
- [12] c. r. inc, «rocscience,» copyright, 2018. [En línea]. Available:
https://www.rocscience.com/help/settle/#t=Settle3D%2FGetting_Started.htm.
- [13] H. D. C. Alfonso Rico, La Ingeniería De Suelos en las vias terretres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas, Mexico: Noriega Editores, 2001.
- [14] K. Terzaghi y Ralph B. Peck, Mecanica de suelos en la ingenieria practica, El ateneo S.A., 1978.
- [15] «Suelos Ingenieria S.A.S,» 2009. [En línea]. Available:
<http://www.suelosingenieria.com/index.php/actividades/construccion/mejoramiento-s-de-suelos/wick-drains>.
- [16] B. M. DAS, Fundamentos de Ingenieria Geotecnica, thomsom learning, 2017.

13 ANEXOS

13.1 ANEXO A: ENSAYO DE GRANULOMETRIA

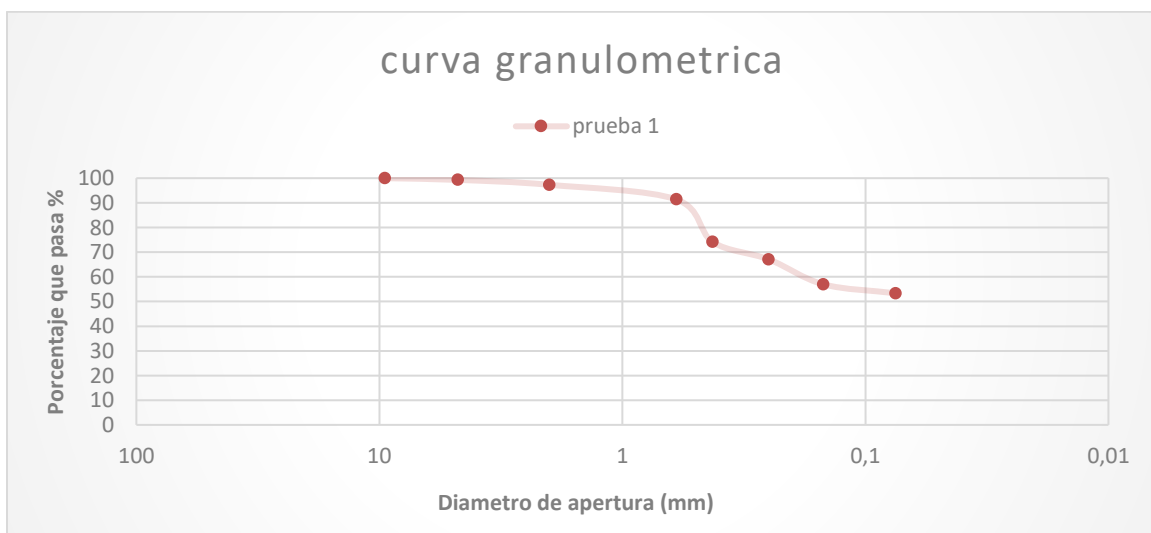
Anexo A-1

Análisis granulométrico por tamizado

Muestra 1:

TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
3/8"	0	0,000	100
N°4	8,57	0,702	99,298
10	24,21	1,984	97,314
20	72,4	5,933	91,380
40	210,53	17,254	74,126
60	85,71	7,024	67,102
100	123,48	10,120	56,982
200	44,42	3,640	53,342
PASA 200	650,12	53,280	0,062

%GRAVAS	0,702
%ARENAS	46,018
%FINOS	53,280

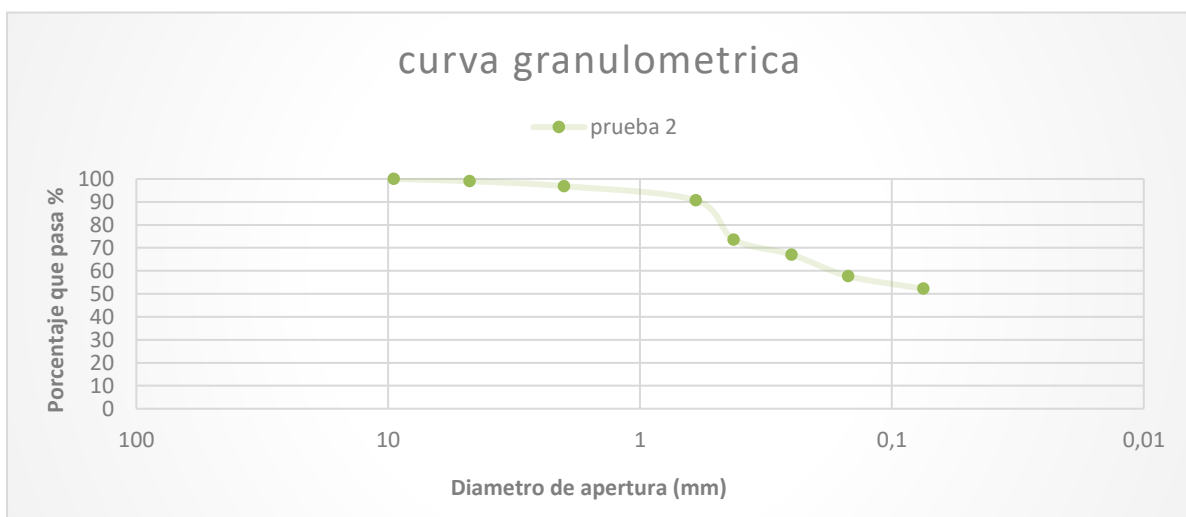


Anexo A-2

Análisis granulométrico por tamizado
Muestra 2:

TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
3/8"	0	0,000	100
N°4	11,76	0,980	99,020
10	25,95	2,163	96,858
20	73,88	6,157	90,701
40	205,2	17,100	73,601
60	78,54	6,545	67,056
100	112,12	9,343	57,713
200	66,2	5,517	52,196
PASA 200	626,35	52,196	0,000

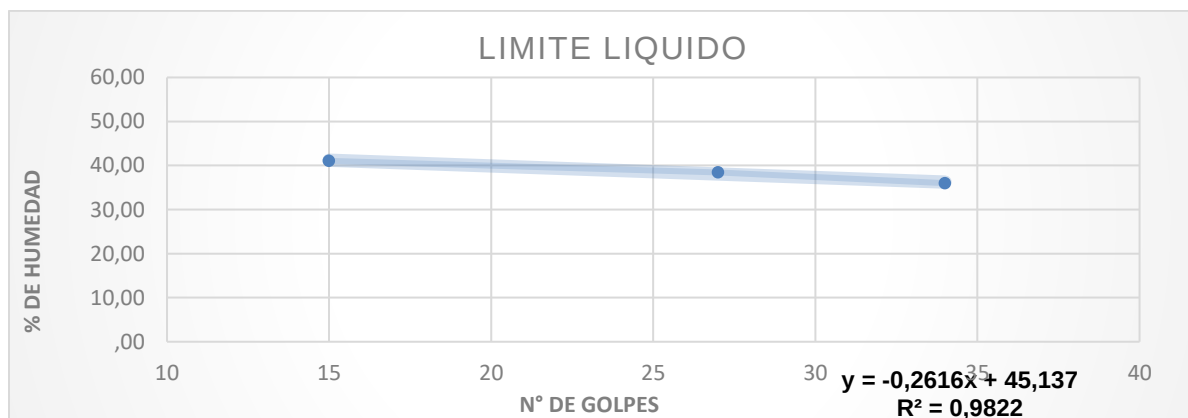
%GRAVAS	0,980
%ARENAS	46,824
%FINOS	52,196



13.2 ANEXO B: ENSAYOS LIMITES

Muestra 1:

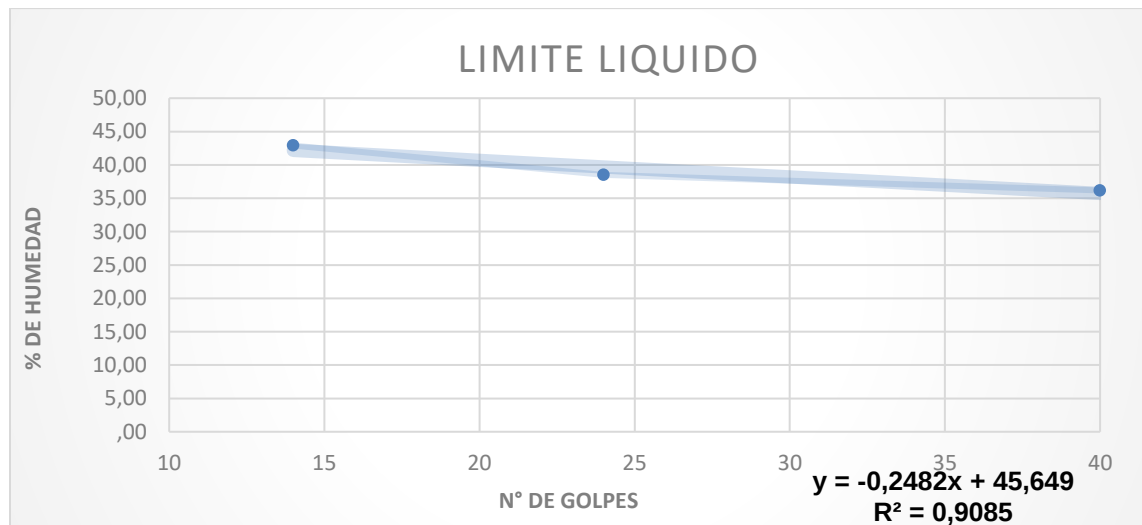
Capsula n°	# Golpes	Peso capsula + suelo húmedo (gr)	Peso capsula + suelo seco (gr)	Peso Agua (gr)	Peso Capsula (gr)	Peso Seco (gr)	Humedad
Limite Liquido (LL)							
137	15	21,91	18,00	3,91	8,48	9,5	41,1
888	27	18,03	14,93	3,1	6,87	8,1	38,5
162	34	19,51	16,18	3,33	6,93	9,3	36,0
Limite Plastico (LP)							
58	25	12,22	11,08	1,14	6,94	4,1	27,5
90	24	14,06	13,02	1,04	8,83	4,2	24,8



Limite liquido	38,6
Limite plastico	26,2
Índice de plasticidad	12

Muestra 2:

Capsula n°	# Golpes	Peso capsula + suelo húmedo (gr)	Peso capsula + suelo seco (gr)	Peso Agua (gr)	Peso Capsula (gr)	Peso Seco (gr)	Humedad
Limite Liquido (LL)							
62	14	20,8	16,7	4,14	7,02	9,7	42,9
1400	24	20,9	17,3	3,62	7,89	9,4	38,5
13	40	15,9	13,4	2,46	6,64	6,8	36,2
Limite Plastico (LP)							
64	25	9,38	8,8	0,56	6,83	2,0	28,1
170	24	10,5	9,8	0,67	7,05	2,7	24,5

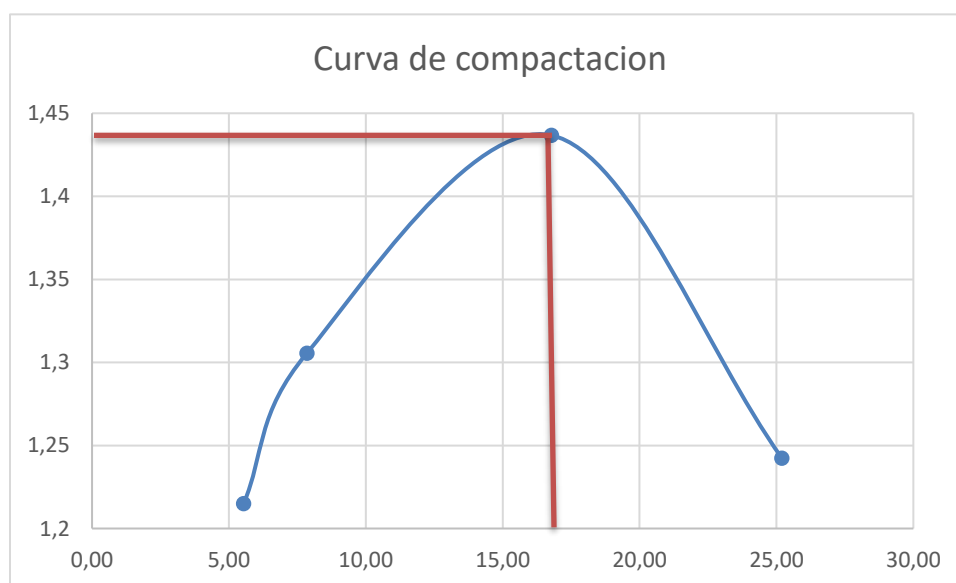


Limite liquido	39,4
Limite plastico	26,3
Índice de plasticidad	13

13.3 ANEXO C : ENSAYO ESTANDAR DE COMPACTACION

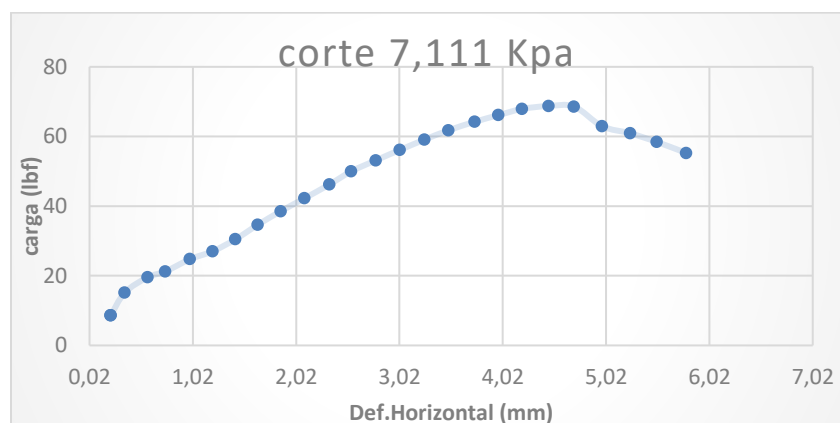
masa inicial	3000	Gr		altura molde	11,7	Cm
Peso molde vacío	2029	gr		diámetro	11,2	cm
Vol. molde	1152,69					
	% W	4%	8%	12%	16%	22%
	1 PUNTO	2 PUNTO	3 PUNTO	4 PUNTO	5 PUNTO	6 PUNTO
Peso molde + suelo húmedo	3507	3652	3712	3805	3963	3822
Peso Capsula vacía	6,4	8,9	6,7	7	7	6,9
Peso capsula + Suelo húmedo	40,9	48,2	48,7	40,8	48,2	38,8
Peso capsula + Suelo seco	39,09	45,34	44,47	36,61	42,28	32,38
Peso suelo seco	32,69	36,44	37,77	29,61	35,28	25,48
Peso suelo Húmedo	34,5	39,3	42	33,8	41,2	31,9
Humedad	5,54	7,85	11,20	14,15	16,78	25,20
Peso suelo húmedo en molde	1478	1623	1683	1776	1934	1793
Densidad húmeda	1,282220292	1,40801322	1,46006546	1,54074644	1,67781735	1,55549458
Densidad seca	1,214950184	1,30554711	1,31301601	1,34974858	1,43673292	1,2424452

densidad seca máxima	1,436
humedad optima	16,78

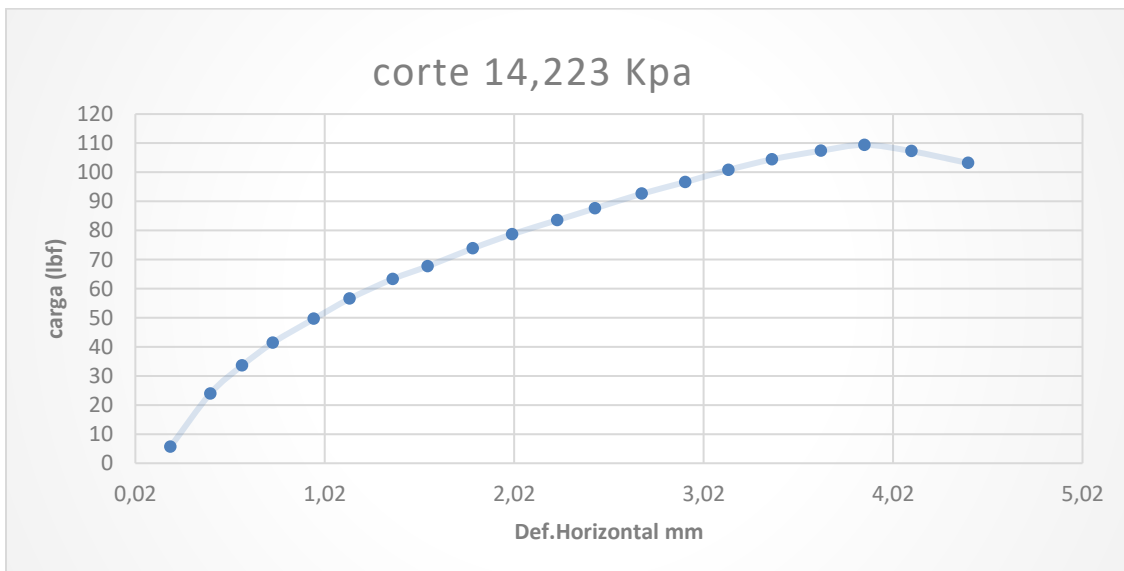


13.4 ANEXO D: ENSAYO CORTE DIRECTO

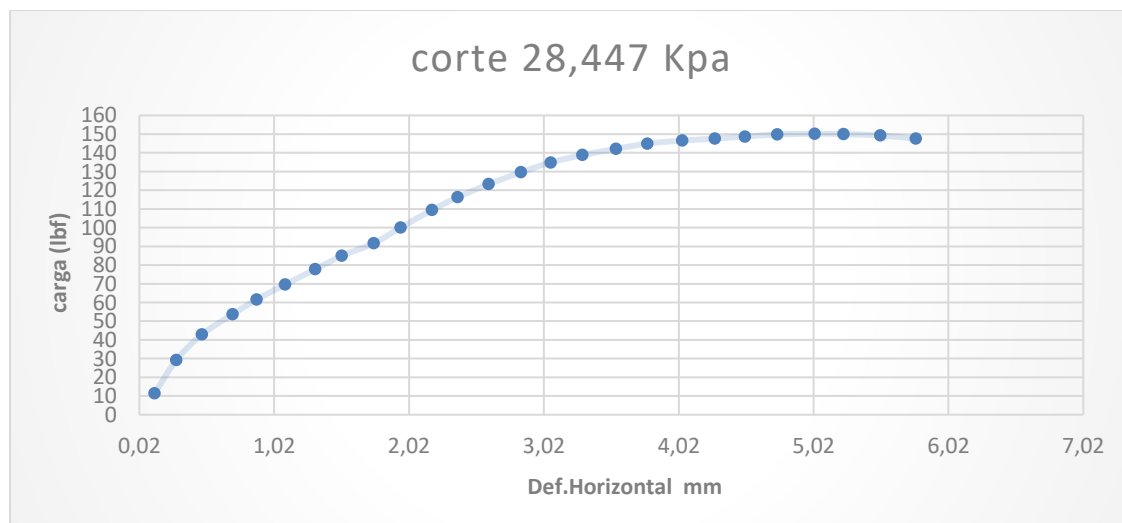
0,5 kg/cm2		7,111 lbf/pul2			
PRIMER PUNTO					
Carga (N)	Def.Horizontal (mm)	Def.Vertical (mm)	carga (Kn)	carga (lbf)	t (esfuerzo cortante) lbf/pulg2
38,5	0,225	0,016	0,0385	8,65514265	0,489821316
38,5	0,227	0,016	0,0385	8,65514265	0,489821316
67,6	0,362	0,027	0,0676	15,19708164	0,860049895
87,1	0,583	0,027	0,0871	19,58085519	1,108141211
94,4	0,753	0,041	0,0944	21,22196016	1,201016421
110,2	0,994	0,081	0,1102	24,77394078	1,402034
120,3	1,213	0,088	0,1203	27,04451067	1,530532579
135,6	1,433	0,089	0,1356	30,48408684	1,725188842
154,1	1,649	0,09	0,1541	34,64305149	1,960557526
171,5	1,872	0,09	0,1715	38,55472635	2,181931316
187,9	2,101	0,09	0,1879	42,24159231	2,390582474
205,6	2,342	0,09	0,2056	46,22070984	2,615773053
222,4	2,554	0,09	0,2224	49,99749936	2,829513263
236,4	2,791	0,09	0,2364	53,14482396	3,007630105
249,8	3,026	0,09	0,2498	56,15726322	3,178113368
262,9	3,263	0,091	0,2629	59,10225981	3,344779842
274,9	3,497	0,091	0,2749	61,79996661	3,497451421
285,7	3,75	0,091	0,2857	64,22790273	3,634855842
294,2	3,98	0,402	0,2942	66,13877838	3,742998211
302,1	4,207	0,372	0,3021	67,91476869	3,843507
305,8	4,465	0,358	0,3058	68,74656162	3,890580737
305,1	4,711	0,31	0,3051	68,58919539	3,881674895
280	4,981	0,282	0,28	62,946492	3,562336842
270,9	5,254	0,204	0,2709	60,90073101	3,446560895
259,9	5,512	0,181	0,2599	58,42783311	3,306611947
245,8	5,796	0,066	0,2458	55,25802762	3,127222842
esfuerzo normal(σ)		7,111	Kpa		



1kg/cm2		14,223 lbf/pul2			
SEGUNDO PUNTO					
Carga (N)	Def.Horizontal (mm)	Def.Vertical	carga (kn)	carga (lbf)	t (esfuerzo cortante)
25,1	0,205	0	0,0251	5,6447139	0,319451834
106,5	0,416	0,011	0,1065	23,9506785	1,355443039
149,4	0,584	0,026	0,1494	33,5984166	1,901438404
184,2	0,746	0,376	0,1842	41,4245538	2,344343735
220,7	0,963	0,342	0,2207	49,6330023	2,808885246
251,5	1,152	0,029	0,2515	56,5595835	3,200881919
281,6	1,379	0,029	0,2816	63,3287424	3,583969576
301,1	1,564	0,029	0,3011	67,7140779	3,832149287
328,5	1,802	0,029	0,3285	73,8760365	4,180873599
350	2,01	0,03	0,35	78,71115	4,45450764
371,4	2,247	0,04	0,3714	83,5237746	4,726868964
389,5	2,447	0,041	0,3895	87,5942655	4,957230645
411,9	2,694	0,044	0,4119	92,6317791	5,242319134
429,7	2,924	0,051	0,4297	96,6348033	5,468862666
448,4	3,152	0,052	0,4484	100,8402276	5,706860645
464,5	3,382	0,054	0,4645	104,4609405	5,911767997
477,6	3,64	0,055	0,4776	107,4069864	6,078493854
486,6	3,869	0,055	0,4866	109,4309874	6,193038336
476,9	4,117	0,055	0,4769	107,2495641	6,069584839
458,8	4,416	0,055	0,4588	103,1790732	5,839223158
esfuerzo normal(σ)		14,223	Kpa		

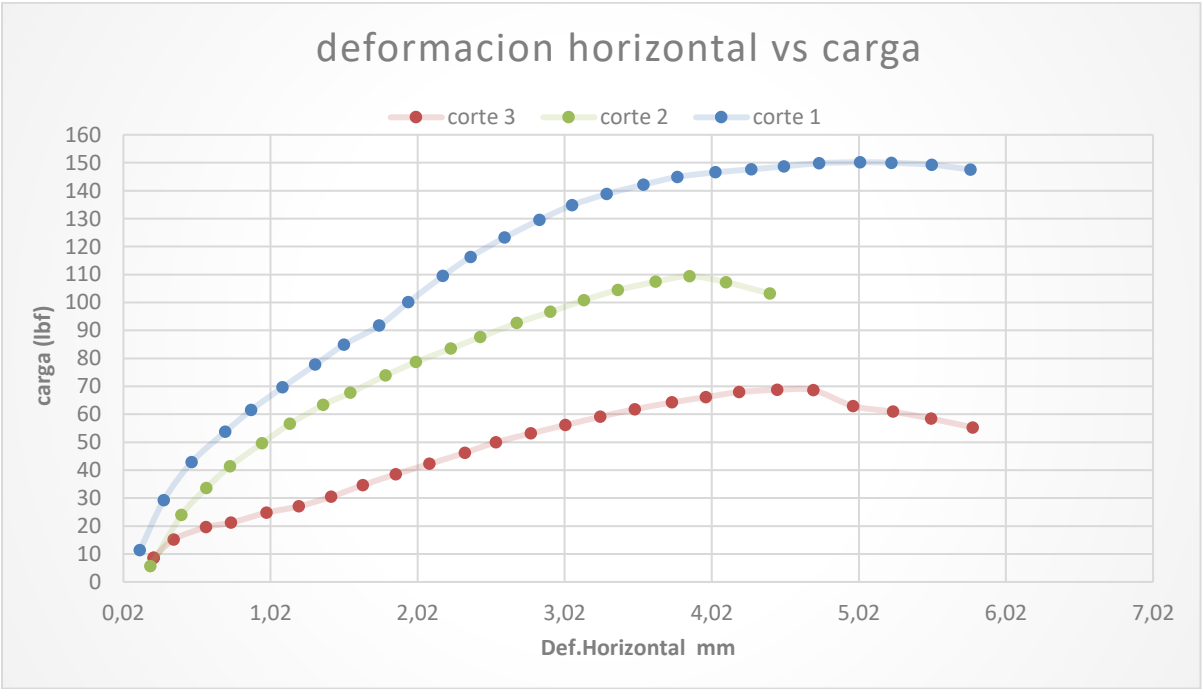


2kg/cm2		28,447 lbf/pulg2			
TERCER PUNTO					
Carga N	Def.Horizontal (mm)	Def.Vertical	carga (kn)	carga (lbf)	t (esfuerzo cortante)
50,8	0,133	0,016	0,0508	11,42029212	0,646309684
130,2	0,295	0,045	0,1302	29,27011878	1,656486632
190,7	0,485	0,069	0,1907	42,87105723	2,426205842
238,8	0,712	0,078	0,2388	53,68436532	3,038164421
273,8	0,89	0,083	0,2738	61,55267682	3,483456526
309,8	1,103	0,084	0,3098	69,64579722	3,941471263
345,9	1,325	0,093	0,3459	77,76139851	4,400758263
377,8	1,521	0,097	0,3778	84,93280242	4,806610211
407,9	1,759	0,108	0,4079	91,69955031	5,189561421
445,1	1,958	0,108	0,4451	100,0624414	5,662843316
486,9	2,192	0,11	0,4869	109,4594534	6,194649316
517,4	2,381	0,111	0,5174	116,3161249	6,582689579
548,2	2,612	0,112	0,5482	123,240239	6,974546632
576,4	2,85	0,116	0,5764	129,57985	7,333324842
599,8	3,071	0,12	0,5998	134,8403782	7,631034421
617,5	3,307	0,128	0,6175	138,8194958	7,856225
632,3	3,556	0,134	0,6323	142,1466675	8,044519947
644,7	3,788	0,137	0,6447	144,9342978	8,202280579
652	4,046	0,145	0,652	146,5754028	8,295155789
656,7	4,29	0,146	0,6567	147,6320046	8,354952158
661,4	4,511	0,146	0,6614	148,6886065	8,414748526
666,4	4,751	0,146	0,6664	149,812651	8,478361684
668,1	5,03	0,161	0,6681	150,1948261	8,499990158
667,1	5,242	0,161	0,6671	149,9700172	8,487267526
664,1	5,516	0,161	0,6641	149,2955905	8,449099632
656,4	5,78	0,161	0,6564	147,564562	8,351135368
esfuerzo normal(σ)		28,447	Kpa		



esfuerzo normal(σ') (lbf/pulg2)	τ (esfuerzo cortante) (lbf/pulg2)
7,111	3,890580737
14,223	6,193038336
28,447	8,499990158

Angulo de fricción	11,78	grados
Cohesión	2,7	Kpa



13.5 ANEXO E: ENSAYO DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Para el ensayo de consolidación se realizó la carga periódicamente, se aplicaron cargas cada 0.5, 1.0, 2.0 y 4.0 kg/cm². A continuación, las tablas de lecturas del dial para cada carga y su respectiva curva de consolidación.

Tiempo (min)	Deformación (pulgadas)	Deformación (mm)
0	0	0
0,1	0,00001	0,000254
0,25	0,000025	0,000635
0,5	0,00005	0,00127
1	0,0001	0,00254
2	0,0002	0,00508
4	0,0004	0,01016
8	0,0008	0,02032
15	0,0015	0,0381
30	0,003	0,0762
60	0,006	0,1524
120	0,012	0,3048
220	0,022	0,5588
460	0,046	1,1684
1400	0,14	3,556

Tabla 15. Lecturas del dial para carga 0,5 kg/cm².

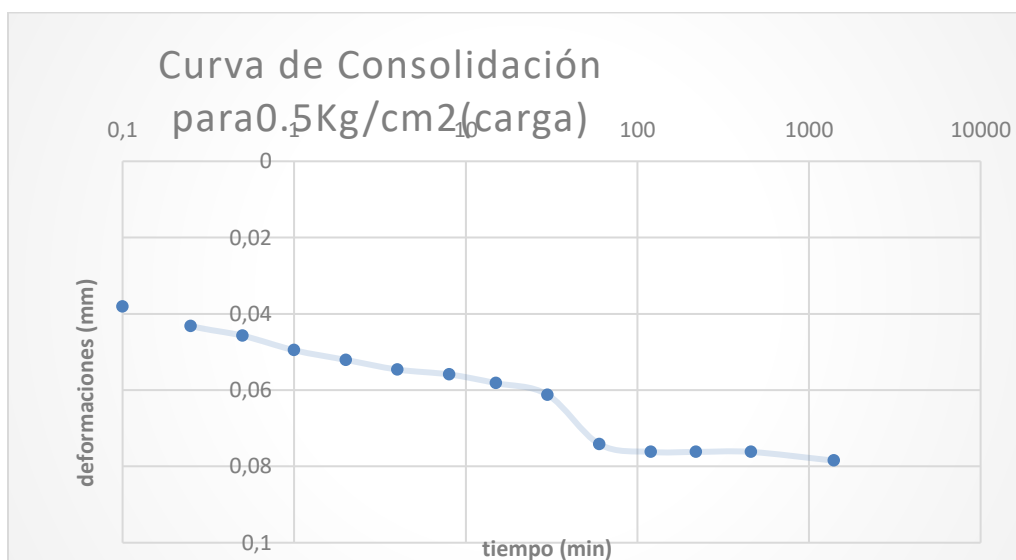


Figura 20. Curva de consolidación para carga 0.5 kg/cm²

Tiempo (min)	Deformación (pulgadas)	Deformación (mm)
0	0	0
0,1	0,00001	0,000254
0,25	0,000025	0,000635
0,5	0,00005	0,00127
1	0,0001	0,00254
2	0,0002	0,00508
4	0,0004	0,01016
8	0,0008	0,02032
15	0,0015	0,0381
30	0,003	0,0762
60	0,006	0,1524
120	0,012	0,3048
220	0,022	0,5588
460	0,046	1,1684
1400	0,14	3,556

Tabla 16. Lecturas diales para carga 1.0 kg/cm²

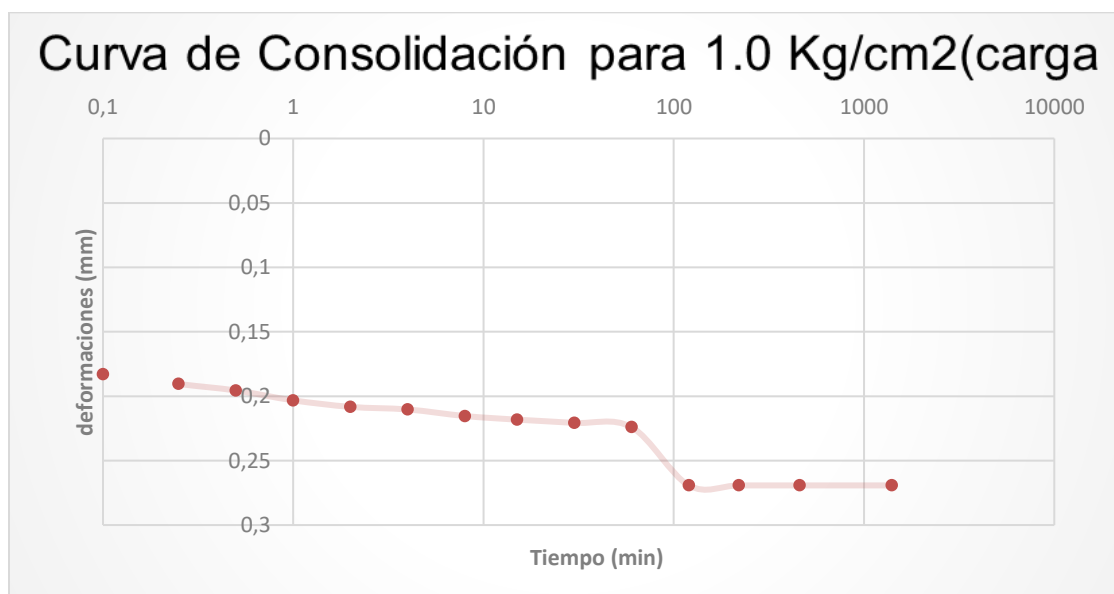


Figura 21. Curva consolidación para carga 1.0 kg/cm².

Fuente: los autores

Tiempo (min)	Deformación (pulgadas)	Deformación (mm)
0	0,0106	0,26924
0,1	0,01948	0,494792
0,25	0,0197	0,50038
0,5	0,0199	0,50546
1	0,02023	0,513842
2	0,0206	0,52324
4	0,02082	0,528828
8	0,02108	0,535432
15	0,02121	0,538734
30	0,02152	0,546608
60	0,02158	0,548132
120	0,0219	0,55626
220	0,02212	0,561848
460	0,0222	0,56388
1400	0,02241	0,569214

Tabla 17. Lecturas diales para carga 2.0 kg/cm²



Figura 22. Curva consolidación para carga 2.0 kg/cm².
Fuente: los autores

Tiempo (min)	Deformación (pulgadas)	Deformación (mm)
0	0,02241	0,569214
0,1	0,0273	0,69342
0,25	0,0281	0,71374
0,5	0,0286	0,72644
1	0,0291	0,73914
2	0,02945	0,74803
4	0,03	0,762
8	0,03025	0,76835
15	0,0304	0,77216
30	0,03061	0,777494
60	0,0309	0,78486
120	0,03102	0,787908
220	0,0311	0,78994
460	0,0312	0,79248
1400	0,0315	0,8001

Tabla 18. Lecturas diales para carga 4.0 kg/cm²



Figura 23. Curva consolidación para carga 4.0 kg/cm²

FASE DE DESCARGA

Se realizó la descarga para cada 2.0, 1.0, 0.5 y 0.0 kg/cm². A continuación, las tablas de lecturas diales y su respectiva curva de consolidación.

2.0 Kg/cm ² (descarga)	
Tiempo (min)	Defor (10 ⁻⁴ pulg)
t	
0	315
0,1	311
0,25	310
0,5	309,9
1	309
2	308
4	307,9
8	307,1
15	306,1
30	306,1
96	306
120	305,9
220	305,9
440	305,9
1400	305,9

Tabla 19. Lecturas diales para descarga 2.0 kg/cm².

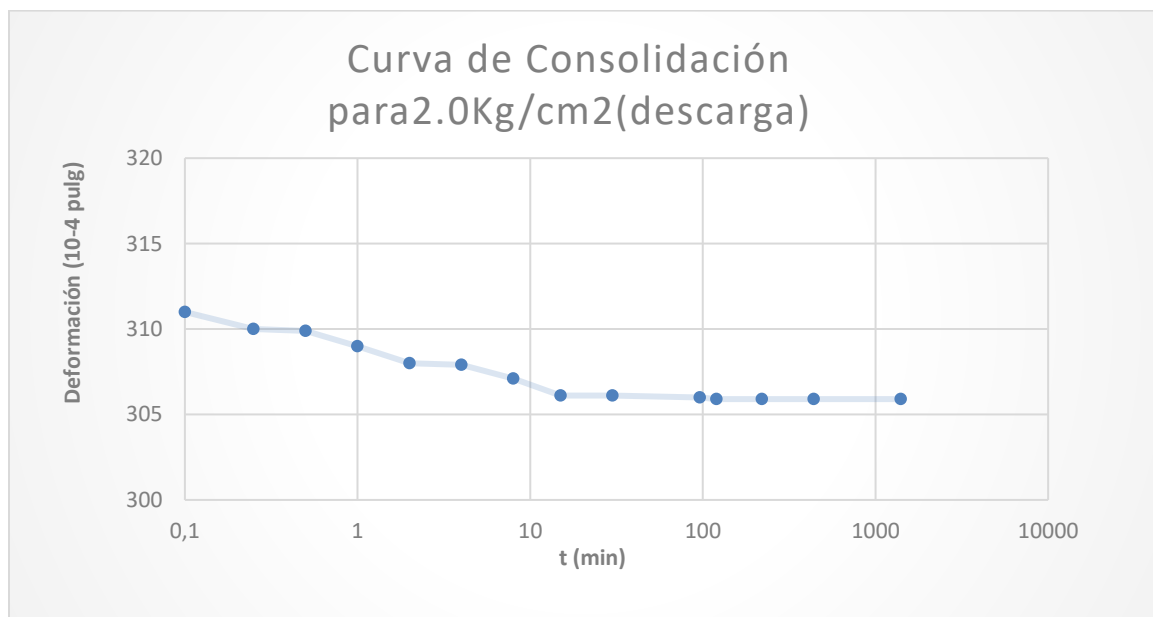


Figura 24. Curva de consolidación para descarga 2.0 kg/cm².

Fuente: los autores

1.0 Kg/cm ² (descarga)	
Tiempo (min)	Defor (10 ⁻⁴ pulg)
t	
0	305,9
0,1	281,9
0,25	281,1
0,5	280,1
1	280
2	279,9
4	278,9
8	278
15	277,1
30	277,1
60	277
120	277
220	277
440	276,9
1400	276

Tabla 20. Lecturas diales para descarga 1.0 kg/cm²

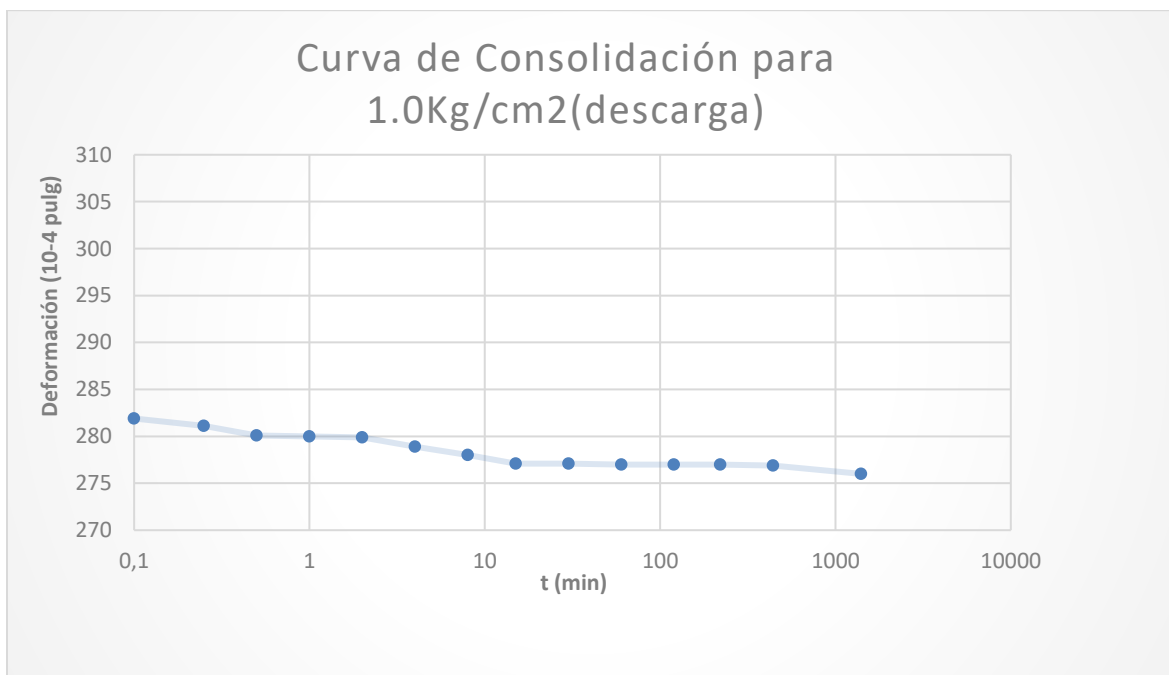


Figura 25. Curva consolidación para descarga 1.0 kg/cm²

Fuente: los autores

0.5 Kg/cm ² (descarga)	
Tiempo (min)	Defor (10 ⁻⁴ pulg)
t	
0	276
0,1	259
0,25	258
0,5	252
1	251
2	250,5
4	250,5
8	250
15	249,1
30	248,9
60	248,9
120	248,9
220	248,9
440	248,9
1440	248,9

Tabla 21. Lecturas diales para descarga 0.5 kg/cm²

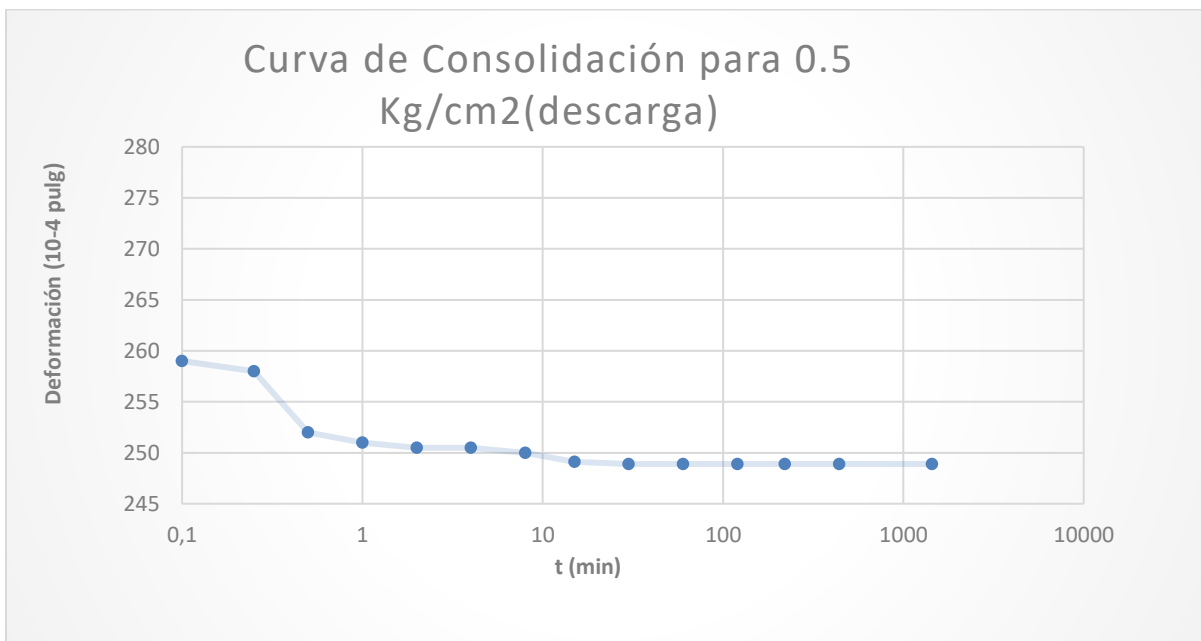


Figura 26. Curva de consolidación para descarga 0.5 kg/cm².

Fuente: los autores

0.0 Kg/cm ² (descarga)	
tiempo (min)	Defor (10 ⁻⁴ pulg)
t	
0	248,9
0,1	220
0,25	116
0,5	110
1	109
2	108
4	92
8	81
15	62,1
30	61,1
95	60
120	60
220	60
440	60
1400	60

Tabla 22. Lecturas diales para descarga 0.0 kg/cm²

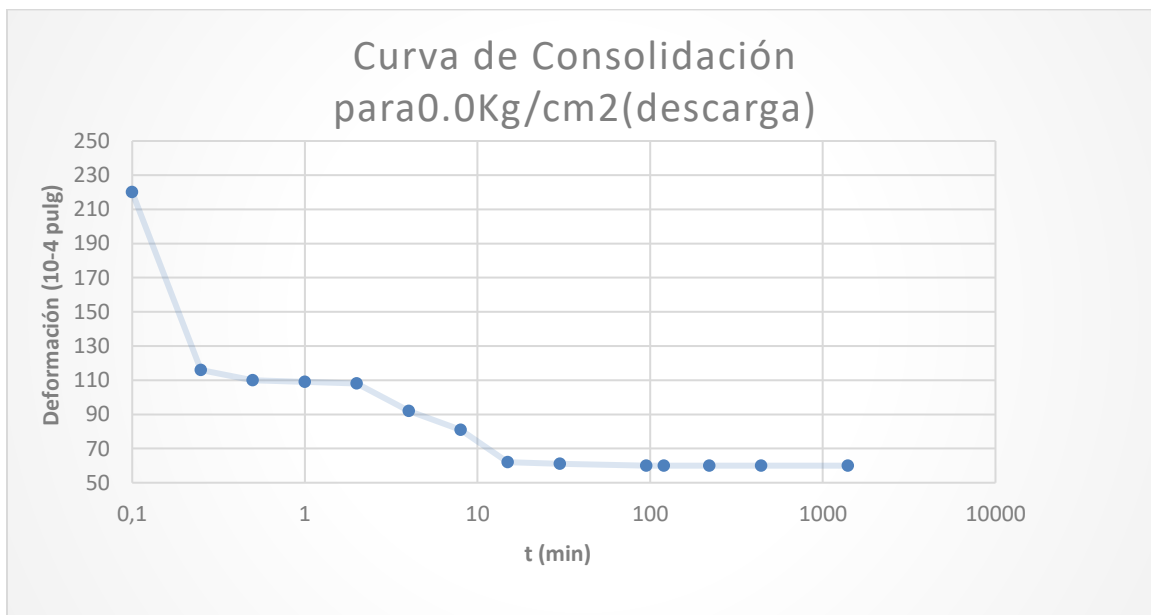


Figura 27. Curva de consolidación para descarga 0.0 kg/cm².

Fuente: los autores