

**ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS EMPLEANDO EL MÉTODO
DE COLUMNAS DE GRAVA**

Darwin Alexander Bautista Prada

Eric Danilo Mayorga Murillo

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2018

**ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS EMPLEANDO EL MÉTODO
DE COLUMNAS DE GRAVA**

Darwin Alexander Bautista Prada

Eric Danilo Mayorga Murillo

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

INGENIERO CIVIL

Director del proyecto
MSc. Julián Andre Flores Galvis

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2018

Tabla de Contenidos

1.0.	INTRODUCCIÓN	3
1.1.	DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.2.	ANTECEDENTES.....	5
1.3.	JUSTIFICACIÓN	8
1.4.	OBJETIVOS	9
	General	9
	Específicos.....	9
3.	MARCO TEÓRICO	10
3.1.	Problemas generados por asentamiento.....	10
3.2.	Métodos de mejoramiento de suelos.....	10
3.3.	Mejoramiento de suelo por medio de columnas de grava	12
3.4.	Ventajas y desventajas de las columnas de grava	17
3.5.	Proceso constructivo de las columnas	18
3.6.	Implementación en Colombia	19
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	20
4.1.	Selección del suelo a ensayar.....	20
4.2.	Caracterización del suelo seleccionado.....	21
4.3.	Construcción del modelo y disposición de materiales.	23
4.4.	Preparación del estrato.....	24
5.	MODELACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA EMPLEANDO SOFTWARE PHASE 2.....	27
6.	MODELO ESTIMATIVO DE CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA	32
7.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	34
7.1.	Ensayo De Limite Líquido y Limite Plástico.....	35
7.2.	Ensayo De Proctor Estándar	35
7.3.	Ensayo De Consolidación En Laboratorio	35
7.4.	Ensayo De Corte Directo.....	36
7.5.	Ensayo De Densidad Relativa de la arena	36
7.6.	Ensayo De Permeabilidad	37
7.7.	Resultados experimentales de asentamiento.....	37
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	43

Lista de Figuras

Figura 1: Consecuencias de asentamientos diferenciales.	10
Figura 2: Consecuencias de asentamientos diferenciales.	10
Figura 3: Ámbito de aplicación de las técnicas de vibración profunda, según la granulometría del suelo.	12
Figura 4: Cimentación mediante columnas de grava.	13
Figura 6: Proceso constructivo de columnas de grava en puertos.....	14
Figura 7: Comparativa entre dragado profundo y columnas de grava.	15
Figura 8: Proceso constructivo de vibro-compactación.....	17
Figura 9: Método constructivo de las columnas de grava.	18
Figura 10: Método teórico constructivo de las columnas de grava.	18
Figura 11: Construcción de las columnas de grava en buenaventur.	19
Figura 12: Columnas de grava construidas en buenaventura.....	19
Figura 13: Muestra de suelo del anillo vial, Bucaramanga.....	21
Figura 14: Muestra de suelo del terreno K, universidad pontificia bolivariana, Bucaramanga.	21
Figura 15: Muestra de suelo de mina de arcilla en san gil.	21
Figura 16: Equipo de tamices para ensayo de granulometría.....	21
Figura 17: Maquina de Casagrande y vidrio para ensayo de limite líquido y plástico.	21
Figura 18: Preparación para el saturado de la muestra de suelo.	22
Figura 19: Ensayo de consolidación.	22
Figura 20: Probeta de suelo después de realizar en ensayo de cote directo.....	22
Figura 21: Ensayo de permeabilidad cabeza variable.	23
Figura 22: Modulo en lámina de acero.....	23
Figura 23: Módulo de acero, apoyado en cilindros de concreto.....	24
Figura 24: Aplicación del estrato de arena.....	24
Figura 25: Preparación de la arcilla para su compactación.	24
Figura 26: Proceso de compactación del estrato de arcilla y construcción de la columna de grava.	24
Figura 27: Ubicación de los deformímetros en el periodo de saturación.....	25
Figura 28: Modelo a escala evidenciando suelo natural y suelo tratado.....	25
Figura 29: Carga axial aplicada en el modelo.	25
Figura 30: Asentamiento en el suelo tratado.	25
Figura 31: Modelo de estratos de suelo en Phase 2.....	28
Figura 32: Malla para simulación del estrato en Phase 2.	28
Figura 33: Panel de propiedades del material (arcilla) en Phase 2.....	29
Figura 34: Panel de propiedades del material (Arena) en Phase 2.	30
Figura 35: Panel de propiedades del material (Grava) en Phase 2.	30
Figura 36: Desplazamiento vertical del estrato con columna de grava.	31
Figura 37: Desplazamiento vertical del estrato sin columna de grava.	31
Figura 38: Relación de vacíos vs Densidad. Ensayo consolidación de la arcilla.	36
Figura 39: Grafica de asentamiento experimental sin columna de grava, método Casagrande.	37
Figura 40: Grafica de asentamiento experimental sin columna de grava, método de Taylor.....	38

Figura 41: Grafica de asentamiento experimental con columna de grava, método Casagrande.	38
Figura 42: Grafica del asentamiento experimental.....	39
Figura 43: Grafica comparativa de asentamiento del suelo mejorado respecto al suelo sin mejorar.	40

Lista de tablas.

Tabla 1: Constantes elásticas de diferentes suelos modificadas de acuerdo con el U.S.Department of the Navy (1982) y Bowles (1988).	27
Tabla 2: Valores representativos del ángulo de fricción interna para arenas y limos.	29
Tabla 3: Valores de N_y según el Angulo de fricción del material.	32
Tabla 4: Valores de N_q según el Angulo de fricción del material.	32
Tabla 5: Valores de N_c según el Angulo de fricción del material.	33
Tabla 6: Calculo de capacidad de carga máxima del suelo mejorado con columnas de grava.	34
Tabla 7: Resultados limite líquido y plástico de la arcilla.	35
Tabla 8: Proctor estándar de la arcilla.	35
Tabla 9: Tiempo de consolidación.	35
Tabla 10: Resultados de ensayo corte directo para la arcilla.....	36
Tabla 11: Densidad relativa de la arena.	36

Agradecimientos

Primeramente agradezco a la universidad pontificia bolivariana por haberme aceptado como parte de ella y abrirme las puertas a todas las posibilidades que ofrece el campo de la ingeniería, así como a los docentes que con su esfuerzo me dieron los lineamientos básicos para formarme como profesional.

A mi director de tesis Msc Julian Andre Flores Galvis por brindarme la oportunidad de recurrir a su conocimiento científico y guiarme en el desarrollo de la presente tesis.

A mis padres por ser mi pilar económico y emocional, por formarme con principios sólidos de honestidad y responsabilidad.

A mi hermano por ser mi ejemplo a seguir y superar.

A Dios por brindarme salud y perseverancia ante todos los obstáculos en el camino de mi formación profesional.

Y para finalizar, agradezco a mis compañeros de estudio por todo el apoyo y amistad durante mi vida como estudiante.

Eric Danilo Mayorga Murillo

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS EMPLEANDO EL MÉTODO DE COLUMNAS DE GRAVA.

AUTOR(ES): DARWIN ALEXANDER BAUTISTA PRADA
ERIC DANILO MAYORGA MURILLO

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): MSc. JULIAN ANDRÉ FLORES GALVIS

RESUMEN

El método de mejoramiento de suelos mediante columnas de gravas, presenta un comportamiento mecánico entre el suelo y la grava debido a la interacción producida por los agregados y el suelo, el proceso constructivo y el resultado final del tratamiento. En este trabajo de grado, se ha diseñado un modelo experimental con el fin de simular un suelo en condiciones normales saturadas formado por dos estratos (arcilla y arena), de tal forma que se constituyan las condiciones adecuadas para usar el método de mejoramiento de suelos a través de columnas de grava. Para analizar como los asentamientos y tiempos de consolidación del suelo se afectan por la presencia de la columna de grava, se realizó dos montajes simultáneos del estrato sin mejorar y mejorado con columnas de grava respectivamente, los cuales fueron sometidos a una carga axial de igual magnitud; y por último se modeló el estrato en software con el fin de comparar resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos por la simulación. Se encontró que los asentamientos del suelo mejorado con columnas de grava fueron un 25% menores a los producidos por la misma carga en el suelo sin mejorar, por lo tanto se demuestra que el método de columnas de grava mejora los asentamientos de un suelo blanco saturado y resultados diferentes a los obtenidos por la modelación en el software con diferencias moderadas.

PALABRAS CLAVE:

Asentamiento, arcilla, columna de grava, esfuerzo, mejoramiento.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ANALYSIS OF SOIL IMPROVEMENT THROUGH THE GRAVEL COLUMN METHOD.

AUTHOR(S): DARWIN ALEXANDER BAUTISTA PRADA
ERIC DANILO MAYORGA MURILLO

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: MSc. JULIÁN ANDRÉ FLORES GALVIS

ABSTRACT

The method of soil improvement using gravel columns presents a mechanical behavior between the soil and the gravel due to the interaction produced by the aggregates and the soil, the construction process and the final result of the treatment. In this degree work, an experimental model has been designed in order to simulate a soil under saturated normal conditions formed by two strata (clay and sand), in such a way that adequate conditions are created to use the method of soil improvement through gravel columns. To analyze how the settlements and soil consolidation times are affected by the presence of the gravel column, two simultaneous assemblies of the stratum were performed without improving and improved with gravel columns respectively, which were subjected to an axial load of equal magnitude; And finally, the stratum in software is modeled in order to compare results obtained experimentally with those obtained by the simulation. It was found that settlements of soil improved with gravel columns were 25% lower than those produced by the same load on the unimproved soil, thus demonstrating that the gravel column method improves the settlements of a saturated white soil and results different from those obtained by software modeling with moderate differences.

KEYWORDS:

Settlement, clay, gravel column, effort, improvement.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1.0. INTRODUCCIÓN

En este trabajo de grado se pretende comprobar una alternativa de solución a los problemas geotécnicos que se están presentando en el ámbito de la ingeniería provocados por asentamientos diferenciales, ya que los proyectos planteados no se discriminan por el tipo de suelo con el cual cuenta el terreno en el que se desea construir, y las estructuras son de gran magnitud. Ante esta perspectiva se planteó desde el año 1960 un método de mejoramiento de suelos llamado columnas de grava y/o vibro sustitución, diseñado para responder a este problema geotécnico que requería el mundo de la ingeniería, el método columnas de grava es un sistema de malla y/o gradilla que está constituido por una serie de columnas formadas por gravas que van introducidas en el suelo que deseamos mejorar, las cuales deben trabajar de forma compuesta, absorbiendo las cargas impuestas; también se requiere que la superficie del suelo después de mejorada sea uniforme, el tipo de terreno en el cual podemos usar el método debe tener características particulares granulares deformables y/o licuables, suelos cohesivos blandos y/o deformables, suelos potencialmente expansivos y potencialmente propensos a colapso, con la aplicación del método se busca lograr que mejore la resistencia frente a los esfuerzos axiales y disminuya su deformidad llegando a obtener una capacidad portante aceptable.

1.1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El limitado uso del mejoramiento de suelo por medio de columnas de gravas en la región ha provocado la escasa aplicación de este método como alternativa de solución para las distintas características presentadas por los suelos blandos, particularmente asentamientos diferenciales. Normalmente se recurre a métodos de mejoramiento de suelos convencionales los cuales buscan modificar las características del suelo por medio de una acción física (Precarga, compactación dinámica o mechas de drenaje) o por la inclusión de un nuevo material más resistente.

Debido a la incertidumbre en la eficiencia de mejora de asentamientos proporcionada al suelo por parte de la columna, por lo general se opta a elegir métodos cuya aplicación en la región sea más común, como es el caso de compactación dinámica y precarga, los cuales consisten en el mejoramiento del suelo a través de la aplicación de una carga superficial (precarga) ó densificando el suelo por medio de ondas de compresión y de corte de alta energía (compactación dinámica), y/o la instalación de drenes que contribuyan a la salida rápida de agua del suelo y acelere el proceso de consolidación del mismo (Mechas de drenaje).

1.2. ANTECEDENTES.

En Colombia el primer proyecto en que se usó el método fue en la ciudad de Buenaventura en el año 1996 dado que en los suelos de la sociedad portuaria se presentaban problemas de asentamientos, por consiguiente, se fracturaban las losas de los patios de contenedores. Se implementaron cerca de 5.000 columnas de grava distribuidas en 6 lotes de igual área, para brindar una solución a la problemática, este proyecto obtuvo un éxito rotundo lo cual permitió que se diera a conocer el método y comenzara a usarse en diversos tipos de proyectos (rellenos, estabilización, reforzamiento), a lo largo de 21 años de haberse posicionado, se ha usado en diversos proyectos. A continuación se mencionan investigaciones recientes enfocadas en el método [1].

Título del artículo	Autor (es)	Resumen
Rate of consolidation of stone column-improved ground considering change in permeability and compressibility during consolidation. 2016.	Kousik Deb, Aparajita Behera	En este trabajo se desarrolla la formulación matemática para determinar la tasa de consolidación de la columna de grava considerando el cambio de la permeabilidad y compresibilidad del suelo blando durante el periodo de consolidación. En el análisis se ha considerado el enfoque de la misma tensión, la variación parabólica en la permeabilidad y la compresibilidad. Se concluye que la diferencia entre el grado de consolidación obtenido considerando las propiedades variables y constantes del suelo es casi constante debido a la variación de los parámetros de la zona de frotis.
Bayesian Updating of Bearing Capacity Models for Individual Stone Columns. 2017.	Rafael Jimenez, Xianda Feng, Jose Alonso-Pollán	A lo largo del presente estudio, se analizan rigurosamente los modelos empíricos para determinar la capacidad de carga de las columnas de piedra en el marco de la evaluación del modelo bayesiano, que además de estimaciones de parámetros de modelo, puede proporcionar estimaciones de incertidumbre de los parámetros y las predicciones. De acuerdo con investigaciones

		previas, se obtiene un modelo general con $N_y = 20$, que puede emplearse para un suelo típico y método de construcción, para una sola columna de piedra.
Shear wave velocity-based evaluation and design of stone column improved ground for liquefaction mitigation. 2017.	Yanguo Zhou, Zhengbo Sun, Jie Chen, Yunmin Chen, Rempeng Chen	La evaluación y el diseño de la mejora de la columna de piedra para la mitigación de la licuación es un desafío para el estado de la práctica. Se propone un enfoque basado en la velocidad de onda de corte basado en las correlaciones bien definidas de la resistencia a la licuefacción (CRR) - velocidad de onda de oído (V_s) - razón de vacío (e) de los suelos arenosos y los valores de los parámetros en esta. Se dan los procedimientos detallados de evaluaciones de licuefacción antes y después de la mejora y diseño de columnas de piedra. De acuerdo con este enfoque, el nivel requerido de mejora del suelo se alcanzará una vez que el suelo objetivo se eleve lo suficientemente alto para resistir la carga de terremoto dada de acuerdo con la relación CRR-V, Se transfiere al control de la relación de vacío objetivo de acuerdo con la relación V_s - e .
Stone columns field test: Monitoring data and numerical analyses. 2014.	Marcio Almeida, Bruno Lima, Mario Riccio, Holger Jud, Maria Cascão, Felipe roza	El objetivo de la investigación fue verificar el desempeño de las mejoras de cimentación con columnas de piedra para un futuro depósito de mineral. La prueba de campo también fue útil para calibrar un modelo numérico para predecir el comportamiento del suelo. Se realizaron análisis de elementos finitos de dos y tres dimensiones y se compararon los resultados de las mediciones de campo y los cálculos numéricos. En general los cálculos numéricos de desplazamientos verticales y

		horizontales reprodujeron las mediciones de campo con una precisión satisfactoria hasta condiciones de estado límite.
Laboratory analysis of encased stone columns. 2016.	Marina Miranda, Almuneda Da costa	Las columnas de piedra instaladas en suelos blandos pueden reducir significativamente la efectividad de este tratamiento debido al insuficiente confinamiento lateral proporcionado por el suelo blando. Este estudio se centra en el aumento de la resistencia de las muestras encerradas en comparación con las no encapsuladas, la presión adicional de confinamiento proporcionada por los geotextiles y el ángulo de fricción movilizado de la grava. Dando como resultado una mejora en las propiedades mecánicas del suelo cuando la columna de grava se encuentra encapsulada.

1.3. JUSTIFICACIÓN

En el ámbito de la construcción hay estructuras que sufren de asentamientos diferenciales debido a las deformaciones del suelo, estos pueden llevar a crear grietas en las estructuras, pérdida de la capacidad estructural hasta incluso el colapso total de la misma, en los últimos años en Colombia y en Santander se ha buscado mejorar la infraestructura vial debido al déficit existente, en medio de estos nuevos proyectos que se han constituido, se han presentado dificultades debido al tipo de suelo presente en el trazado, ocasionando pérdida de banca, fracturas en la estructura de pavimento, fallas en estructuras de drenaje, entre otras, lo cual genera inhabilidad de la vía y pérdida de vida útil del proyecto. Por lo cual se busca comprobar la efectividad del método de columnas de grava para mitigar estas deformaciones del suelo y con esto, dar los primeros precedentes para la implementación de este método en proyectos de gran escala.

1.4. OBJETIVOS

General

Analizar la efectividad de mejora en asentamiento por la aplicación del método de mejoramiento de suelo mediante columnas de grava en un MODELO A ESCALA y la modelación empleando software phase 2.

Específicos

- Diseñar un MODELO para recrear un suelo de capacidad 0.7 m^3 de volumen con vista transversal de los estratos del suelo, a fin de evaluar el comportamiento del suelo someténdolo a cargas axiales antes y después de aplicar el método columnas de grava.
- Modelar las columnas de grava en el software de elementos finitos Phase2 con las características del suelo y material de relleno dispuestos en el módulo de 0.7 m^3 .
- Comparar los asentamientos generados por una carga puntual igual para el suelo sin tratar y el suelo tratado con el método y los resultados obtenidos en laboratorio.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Problemas generados por asentamiento.

En los últimos años se han evidenciado problemas geotécnicos debido a asentamientos diferenciales que se han presentado en las estructuras de diferente índole ocasionados por la baja capacidad portante del terreno en el cual se cimenta la misma. Estos problemas geotécnicos comprometen la vida útil de un proyecto ya que se pierde la seguridad de la estructura, incluso comprometiéndola la vida de sus usuarios, ocasionando grietas, colapso de las estructuras e incumplimiento a la normatividad sismo resistente, como se observa en las figuras 1 y 2. Para solucionar estos percances presentes en las obras civiles, se han planteado un gran número de métodos de mejoramiento de suelos que satisfacen esta necesidad lo cual hace posible que cualquier clase de suelo blando sea apto para construir. [2]

Figura 1: Consecuencias de asentamientos diferenciales.

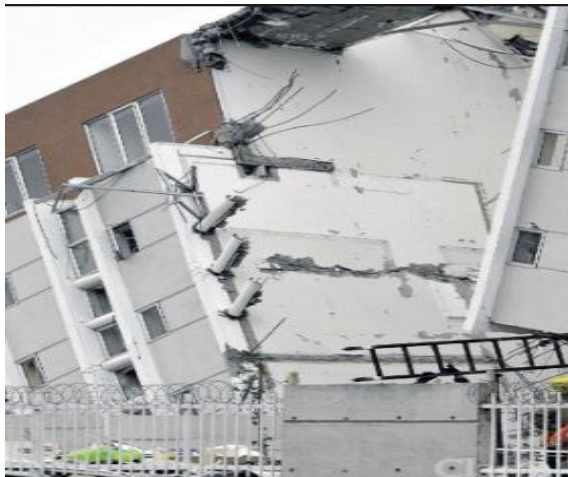


Figura 2: Consecuencias de asentamientos diferenciales.



Fuente: Consecuencias de asentamientos diferenciales [3]

3.2. Métodos de mejoramiento de suelos

La aplicación de un tratamiento de mejora del terreno surge de la necesidad de construir sobre un terreno que comúnmente es blando y/o deformable. Existen una gran cantidad de técnicas para mejorar el terreno existente hoy en día que ejecutan empresas especialistas en el área, la elección de una de ellas depende de características específicas como tipo de terreno, propiedad geotécnica objetivo de la mejora o profundidad a la que se requiere mejorar el terreno, sin olvidar los condicionantes de costo y tiempo de ejecución [2]. Con los métodos de mejoramiento de suelos normalmente se busca conseguir un aumento de la resistencia, una disminución de la deformabilidad o una modificación de la permeabilidad [1]. La profundidad de mejora, o profundidad a la que un tratamiento es eficaz, es altamente variable, en un rango de menos de 1.00 m para la

compactación superficial con rodillo hasta más de 100 m en el caso de tratamientos con inyecciones [1]. Sin embargo, el método de vibro-sustitución solo se aplica para suelos granulares cuyo porcentaje de finos sea inferior al 15%. [4].

Entre estos métodos de mejoramiento de suelos, los más usados son los siguientes:

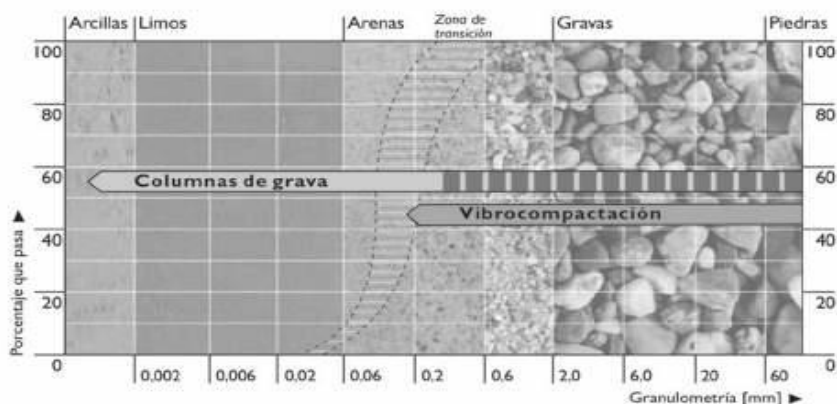
- **Inyecciones de lechada:** Son procedimientos que se aplican al subsuelo mediante el cual se introduce en los poros del medio a tratar un producto líquido (mortero o lechada), que se solidifica adquiriendo una resistencia determinada a través del tiempo logrando fortificar e impermeabilizar el suelo incrementando las propiedades mecánicas del mismo. Con este método la fricción y la cohesión del suelo aumenta lo cual genera como consecuencia mejoras en sus propiedades mecánicas garantizando el periodo de vida útil deseado [5].
- **Compactación dinámica:** Es una técnica cuyo fin es mejorar las propiedades del suelo a tratar mejorando la capacidad portante, consiste en dejar caer martillos de un peso elevado sobre una superficie a una altura determinada logrando aumentar su densidad debido a que se producen ondas de compresión y de corte de muy alta energía. Es recomendable que sea usado en suelos granulares [6].
- **Drenes verticales:** Es un sistema utilizado en suelos pocos permeables que facilitan la disipación de presiones en el terreno, lo cual permite que se aumente la velocidad de consolidación. Los drenes verticales prefabricados están constituidos por material plástico o textil con sección plana o cilíndrica, dependiendo del caso en que se usara el método se pueden alcanzar profundidades de más de 50 m, de acuerdo al tipo de suelo en el que usaremos esta técnica los drenes pueden estar constituidos por grava o arena [7].
- **Estabilización con cal:** Esta práctica mejora las características generales del suelo aumentando la capacidad de carga, la utilización de la cal ha sido muy popular debido a que sus costos son moderados, es de fácil manejo producción y existencia abundante, la cal mejora las características plásticas del suelo. El proceso de aplicación se caracteriza por no requerir mano de obra especializada ya que es sencillo y requiere de poco tiempo [8].
- **Jet grouting:** Consiste en la formación de columnas pseudocilíndricas de suelo cemento con aditivos capaces de soportar tensiones de rotura, mejora la consolidación el terreno mediante la inyección de lechada de cemento a alta presión con diámetros variables

[9]. Su ejecución se desarrolla en tres fases, la perforación de la cota final, la inyección del fluido y la recuperación de la tubería de tal forma que el fluido proporcionado al suelo después de secarse mejorare la capacidad portante del mismo.

3.3. Mejoramiento de suelo por medio de columnas de grava

Las columnas de grava se realizan en terrenos flojos (granulares o ligeramente cohesivos) Dicha densificación se produce debido al desplazamiento del material equivalente al volumen del pilote y a las vibraciones producidas durante la hincada del tubo utilizado para su ejecución. La profundidad que puede alcanzarse de forma razonable es de unos 20 metros según la granulometría del suelo objeto de mejora como se aprecia en la figura 3 [10].

Figura 3: Ámbito de aplicación de las técnicas de vibración profunda, según la granulometría del suelo.

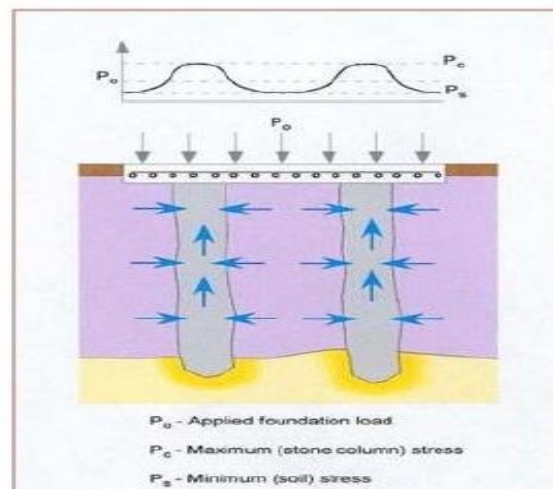


Fuente: Ámbito de aplicación de las técnicas de vibración profunda, según la granulometría del suelo. [11]

Una vez ejecutadas las columnas por cualquiera de los métodos es conveniente regularizar la base de apoyo mediante una capa superficial de grava compactada (espesor 0.3 –0.5 m) que conecten las columnas realizadas como se aprecia en la figura 4. Con el fin de tener un apoyo más homogéneo para las estructuras, proporcionar un cierto reparto de cargas y facilitar la evacuación de agua [12]. Los métodos indicados se emplean de forma habitual suelos blandos con resistencias al corte sin drenaje del orden de 10–30 kN/m² para la vibro-sustitución y de 10 – 50 kN/m² para el vibro-desplazamiento [10].

Al incorporar las columnas, el conjunto es un terreno mejorado con unas características geotécnicas “equivalentes” (cohesión, ángulo de rozamiento y módulo de deformación), resultantes de “combinar” las características geotécnicas originales del terreno y las de las columnas.

Figura 4: Cimentación mediante columnas de grava.



Fuente: Cimentación mediante columnas de grava. [13].

La repetición de este proceso en diversos puntos del terreno siguiendo una malla, permite el aumento de la porosidad del terreno y consigue un mejoramiento de las características de resistencia y compresibilidad del mismo. El control de la mejora obtenida puede llevarse a cabo mediante ensayos de penetración de tipo estático realizados antes y después de la compactación. Teniendo en cuenta que la compresibilidad del suelo es proporcional a la resistencia por la punta del penetrómetro estático [10].

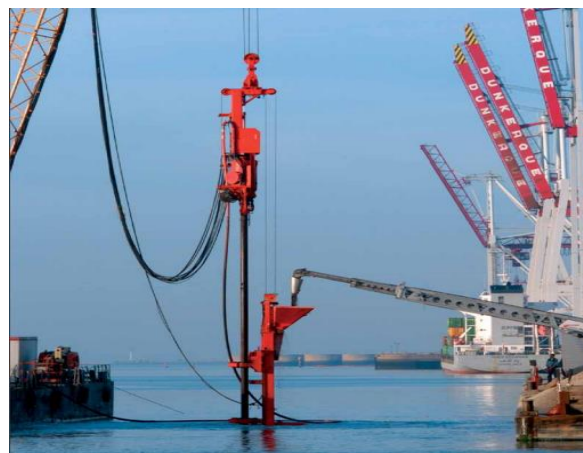
Además, los asientos del conjunto serán menores, debido al mayor módulo de rigidez de las columnas. Esto se traduce, a efectos prácticos, en un módulo de deformación equivalente del terreno mejorado superior al del terreno original que, naturalmente, será mayor cuanto mayor sea la rigidez de las columnas de grava y la densidad del tratamiento [4].

Este método en general se emplea en las siguientes aplicaciones:

- Terraplenes: son usados de forma habitual para la construcción de rellenos de infraestructuras lineales cuando hay problemas de estabilidad e incluso se han usado para construir calzadas junto a rellenos ya existentes para ampliar vías, particularmente en Colombia es una buena solución ya que contamos con una topografía compleja que nos lleva a tener la necesidad de usar un gran número de terraplenes.
- Estabilización de deslizamientos: Funciona como medida correctora de deslizamientos en taludes naturales preservando el estado deseado por el constructor. [9]

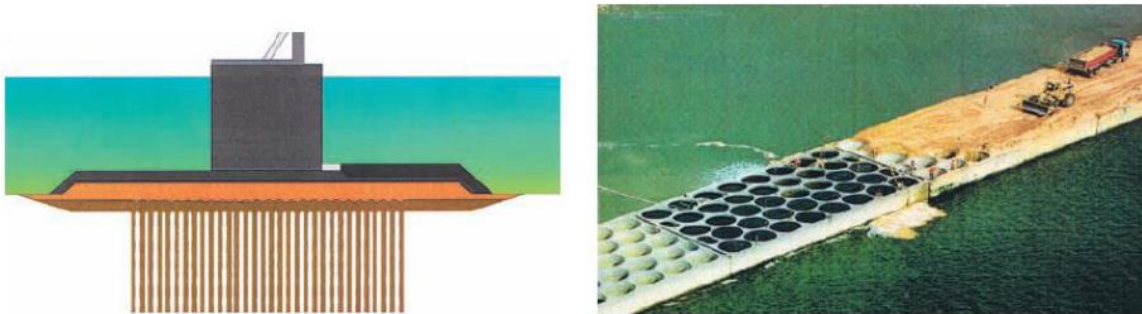
- Rellenos de acceso a puentes: Las columnas de grava se suelen usar como cimiento de rellenos de acceso para brindar estabilidad y lograr reducir el costo de mantenimiento de la junta entre el relleno y estribo de la estructura ya que generalmente el estribo se apoya en un estrato mucho más competente que el relleno logrando que se reduzca de forma drástica la diferencia de deformaciones de ambos elementos [9].
- Tanques y bodegas de almacenamiento: Este tipo de estructuras generalmente poseen una gran extensión por lo que recurrir a un sistema como el pilotaje puede resultar muy costoso, por lo tanto, una alternativa más eficiente es reducir los asentamientos totales y diferenciales con columnas de grava logrando tener el mismo efecto en el suelo de asentamiento. En Colombia el método se ha usado en tanques de almacenamiento de hidrocarburos debido a que poseen una gran extensión y el peso propio más el almacenado es alto [10] y en la ciudad de Bogotá Colombia se usó el método para la construcción de Bodegas de almacenamiento en el parque industrial Zolfunza logrando un buen desempeño.
- Empleo en medio marítimo: Se han adaptado técnicas de vibro sustitución y vibro desplazamiento al medio marítimo con especificaciones especiales frecuentemente debido a la practicidad del proceso constructivo. Se aplican para lograr mejorar la cimentación de los rellenos portuarios, muelles de cajones, diques. Este tipo de obras civiles son consideradas como las más comunes para mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo ya que es una solución efectiva para el tipo de suelos que se encuentra en áreas portuarias, e incluso la clase de equipos que se requieren para su construcción son de fácil adquisición y transporte.

Figura 5: Proceso constructivo de columnas de grava en puertos.



Fuente: Ejecución de las columnas de grava para la mejora del cimiento de un relleno portuario [3]

Figura 6: Comparativa entre dragado profundo y columnas de grava.



Fuente: Comparativa entre la solución de dragado profundo y la solución con columnas de grava [3].

Uso como medida anti licuefacción: Las columnas de grava también se usan como una medida para prevenir la licuefacción en terrenos granulares que están presentes en zonas sísmicas, en este sentido son un elemento excelente que densifica, facilita la disipación de energía y refuerza absorbiendo cargas. Para que las columnas de grava funcionen a toda su capacidad debe usarse en suelos blandos y susceptibles e incluso el porcentaje de finos debe ser bajo para el uso del método.

Las columnas de grava se emplearán cuando los parámetros a mejorar coincidan con las mejoras que aportan éstas y se determine, bien mediante una comparación o bien directamente por la experiencia, que es el tratamiento de menor coste [11]. Las mejoras que se pueden conseguir con un tratamiento mediante columnas de grava son aumento de la resistencia al corte, aumento de la rigidez, aumento de la permeabilidad. Todas estas mejoras en conjunto del suelo y las columnas se simplifican en objetivos básicos como aumento de la permeabilidad. Estas mejoras en el conjunto suelo-columnas se traducen en cuatro objetivos básicos [12]:

- Aumento de la capacidad portante/estabilidad al deslizamiento.
- Reducción de asientos (totales y diferenciales).
- Aceleración de la consolidación.
- Reducción del riesgo de licuefacción.

Después de culminar el proceso constructivo de las columnas de grava se recomienda regularizar una base de apoyo para tener una buena superficie drenante y uniforme mediante una capa superficial de grava compactada con espesores que pueden oscilar entre 0.3-0.5 m de tal forma que se proporcione un cierto reparto de cargas logrando facilitar la evacuación del agua en la superficie mejorada [13]. Al unir las características geotécnicas del terreno y las propiedades

de las columnas e grava logramos conseguir un terreno mejorado con (cohesión, ángulo de rozamiento y módulo de deformación) la sucesiva ejecución de estos procesos en diversas áreas del suelo nos permitirá obtener una malla y/o gradilla que permitirá la reducción de la porosidad en el terreno por lo tanto mejora la resistencia y compresibilidad del mismo [13].

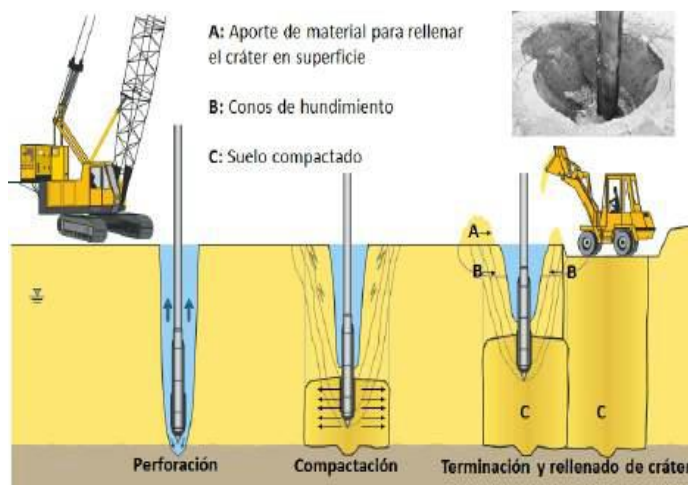
Los asentamientos del grupo de columnas son menores debido a un mayor módulo de rigidez de las columnas, en forma práctica son un módulo de deformación equivalente del terreno mejorado superior al del terreno original, será mayor cuando la rigidez de las columnas de grava y la densidad del tratamiento sea mayor [6].

El control de calidad que se debe realizar en las columnas de grava debe ser sumamente riguroso, es muy importante un proceso de ejecución continuo con parámetros específicos determinadas previamente por el especialista, el mayor cuidado se debe tener durante la operación de la maquina debido a que el maquinista debe tener en cuenta en tiempo real aspectos como número identificativo de la columna, tiempo, profundidad, velocidad de ejecución, intensidad del motor eléctrico. Estos registros contienen todos los elementos para comprobar la validez del proceso [3]. En general los parámetros de ejecución más significativos son la profundidad de perforación, intensidad aplicada al vibrador, empuje ejercido sobre el vibrador y cantidad de grava consumida posterior a la ejecución estos ensayos están orientados a comprobar la compactación, continuidad y profundidad de las columnas, se recomienda realizar algunos ensayos en sitio tipo cpt, dilatómetros, penetrómetros dinámicos, prisioneros, spt [14] para proyectos de gran envergadura.

Debido a la poca implementación del método de columnas de grava en Colombia no se tienen estudios o antecedentes que brinden bases sobre la eficiencia del tratamiento en suelos finos (arcillas o limos) en estados de completamente saturados, por lo cual la incertidumbre en cuanto a la mejora de asentamientos y capacidad portante que brinda el suelo tratado con las columnas de grava y su costo no representan una opción a considerar como método de mejora del suelo en proyectos nacionales o regionales.

Las columnas de grava mediante vibro-sustitución tienen sus orígenes en los años 1960s, a partir de la mejora tecnológica de los primeros equipos de vibración profunda desarrollados por la empresa alemana Keller desde los años 1930s [14]. En principio, la vibro-compactación o vibro-flotación era la única técnica de vibración profunda conocida. Esta consiste en la introducción al terreno de un vibrador ayudado por un caudal de agua, con el objetivo de producir su densificación in situ de capas gruesas de depósitos de suelos granulares sueltos como se aprecia en la figura 8 [4].

Figura 7: Proceso constructivo de vibro-compactación.



Fuente: Vibro-compactación. Tomada de [11]

3.4. Ventajas y desventajas de las columnas de grava

El método de mejoramiento de columnas de grava comprende varias ventajas debido a sus características particulares:

- Mejora de la capacidad portante: Tiene la capacidad de mejorar la capacidad portante inmediatamente al culminar el proceso ya que sus agregados tienen una interacción con el suelo al realizar el proceso constructivo.
- Fácil disposición de materiales: El material principal que se requiere es la grava y/o triturado, ya que es el componente fundamental de la columna, es de fácil adquisición ya es un material muy usado y común en las obras civiles en nuestro país.
- Poco tiempo de ejecución: No se requiere de un largo periodo de tiempo ya que es un proceso monolítico de rápida ejecución.

En método de mejoramiento columnas de grava comprende diversas desventajas entre ellas tenemos:

- Alto costo del proyecto: El método se caracteriza por ser de alto costo debido a que requiere de maquinaria y mano de obra especializada.
- Mano de obra especializada: El proceso de planeación y ejecución del método debe realizarse permanentemente con personal especializado debido a las especificaciones y nivel de detalle que se debe tener en su ejecución de tal forma que se garantice la calidad y un periodo de vida útil.
- Características específicas: El suelo que se requiere para que método trabaje a su capacidad debe tener propiedades mecánicas especiales de tal forma que el comportamiento del método sea adecuado y pertinente a las necesidades del contratante.

- Maquinaria especializada: La maquinaria requerida debe ser de especificaciones particulares la cual es dispendioso de conseguir y costoso.

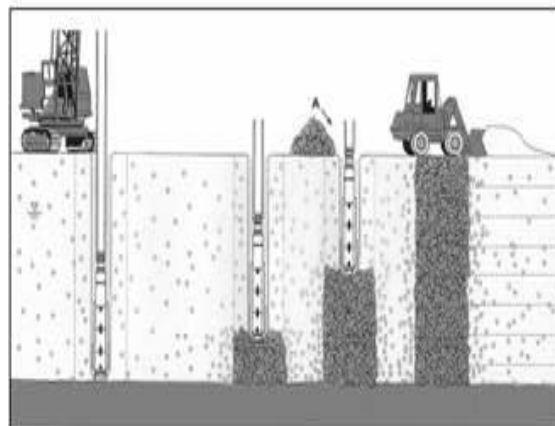
3.5. Proceso constructivo de las columnas

El procedimiento operativo consiste en la hincada de un tubo cerrado en su parte inferior por un tapón, mediante el golpeo sobre dicho tapón o por vibración del tubo. Una vez alcanzada la profundidad deseada se rellena el orificio resultante con material incoherente que se compacta a percusión por tongadas, a la vez que se va extrayendo la tubería, quedando el tapón o fondo de la misma embebido en el terreno [15]. El resultado final es la formación de un pilote de material granular compactado, la realización de la compactación es en dos fases, es decir, una vez realizado el pilote se vuelve a introducir el tubo hasta la profundidad que permita el terreno, con lo que pueden mejorarse los resultados [10].

Figura 8: Método constructivo de las columnas de grava.



Figura 9: Método teórico constructivo de las columnas de grava.



Fuente: Método de ejecución de columnas de grava en vía húmeda (top-feed method) [11]

Las columnas de grava se emplearán cuando los parámetros a mejorar coincidan con las mejoras que aportan éstas y se determine, bien mediante una comparación o bien directamente por la experiencia, que es el tratamiento de menor coste [13]. Las mejoras que se pueden conseguir con un tratamiento mediante columnas de grava son:

- Aumento de la resistencia al corte.
- Aumento de la rigidez.
- Aumento de la permeabilidad.

Estas mejoras en el conjunto suelo-columnas se traducen en cuatro objetivos básicos [16]:

- Aumento de la capacidad portante/estabilidad al deslizamiento.
- Reducción de asentos (totales y diferenciales).
- Aceleración de la consolidación.
- Reducción del riesgo de licuefacción.

3.6. Implementación en Colombia

En Colombia el primer uso y más relevante del método columnas de grava se distinguió por ser en el medio marítimo debido a que en la ciudad de Buenaventura en el año 1996 se requería de una tecnología para mejoramiento de suelos cohesivos ya que en la sociedad portuaria regional de Buenaventura se presentaba un continuo asentamiento y por ende la fracturación de las losas de los patios de contenedores del puerto, ante este dilema este método se consideró como la mejor alternativa de solución con la implementación de 5000 columnas de grava distribuidas en 6 áreas de patios de dicho puerto para solucionar la dificultad que se estaba presentando [17]. Posteriormente con la evaluación del comportamiento que presentaba el método la misma entidad decidió implementarlo en otras áreas adicionales e incluso en la ampliación del puerto años después.

Figura 10: Construcción de las columnas de grava en buenaventur. *Figura 11: Columnas de grava construidas en buenaventura.*



Fuente: Aplicación del método columnas de grava en Buenaventura Colombia [18].

En la ciudad de Bogotá también se usó el método de mejoramiento en un suelo de baja calidad que debía requerir unas condiciones óptimas ya que el tránsito generado era tráfico pesado debido al proyecto que comprendía la construcción de un número determinado de bodegas para el almacenamiento de mercancía, se usaron columnas uniformemente distribuidas con 2 m de espaciamiento entre ellas las cuales fueron ejecutadas por mano de obra especializada ya que se requiere para la correcta ejecución del mismo [18].

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el proceso de selección del material utilizado, metodología y técnicas que se emplearon para evaluar la mejora de los asentamientos de un estrato de suelo empleando un modelo a escala y sometiénolo a la misma fuerza axial.

Para tener un correcto desarrollo del trabajo de grado se inició con reunir información pertinente en todo el proceso referente al método de mejoramiento de suelos por medio de artículos de investigación, trabajos de grado entre otros, de tal forma que al iniciar el proyecto ya se adquirieran todos los conceptos y principios necesarios.

Para contrastar los datos obtenidos en el laboratorio con los obtenidos en el modelo previamente planteado, fue necesario estudiar detalladamente todos los ensayos de laboratorio relacionados con el tema tomando como base las normas de ensayo de materiales 2013 del instituto nacional de vías, con el objetivo de determinar cuáles eran necesarios para nuestro proyecto con el fin de caracterizar el suelo, conocer el comportamiento en deformación y la resistencia frente a una carga axial.

4.1. Selección del suelo a ensayar.

El suelo que se requería para este modelo debía tener características específicas ya que el método de mejoramiento planteado en la tesis así lo requiere, para ello se precedió a investigar cuales eran las fuentes de material que se ajustaban a las necesidades del proyecto (arcilla de alta plasticidad), por medio de los ensayos de limite líquido y limite plástico. Se ensayaron cuatro (4) muestras de suelos, procedentes de un lote en construcción en el anillo vial Floridablanca-Girón, el terreno edificio k de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, un lote en la autopista Piedecuesta-Floridablanca y una mina de arcilla en el municipio de san gil respectivamente. Entre los suelos ensayados, se encontró que el único que cumplía con los requisitos de este proyecto de grado, era el procedente de la mina de arcilla en el municipio de san gil que se comercializaba en una fábrica de materos de barro en el municipio de Floridablanca barrio palomitas. Además de la arcilla de alta plasticidad también se necesitaba de una arena y triturado normalizados los cuales se suministraron de una ferretería ubicada en el municipio de Piedecuesta.

Figura 12: Muestra de suelo del anillo vial, Bucaramanga.



Fuente: Los autores.

Figura 13: Muestra de suelo del terreno K, universidad pontificia bolivariana, Bucaramanga.



Fuente: Los autores.

Figura 14: Muestra de suelo de mina de arcilla en san gil.



Fuente: Los autores.

4.2. Caracterización del suelo seleccionado.

Una vez seleccionada la arcilla, se procede a ejecutar ensayos de caracterización y ensayos necesarios para el objetivo de la tesis. Se inicia realizando el ensayo de granulometría, el cual al pasar más del 50% del material pasa por el tamiz n° 200, se realiza ensayo de limite líquido y plástico para determinar el tipo de suelo que se va a ensayar.

Figura 15: Equipo de tamices para ensayo de granulometría.



Fuente: Los autores.

Figura 16: Maquina de Casagrande y vidrio para ensayo de limite líquido y plástico.



Fuente: Los autores.

Luego, se procede a realizar un ensayo de proctor estándar con el cual se establece la humedad de compactación del suelo para los ensayos de laboratorio y de campo, una vez compactado el suelo, se procede a realizar un proceso de saturación de cinco (5) días, con el cual se llevará el grado de saturación del material a un aproximado del 100% con el fin de evitar fuerzas de expansión al momento de realizar el ensayo de consolidación.

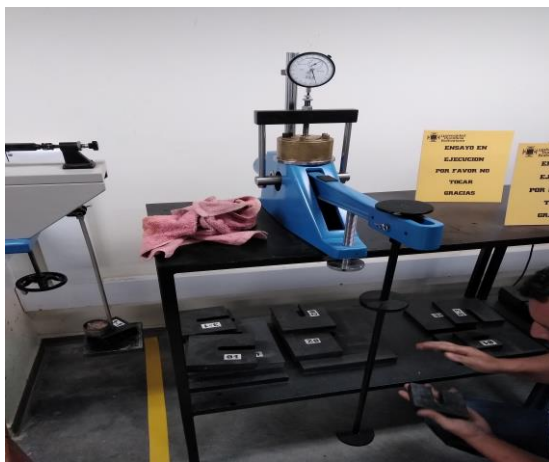
Figura 17: Preparación para el saturado de la muestra de suelo.



Fuente: Los autores.

Trascurrido el tiempo de curado, se procede a extraer las probetas necesarias para realizar los ensayos de consolidación, corte directo y permeabilidad. El primero se realizará con incrementos de carga partiendo desde un esfuerzo inicial de $0,5 \text{ Kg/cm}^2$ hasta un máximo de 8 Kg/cm^2 y para corte directo duplicando la carga inicial de $0,5 \text{ Kg/cm}^2$ hasta una carga final de 2 Kg/cm^2

Figura 18: Ensayo de consolidación.



Fuente: Los autores.

Figura 19: Probeta de suelo después de realizar en ensayo de corte directo.



Fuente: Los autores.

Figura 20: Ensayo de permeabilidad cabeza variable.



Fuente: Los autores.

4.3. Construcción del modelo y disposición de materiales.

El módulo en el cual se sitúa el modelo se construyó en lámina de acero con características herméticas con capacidad de 0.7 m^3 , con diseños establecidos previamente, se requirió dejar un área en vidrio de tal forma que se apreciara el comportamiento de los estratos en el proceso de consolidación y construido en el taller Servitrack ubicado en el municipio de Piedecuesta.

Figura 21: Módulo en lámina de acero.



Fuente: Los autores.

La disposición y transporte de todos los materiales e implementos necesarios se realizó por medio de vehículos de transporte carga de baja capacidad tipo camioneta, se desarrolló en 3 viajes debido a disposición de los materiales, volumen y peso de cada uno de ellos. Los materiales transportados fueron el modelo en acero, 650kg de arcilla, 300kg de arena, 100kg de grava, los demás materiales no requirieron de transporte en vehículo de carga.

4.4. Preparación del estrato.

El proceso constructivo se desarrolló manteniendo las condiciones del suelo empleadas para los ensayos según el ensayo de proctor estándar. La fase inicial fue disponer el modulo en lámina de acero y el suelo, posteriormente se construyeron los dos estratos (arena y arcilla) compactados en varias capas de tal forma que se recreara un estrato homogéneo en el módulo y el cual conservara características similares al proctor estándar. La última fase fue aplicar una capa de triturado en el 50% del área superficial del modelo la cual pertenecía al método columnas de grava cumpliendo con el principio que establece la necesidad de instalar una capa en material de buena calidad. La columna de grava se constituyó a escala teniendo en cuenta los valores de diámetro mínimos de 50 cm a escala real, el cual a tratarse de un modelo a escala determino un valor en proporción de 18.5cm de diámetro y a una profundidad de 50cm apoyada en un estrato de buena calidad en este caso arena.

Figura 22: Módulo de acero, apoyado en cilindros de concreto.



Fuente: Los autores.

Figura 24: Preparación de la arcilla para su compactación.



Fuente: Los autores.

Figura 23: Aplicación del estrato de arena.



Fuente: Los autores.

Figura 25: Proceso de compactación del estrato de arcilla y construcción de la columna de grava.



Fuente: Los autores.

Nota: Para lograr un estado de compactación similar al del proctor estándar en el módulo, se empleó un método constructivo similar al usado para determinar los

espesores de compactación de las bases granulares en la construcción de vías terrestres, para el cual se utilizó un molde con un volumen determinado, al cual se agregaron capaz de arcilla y se contó el número de golpes para que se lograra una densidad similar a la de proctor.

El ensayo ejecutado en el modelo construido fue el de consolidación drenado por las dos caras, para su desarrollo se requirió de un periodo de saturación del suelo para evitar los esfuerzos provocados por la expansión del estrato, y para el cual se instalaron 4 deformímetros de tal forma que se tomó la lectura en la superficie del modelo. Posteriormente se instaló la carga previamente determinada en la superficie ubicada en las dos áreas determinadas (suelo con mejoramiento, suelo en condiciones naturales) de tal forma que se inició el proceso de consolidación, para tomar las lecturas de estas deformaciones se volvieron a instalar los deformímetros en 4 puntos de tal forma que se tomó la lectura de cada una de las cargas ubicadas en las dos áreas establecidas.

Figura 26: Ubicación de los deformímetros en el periodo de saturación.



Fuente: Los autores.

Figura 28: Carga axial aplicada en el modelo.



Fuente: Los autores.

Figura 27: Modelo a escala evidenciando suelo natural y suelo tratado.



Fuente: Los autores.

Figura 29: Asentamiento en el suelo tratado.



Fuente: Los autores.

La modelación del prototipo se realizó en el software phase 2 con el objetivo de modelar el comportamiento del suelo en condiciones de deformación y esfuerzos, las columnas de grava se modelaron bajo la acción de cargas axiales de tal forma que se asemejara a un estrato con mejoramiento en condiciones reales.

5. MODELACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA EMPLEANDO SOFTWARE PHASE 2

Phase2 versión 8.0 es un programa 2D para análisis de elementos finitos y análisis de esfuerzos para excavaciones subterráneas o de superficie en roca o suelo; además de ofrecer una amplia gama de opciones de modelación de apoyo.

En el caso del modelación de columnas de grava, el software permite apreciar unas deformaciones verticales estimadas producidas a cargar axiales, datos que se comparan con los resultados experimentales y de laboratorio para analizar las diferencias entre dichos valores.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos de laboratorio del suelo de fundación (arcilla) y datos obtenidos de la tabla 1 para determinar el módulo de Young de la arcilla.

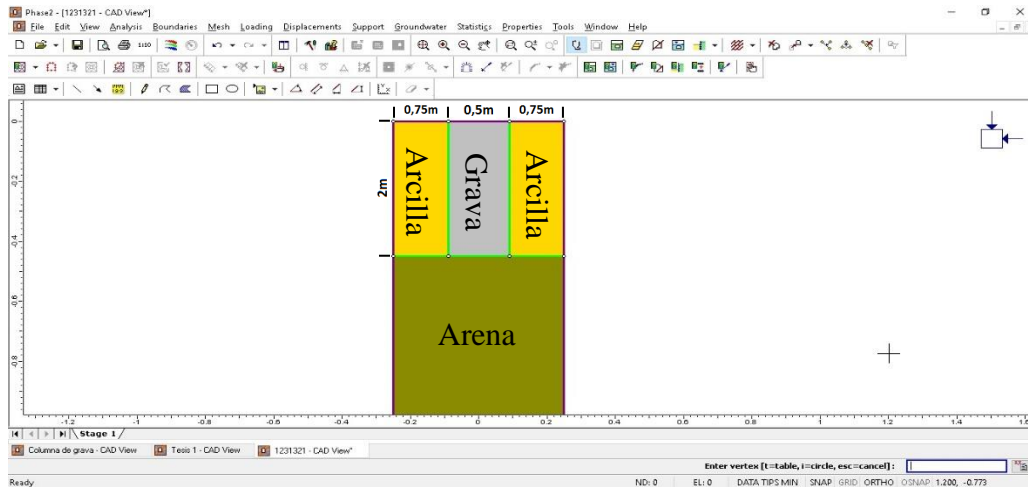
Tabla 1: Constantes elásticas de diferentes suelos modificadas de acuerdo con el U.S.Department of the Navy (1982) y Bowles (1988).

Tipo de Suelo	Rango de valores típicos	Coeficiente de Poisson, ν (adimensional)
	Módulo de Young, E_s (MPa)	
Arcilla: Blanda sensible Medianamente rígida a rígida Muy rígida	2,4 - 15 15 - 50 50 - 100	0,4 - 0,5 (no drenada)
Loes Limo	15 - 60 2 - 20	0,1 - 0,3 0,3 - 0,35
Arena fina: Suelta Medianamente densa Densa	7,5 - 10 10 - 20 20 - 25	0,25
Arena: Suelta Medianamente densa Densa	10 - 25 25 - 50 50 - 75	0,20 - 0,35 0,30 - 0,40
Grava: Suelta Medianamente densa Densa	25 - 75 75 - 100 100 - 200	0,2 - 0,35 0,3 - 0,4

Fuente: U.S.Department of the Navy (1982) y Bowles (1988).

Una vez obtenidos los datos se crea en estrato del suelo en el software, dando dimensiones y espesores de estrato, y estableciendo el nivel freático en la superficie para cumplir la condición de saturación experimental como se percibe a continuación.

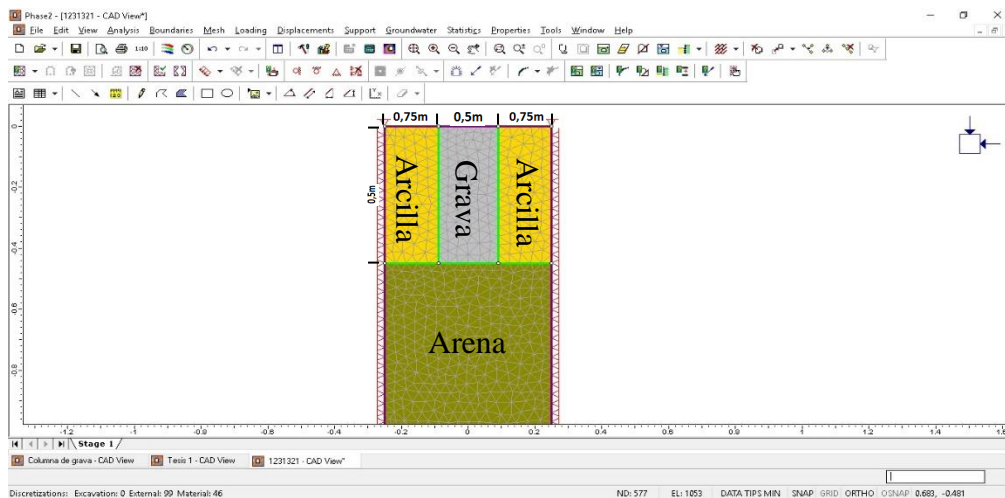
Figura 30: Modelo de estratos de suelo en Phase 2.



Fuente: Los autores.

Creado el estrato del suelo, se crea la malla la cual permitirá realizar el cómputo de esfuerzos y deformaciones del programa.

Figura 31: Malla para simulación del estrato en Phase 2.

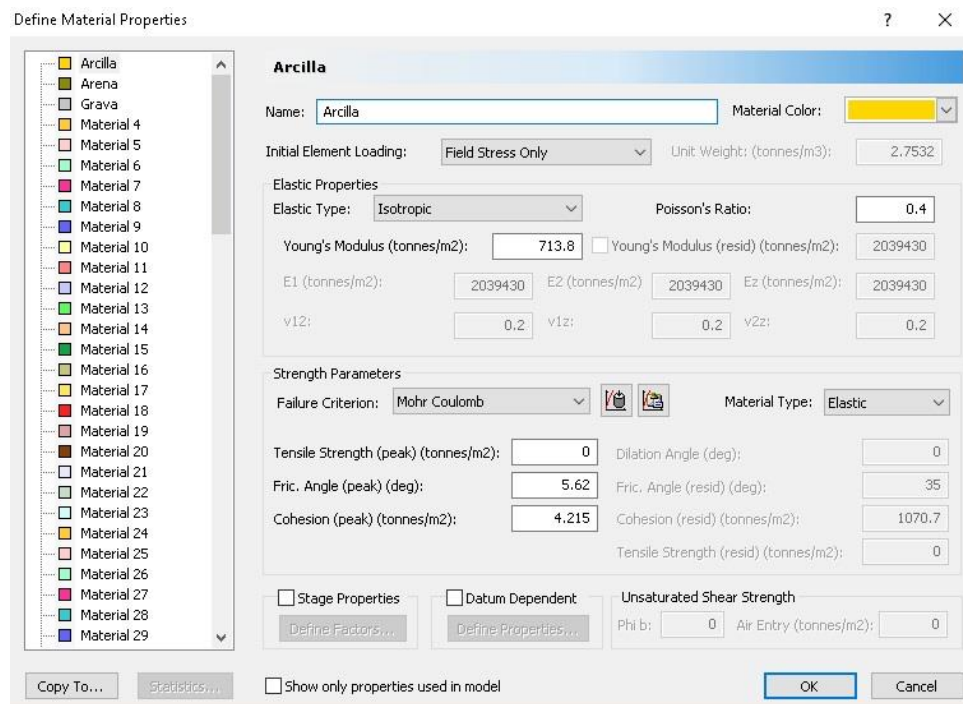


Fuente: Los autores.

A continuación, se procede a definir los materiales y se consignan los datos obtenidos de sus propiedades mecánicas previamente para cada estrato. Para el caso de la arcilla plástica, se procede a buscar en la tabla 1 según la clasificación del suelo un valor genérico del módulo de young y del coeficiente de Poisson, para los datos de ángulo de fricción interna y cohesión se recurre a los resultados obtenidos en el ensayo de corte directo.

Nota: Debido a disponibilidad de tiempo y recursos, se recurrió a valores genéricos de las propiedades del estrato de fundación y de la grava.

Figura 32: Panel de propiedades del material (arcilla) en Phase 2.



Fuente: Los autores.

Al igual que para la arcilla, se procede a definir las propiedades de la arena y la grava, repitiendo el procedimiento para los valores del módulo de Young y coeficiente de Poisson, en el caso del ángulo de fricción interna y cohesión, se buscaron valores genéricos para este tipo de suelo, los cuales fueron sacados de la tabla 2 según Karl Terzaghi y Ralph Peck 1978.

Tabla 2: Valores representativos del ángulo de fricción interna para arenas y limos.

Valores representativos de ϕ para arenas y limos

Materiales	Grados	
	Suelto	Denso
Arena, granos redondos, uniformes	27,5	34
Arena, granos angulares, bien graduados	33	45
Gravas arenosas	35	50
Arena limosa	27-33	30-34
Limo inorgánico	27-30	30-35

Fuente: Mecánica de suelos en la ingeniería práctica, 1978, Karl Terzaghi y Ralph Peck [19].

Figura 33: Panel de propiedades del material (Arena) en Phase 2.

The screenshot shows the 'Define Material Properties' dialog box for the material 'Arena'. The left sidebar lists materials from Arcilla to Material 29, with 'Arena' selected. The main panel is titled 'Arena' and contains the following fields:

- Name: Arena
- Material Color: [Yellow]
- Initial Element Loading: Field Stress Only
- Unit Weight: (tonnes/m³): 2.7532
- Elastic Properties:
 - Elastic Type: Isotropic
 - Poisson's Ratio: 0.25
 - Young's Modulus (tonnes/m²): 2243.38
 - Young's Modulus (resid) (tonnes/m²): 2039430
 - E1 (tonnes/m²): 2039430
 - E2 (tonnes/m²): 2039430
 - Ez (tonnes/m²): 2039430
 - v12: 0.2
 - v13: 0.2
 - v23: 0.2
- Strength Parameters:
 - Failure Criterion: Mohr Coulomb
 - Material Type: Elastic
 - Tensile Strength (peak) (tonnes/m²): 0
 - Dilation Angle (deg): 0
 - Fric. Angle (peak) (deg): 30
 - Fric. Angle (resid) (deg): 35
 - Cohesion (peak) (tonnes/m²): 0
 - Cohesion (resid) (tonnes/m²): 1070.7
 - Tensile Strength (resid) (tonnes/m²): 0
- Stage Properties:
- Datum Dependent:
- Unsaturated Shear Strength:
 - Phi b: 0
 - Air Entry (tonnes/m²): 0

Buttons at the bottom include 'Copy To...', 'Statistics...', 'Show only properties used in model', 'OK', and 'Cancel'.

Fuente: Los autores.

Figura 34: Panel de propiedades del material (Grava) en Phase 2.

The screenshot shows the 'Define Material Properties' dialog box for the material 'Grava'. The left sidebar lists materials from Arcilla to Material 29, with 'Grava' selected. The main panel is titled 'Grava' and contains the following fields:

- Name: Grava
- Material Color: [Grey]
- Initial Element Loading: Field Stress Only
- Unit Weight: (tonnes/m³): 2.7532
- Elastic Properties:
 - Elastic Type: Isotropic
 - Poisson's Ratio: 0.3
 - Young's Modulus (tonnes/m²): 15295.7
 - Young's Modulus (resid) (tonnes/m²): 2039430
 - E1 (tonnes/m²): 2039430
 - E2 (tonnes/m²): 2039430
 - Ez (tonnes/m²): 2039430
 - v12: 0.2
 - v13: 0.2
 - v23: 0.2
- Strength Parameters:
 - Failure Criterion: Mohr Coulomb
 - Material Type: Elastic
 - Tensile Strength (peak) (tonnes/m²): 0
 - Dilation Angle (deg): 0
 - Fric. Angle (peak) (deg): 35
 - Fric. Angle (resid) (deg): 35
 - Cohesion (peak) (tonnes/m²): 0
 - Cohesion (resid) (tonnes/m²): 0
 - Tensile Strength (resid) (tonnes/m²): 0
- Stage Properties:
- Datum Dependent:
- Unsaturated Shear Strength:
 - Phi b: 0
 - Air Entry (tonnes/m²): 0

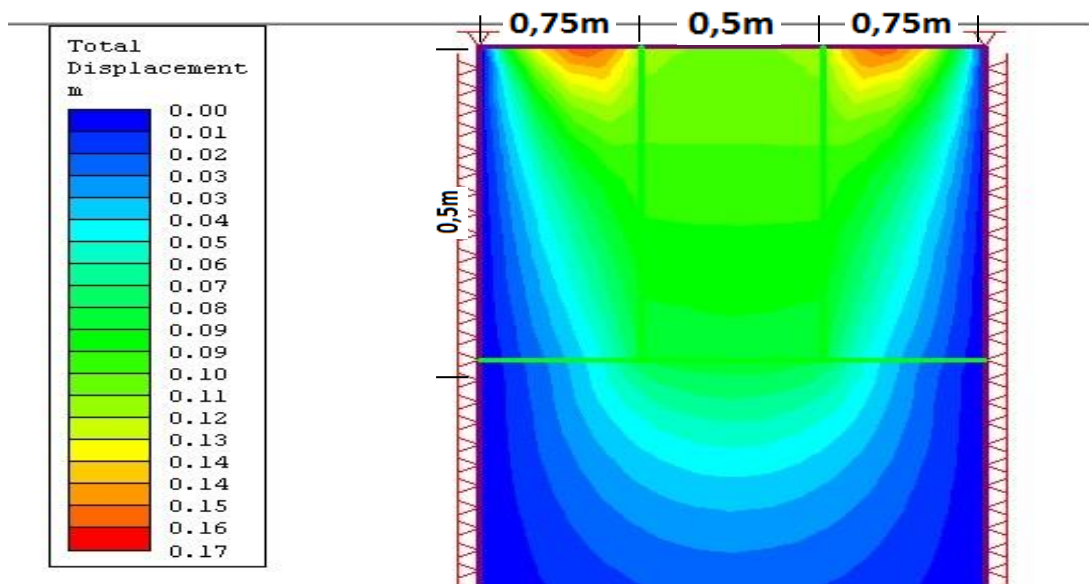
Buttons at the bottom include 'Copy To...', 'Statistics...', 'Show only properties used in model', 'OK', and 'Cancel'.

Fuente: Los autores.

Nota: Se debe tener cuidado al momento de ingresar los valores en el software con el fin no cometeré error de unidades, en este caso T/m².

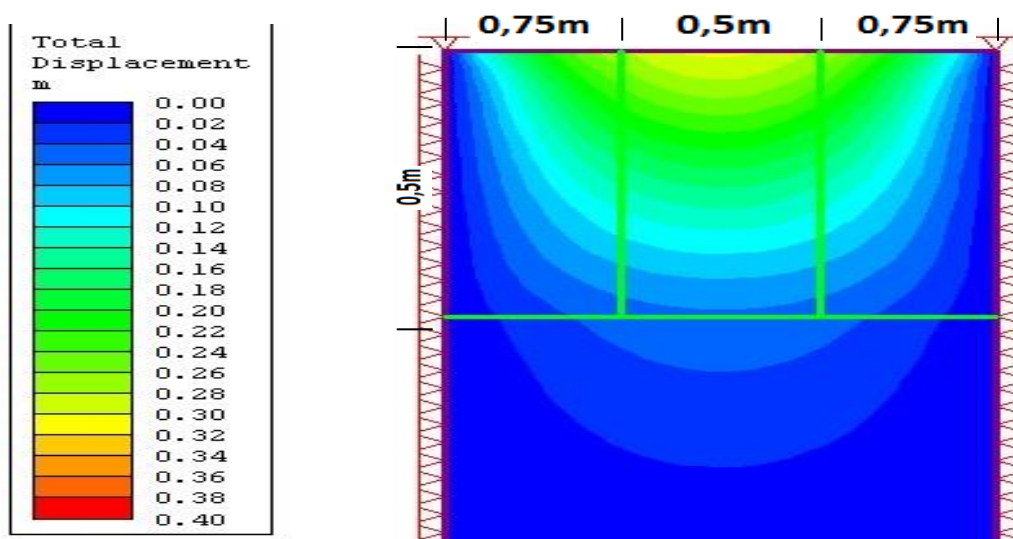
Por último, se “corre” el programa del estrato de suelo con y sin columna de grava y se obtienen gráficas para la deformación vertical obtenida.

Figura 35: Desplazamiento vertical del estrato con columna de grava.



Fuente: Los autores.

Figura 36: Desplazamiento vertical del estrato sin columna de grava.



Fuente: Los autores.

Observando las gráficas se evidencia una clara diferencia entre los desplazamientos verticales críticos (asentamiento) de la simulación sin columna de grava, figura 37, con un valor máximo de 30cm respecto a un valor de 12cm de asentamiento de la simulación con columna de grava, figura 36, en las partes donde se aplicó el esfuerzo axial.

6. MODELO ESTIMATIVO DE CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA

Antes de estimar un valor de carga ultima para un sistema de columnas de grava es necesario recurrir a un valor estimado de factores de carga de teorías clásicas para cimentaciones superficiales en suelos homogéneos, el cual permite estimar valores de referencia para N_y , N_q y N_c para distintos valores del ángulo de fricción del material (ϕ) (valores tomados de las tablas 2 a la 4; Bearing Capacity of a group of stone columns in soft soli 2014; DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000393.; 2014 Sociedad Americana de Ingeniería Civil.)

Tabla 3: Valores de N_y según el Angulo de fricción del material.

Angle ϕ (degrees)	Bearing capacity factor (N_y)						
	Present study	Vesic (1973)	Chen (1975)	Terzaghi (1943)	Soubra (1999)	Frydman and Burd (1997)	Bouassida and Jellali (2002)
15	2.90	2.65	2.94	1.52	1.95		
16	3.39	3.06	3.42	1.82	2.32		3.82
17	3.94	3.53	3.98	2.18	2.75		
18	4.51	4.07	4.61	2.59	3.25		
19	5.17	4.68	5.35	3.07	3.82		
20	5.95	5.39	6.20	3.64	4.49		
21	6.82	6.20	7.18	4.31	5.26		
22	7.83	7.13	8.32	5.09	6.15		
23	9.00	8.20	9.64	6.00	7.19		
24	10.37	9.44	11.18	7.08	8.40		
25	11.95	10.88	12.97	8.34	9.81		
26	13.78	12.54	15.05	9.84	11.46		16.61
27	15.92	14.47	17.50	11.60	13.39		
28	18.43	16.72	20.36	13.70	15.67		
29	21.37	19.34	23.72	16.18	18.35		
30	24.85	22.40	27.67	19.13	21.51	21.70	
31	28.91	25.99	32.34	22.65	25.26		
32	33.76	30.22	37.86	26.87	29.71		
33	39.47	35.19	44.41	31.94	35.02		
34	36.33	41.06	52.20	38.04	41.37		
35	54.49	48.03	61.49	45.41	49.00	54.20	
36	64.33	56.31	72.62	54.36	58.21		
37	76.22	66.19	85.98	65.27	69.35		
38	90.61	78.03	102.10	78.61	82.91		113.61
39	108.15	92.25	121.60	95.03	99.48		
40	129.63	109.41	145.30	115.31	119.84	147.00	163.5

Fuente: Bearing Capacity of a group of stone columns in soft soli 2014; DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000393.

Tabla 4: Valores de N_q según el Angulo de fricción del material.

Angle ϕ (degrees)	Bearing capacity factor (N_q)						
	Present study	Vesic (1973)	Terzaghi (1943)	Silvestri (2003)	Soubra (1999)	Chen (1975)	Bouassida and Jellali (2002)
15	3.96	3.94	4.45		3.95	3.94	
16	4.33	4.34	4.92		4.34	4.34	4.33
17	4.79	4.77	5.45		4.78	4.77	
18	5.27	5.26	6.04		5.27	5.26	
19	5.79	5.80	6.70		5.81	5.80	
20	6.39	6.40	7.44		6.41	6.40	
21	7.06	7.07	8.26		7.08	7.07	
22	7.82	7.82	9.19		7.84	7.82	
23	8.65	8.66	10.23		8.68	8.66	
24	9.59	9.60	11.40		9.62	9.61	
25	10.64	10.66	12.72	10.91	10.69	10.66	
26	11.87	11.85	14.21	12.14	11.88	11.86	11.85
27	13.19	13.20	15.90	13.36	13.23	13.20	
28	14.72	14.72	17.81	15.10	14.76	14.72	
29	16.44	16.44	19.98	16.87	16.49	16.45	
30	18.40	18.40	22.46	18.89	18.46	18.41	
31	20.63	20.63	25.28	21.20	20.70	20.64	
32	23.18	23.18	28.52	23.83	23.26	23.18	
33	26.06	26.09	32.23	26.84	26.19	26.10	
34	29.44	29.44	36.50	30.30	29.56	29.45	
35	33.27	33.30	41.44	34.29	33.44	33.31	
36	37.75	37.75	47.16	38.91	37.93	37.76	
37	42.95	42.92	53.80	44.25	43.13	42.93	
38	48.93	48.93	61.55	50.49	49.19	48.95	48.93
39	55.95	55.96	70.61	57.77	56.28	55.97	
40	64.19	64.20	81.27	66.31	64.58	64.21	64.19

Fuente: Bearing Capacity of a group of stone columns in soft soli 2014; DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000393.

Tabla 5: Valores de N_c según el Angulo de fricción del material.

Angle φ (degrees)	Bearing capacity factor (N_c)					
	Present study	Vesic (1973)	Terzaghi (1943)	Soubra (1999)	Chen (1975)	Bouassida and Jellali (2002)
15	10.96	10.98	12.86	10.99	10.98	
16	11.62	11.63	13.68	11.65	11.63	11.63
17	12.34	12.34	14.60	12.36	12.34	
18	13.08	13.10	15.12	13.13	13.11	
19	13.92	13.93	16.57	13.96	13.94	
20	14.82	14.83	17.69	14.86	14.84	
21	15.79	15.82	18.92	15.85	15.82	
22	16.88	16.88	20.27	16.92	16.89	
23	18.02	18.05	21.75	18.09	18.05	
24	19.30	19.32	23.36	19.37	19.33	
25	20.71	20.72	25.13	20.77	20.73	
26	22.24	22.25	27.09	22.32	22.26	22.25
27	23.93	23.94	29.24	24.01	23.95	
28	25.80	25.80	31.61	25.88	25.81	
29	27.86	27.86	34.24	27.95	27.87	
30	30.11	30.14	37.16	30.24	30.15	
31	32.67	32.67	40.41	32.79	32.68	
32	35.46	35.49	44.04	35.62	35.50	
33	38.60	38.64	48.09	38.79	38.65	
34	46.13	42.16	52.64	42.34	42.18	
35	46.12	46.12	57.75	46.33	46.14	
36	50.55	50.59	63.53	50.82	50.50	
37	55.69	55.63	70.01	55.91	55.65	
38	61.36	61.35	77.50	61.68	61.37	61.35
39	67.87	67.87	85.97	68.25	67.89	
40	75.31	75.31	95.66	75.77	75.34	75.31

Fuente: Bearing Capacity of a group of stone columns in soft soli 2014; DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000393.

Para estimar la capacidad de carga última admitida (q_u) se pueden tomar los factores de capacidad de carga determinados según las tablas anteriores (N_γ , N_q y N_c). Se ha establecido la siguiente ecuación para determinar la capacidad de carga última de las columnas de gravas:

$$q_u = \frac{1}{2} \gamma_{comp} B N_\gamma + q N_q + C_{comp} N_c$$

$$Q_{adm} = q_u / FS$$

Donde; γ_{comp} = peso unitario del suelo compuesto (columna de grava).

γ = peso unitario del suelo arcilloso blando.

C_{comp} = cohesión del suelo compuesto (columna de grava).

C = cohesión del suelo arcilloso blando.

Donde los valores de C_{comp} , γ_{comp} y φ_{comp} , son la cohesión, peso unitario y ángulo de resistencia al corte equivalentes al sistema suelo columna (sistema compuesto), el valor del FS corresponde a un valor conservador de 4.

$$C_{comp} = A_s C_s + (1 - A_s) C_c$$

$$\gamma_{comp} = A_s \gamma_s + (1 - A_s) \gamma_c$$

Y A_s = tasa de remplazo

$$A_s = A_{col}/S^2$$

Donde; A_{col} sección transversal de la columna y S es el espaciamiento entre columnas.

C_s = cohesión del material de la columna de grava valor que se tomó como 0. Por corresponder a un material compuesto netamente de gravas.

C_c = cohesión del material arcilloso, cada valor de cohesión se toma de resultados de ensayos de corte directo en laboratorio.

Tabla 6: Calculo de capacidad de carga máxima del suelo mejorado con columnas de grava.

Diámetro	0,500 m
Área	0,196 m ²
A_s	0,049 m ²
Separación	2,000 m
Angulo fricción	5,620 grados
γ_s	2,200 T/m ³
γ_c	1,300 T/m ³
C_s	0,000 T/m ²
C_c	4,130 T/m ²
N_γ	0,731
N_q	1,480
N_c	4,114
Profundidad	2,000 m
q	0,330 T/m ²
B	0,500 m
$C_{comp} = A_s C_s + (1 - A_s) C_c$	3,927 T/m ³
$\gamma_{comp} = A_s \gamma_s + (1 - A_s) \gamma_c$	1,344 T/m ³
$qu = \frac{1}{2} \gamma_{comp} B N_\gamma + q N_q + C_{comp} N_c$	16,890 T/m ²
Qadm	4,223 T/m ²

Fuente: Los autores.

7. ANÁLISIS Y RESULTADOS

7.1. Ensayo De Limite Líquido y Limite Plástico

Resultados obtenidos de ensayo límites líquido y plástico de la arcilla, mostrados en la tabla 7.

Tabla 7: Resultados limite líquido y plástico de la arcilla.

Limite Liquido
57.868
Índice de plasticidad
48.88

Fuente: Los autores.

Según lo anterior, se determinó que la muestra ensayada era una arcilla de alta plasticidad CH, lo que permitió el uso de la Arcilla como material para la presente tesis.

7.2. Ensayo De Proctor Estándar

Tabla 8: Proctor estándar de la arcilla.

(%) humedad	17.784	(%)
Densidad	1.63	g/cm ³

Fuente: Los autores.

La humedad utilizada en el ensayo de proctor estándar elegida fue de 17.84%, valor de humedad el cual será utilizado para ensayos de corte directo, consolidación y para la compactación del material en el modelo.

7.3. Ensayo De Consolidación En Laboratorio

Resultados finales del ensayo de consolidación (relación de vacíos vs presión).

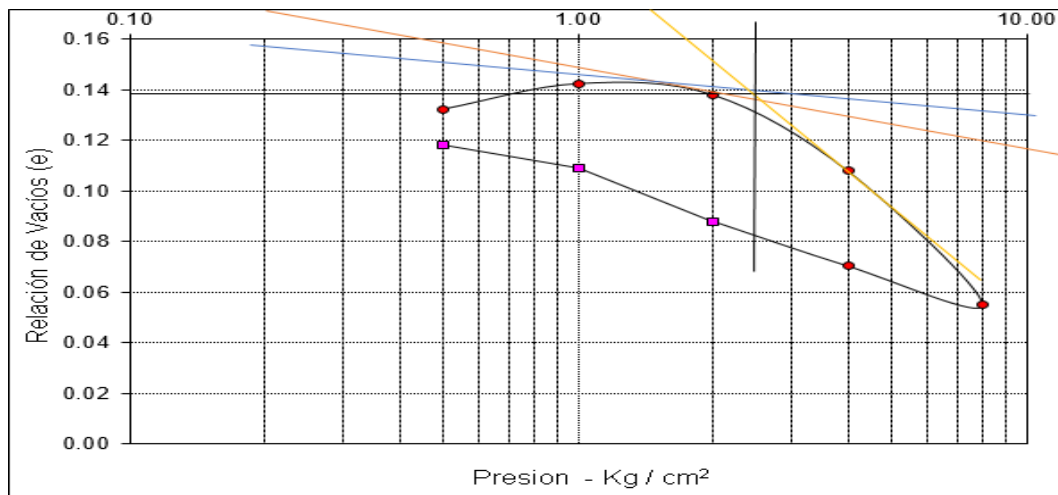
Tabla 9: Tiempo de consolidación.

Coeficiente de consolidación	
T90	0.84 min
t90	90.25 min
Hlab	2.53 in
Cv=	0.059

Fuente: Los autores.

Con lo anterior se calcula el tiempo que tardara el modulo en llegar al 90% de su consolidación, dando como resultado un tiempo de **40 días** aproximadamente (39.43días).

Figura 37: Relación de vacíos vs Densidad. Ensayo consolidación de la arcilla.



Fuente: Los autores.

Teniendo como resultado una presión de pre consolidación el valor de 2,2 Kg/cm².

7.4. Ensayo De Corte Directo

Una vez realizado en ensayo de corte directo a la arcilla, se procedió a analizar los datos obtenidos los cuales llevaron al resultado de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna, los cuales son colocados en la tabla 6.

Tabla 10: Resultados de ensayo corte directo para la arcilla.

Pendiente	0,0984
θ Angulo de fricción interna	5,62
C (Cohesión)	0,4283

Fuente: Los autores.

7.5. Ensayo De Densidad Relativa de la arena

Tabla 11: Densidad relativa de la arena.

Densidad Húmeda	3.01	g/cm ³
------------------------	------	-------------------

Fuente: Los autores.

Valor utilizado para la compactación en el modelo, el cual se buscó lograr al menos un 90% de esta.

7.6. Ensayo De Permeabilidad

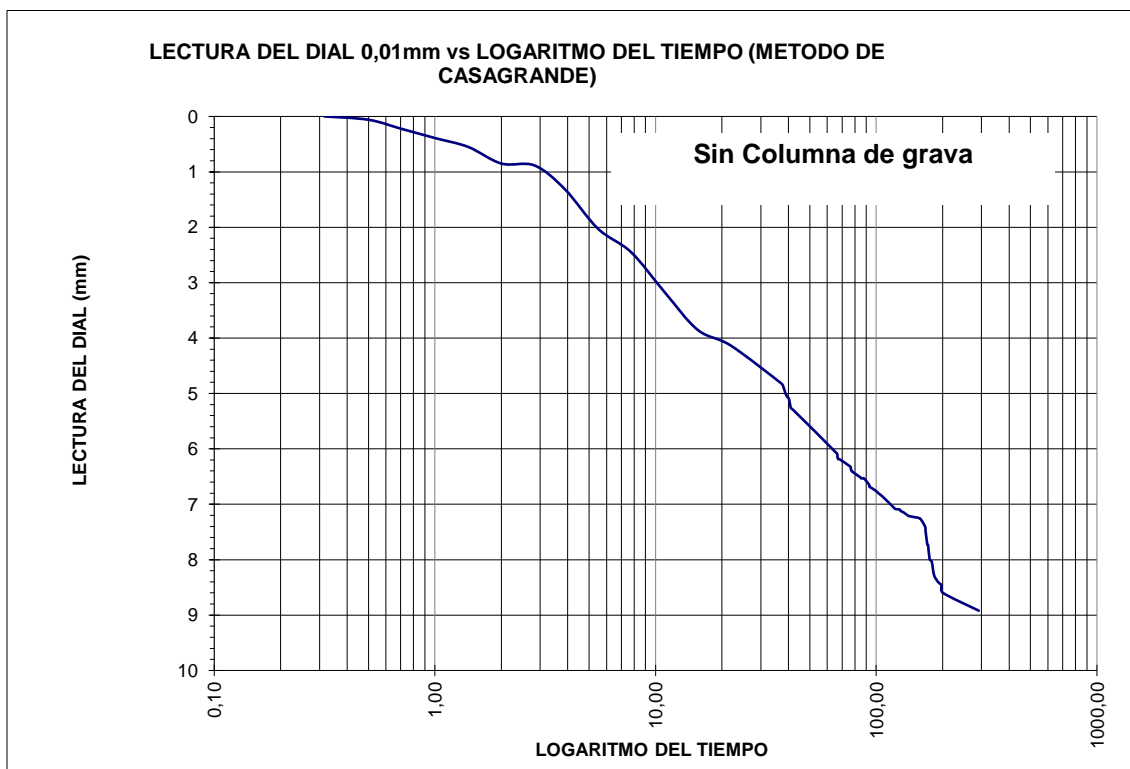
A lo largo del ensayo realizado en laboratorio se procedió a dejar instalado el equipo durante 15 días, tiempo durante el cual no se percibió cambios en el nivel ya que la cantidad de agua que perdió el ensayo fue muy mínima con un valor de 1ml de agua en el tiempo de ensayo.

7.7. Resultados experimentales de asentamiento

Una vez tomado los datos del asentamiento experimental hasta el punto en que los valores de deformación entre medida y medida fuesen mínimos. Para esto se tabularon los datos y se representaron gráficamente mediante el método de Casagrande y Taylor para los dos casos estudiados, suelo sin tratar y suelo tratado con el método de columnas de grava.

- Suelo sin mejorar:

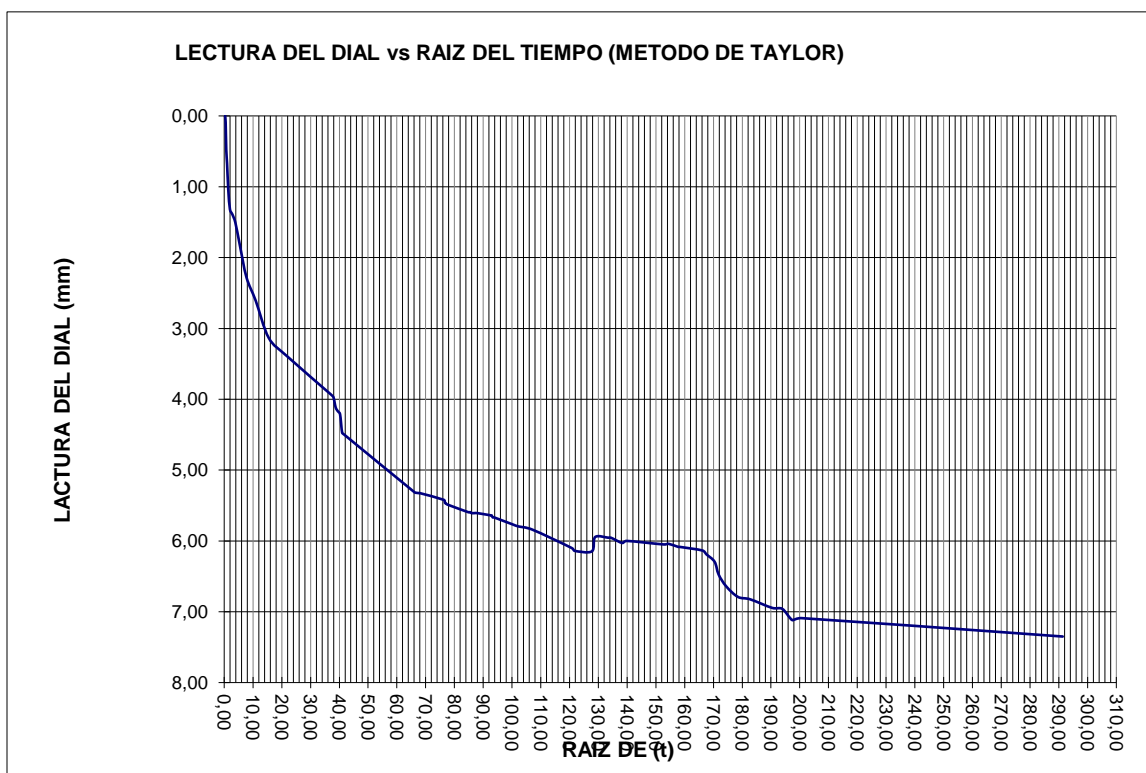
Figura 38: Grafica de asentamiento experimental sin columna de grava, método Casagrande.



Fuente: Los autores.

Fuente: Los autores.

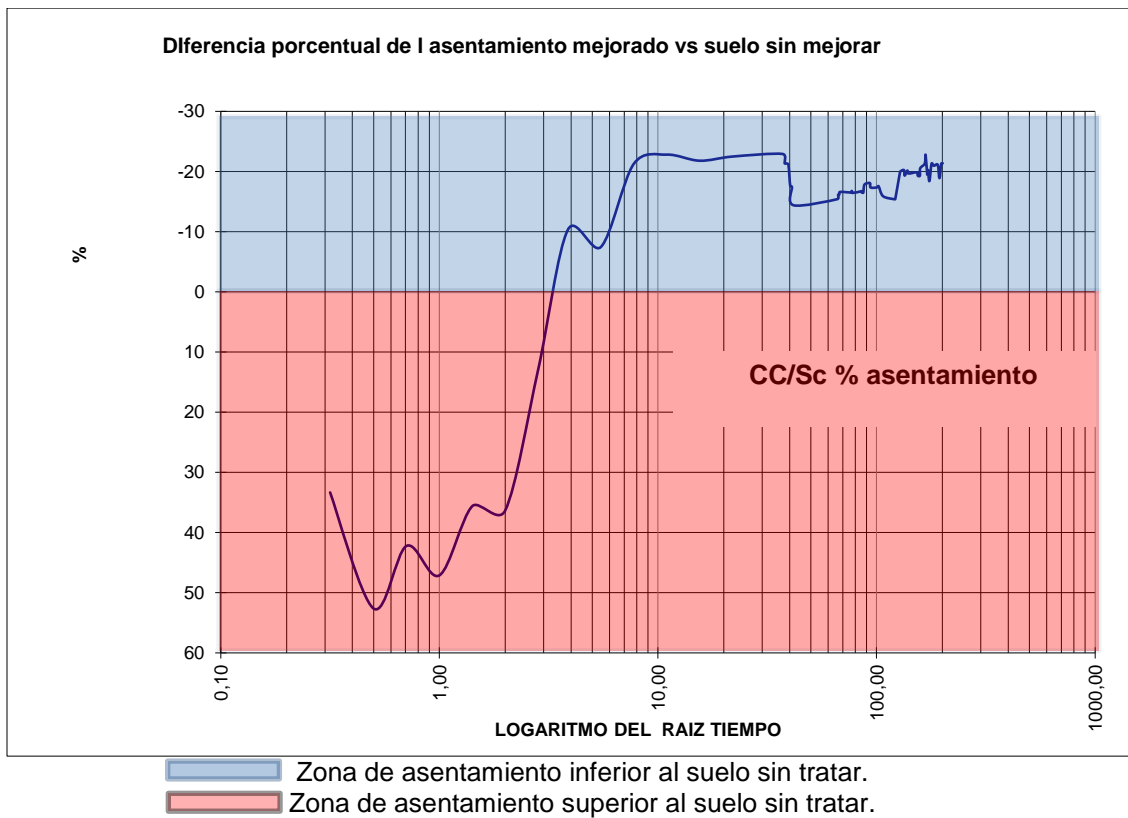
Figura 41: Grafica del asentamiento experimental



Fuente: Los autores.

Según lo anterior, se procedió a graficar la diferencia, expresado en porcentaje, del suelo mejorado con la columna de grava respecto al suelo sin tratar para una mejor interpretación del comportamiento de asentamiento del suelo mejorado respecto al suelo sin tratar. Apreciando una valores de asentamiento mayores en los primeros instantes de aplicación de la carga. Después de un tiempo t , (aproximadamente 3.5 minutos) el asentamiento del suelo mejorado empieza a ser menor respecto al suelo sin mejorar, llegando hasta diferencias porcentuales de 25% en su valor para el mismo instante de tiempo.

Figura 42: Grafica comparativa de asentamiento del suelo mejorado respecto al suelo sin mejorar.



Fuente: Los autores.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalizado los datos de la presente tesis se concluyó que:

- Las columnas de grava según los resultados obtenidos del desarrollo experimental evidencian una disminución clara en los asentamientos producidos por la carga axial, mostrándose diferencias del asentamiento del suelo mejorado con columna de grava respecto al suelo sin mejorar de hasta un 25% de reducción, pero por contraparte, se evidencia claramente un valor mayor de la columna de grava en los asentamientos inmediatos. Lo anterior se puede atribuir a que, al momento de aplicar la carga, la grava se incrusta en el suelo de fundación hasta llegar a un estado en que este trabaja como un material compuesto entre grava y arcilla.
- Visualmente, al momento de saturar el estrato y a lo largo del ensayo, se evidencio que la columna de grava actúa como estructura drenante, permitiendo el paso del agua directamente al suelo de apoyo, lo cual, puede influenciar en la profundidad a la cual se pueda encontrar el nivel freático del terreno tratado. También se evidencio al momento de desmontar el modelo, una mayor rapidez en la perdida de humedad de la arcilla en la zona donde se encontraba la columna de grava, en comparación al resto del estrato, esto, a pesar de no haber sido estudiado por el trabajo de grado, evidencia de que al momento de ser aplicado en la vida real, la columna contribuye no solo a mejorar la capacidad portante del terreno.
- La diferencia de los valores de asentamiento obtenidos experimentalmente respecto a los obtenidos por medio del software de modelado Phase2, son considerablemente menores, esto demuestra que, a pesar de que en los dos casos se presenta una mejora evidente en los asentamientos verticales, la columna se afecta de muchas otras variables que al momento de modelar no se consideran y por consiguiente, al momento de diseñar, genera errores de moderada magnitud respecto a los asentamientos que se esperan obtener a través del software a los que se producen realmente. Por otra parte, dichas diferencias también se pueden atribuir a que al momento de construir el modelo para el experimento, el modulo en el cual se trabajó, no contaba con la resistencia suficiente para soportar los esfuerzos debido a la compresión de cada material (arcilla y arena) del modelo, por consiguiente es notoria la presencia de deformaciones en los lados del módulo que no se tuvieron en cuenta al momento de comparar los resultados obtenidos, además de la suposición de propiedades mecánicas de los estratos de arena y grava.
- En el modelado del estrato a través del software phase 2, se aprecia gráficamente como podrían presentar los asentamientos del estrato debido a una carga axial, mostrando en cada caso magnitudes altas de asentamiento en la zona donde se encuentra el material arcilloso, por consiguiente, se debe asegurar una mejor distribución de esfuerzos en el estrato de tal forma que el suelo a mejorar y la columna de grava se conviertan en un estrato compuesto en el cual las deformaciones

- producidas por el esfuerzo sea el mismo en tanto en la columna de grava como en la arcilla.
- Se aprecia que parte de las deformaciones debidas a la carga axial se transmiten al suelo de fundación de la columna (arena), apreciando asentamientos de 8-12cm en el área de contacto columna-arena, asentamientos similares a los que se producen en la parte superficial de la columna 12-16cm, esto demuestra que a pesar de solo estar confinada por el estrato arcilloso, la columna de grava trabaja no solo con un elemento drenante, sino como elemento trasmisor de cargas a estrato de fundación, dándole a este último un papel fundamental al momento de reducir la magnitud de los asentamientos.

Recomendaciones:

- Se debe asegurar que el modulo en el cual se va a realizar el modelo a escala, cuente con la rigidez necesaria para soportar los esfuerzos de expansión del material, esto con el fin de evitar aumentar el error al momento de comparar los datos obtenidos en campo con los datos de laboratorio y datos obtenido por medio de la modelación,
- Conservar de ser posible las condiciones del estrato a mejorar iguales a las que posee en campo, para lograr resultados específicos de mejora para el proyecto al cual se quiere aplicar.
- Efectuar el experimento en un lugar donde se pueda tener un monitoreo constante en la toma de datos del valor de asentamiento.
- Realizar el experimento sometiendo el modelo siempre en condición saturada, con el fin de evaluar la efectividad del método en el peor escenario posible.
- Separar los modelos para garantizar que los esfuerzos de un modelo no influyan en el otro.
- Realizar ensayos de caracterización a los estratos de apoyo de la columna y al agregado con el cual se construirá esta.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Guía de Cimentaciones, Guía de cimentaciones en obras de carreteras, Ministerio de Fomento: Dirección General de Carreteras, 2009.
- [2] H. D. C. Alfonso Rico, La Ingeniería De Suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas, Mexico: Noriega Editores, 2001.
- [3] L. F. Orozco, *Efectos De Los Asentamientos En la Estructura*, Bogotá.
- [4] B. M. Das, Fundamentos De Ingeniería Geotécnica, Mexico: Cengage learning, 2015.
- [5] H. A. O. Pineda, *INYECCIÓN DE SUELO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE JET*, Guatemala, 2011.
- [6] R. Segurado, *Los Suelos*, 2005.
- [7] M. MÉXICO, *Drenes Verticales*, Mexico Df, 2012.
- [8] Rebas, *ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL*, 2006.
- [9] J. P. Valcarcel, *Mejora Y Consolidación De Terrenos*, La Coruña.
- [10] J. A. J. Salas, Geotecnia y cimientos III cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia, Madrid, 1980.
- [11] C. E y M.-R. C, Columnas de grava mediante vibro-sustitución, Puerto Vallarta (Mexico): Technical Paper, 2014.
- [12] A. M y H. I, Influence of pressure level and relative density on friction angle of gravel in vibrated stone columns, Braunschweig: Pfahl Symposium, 2007.
- [13] B. R.D y B. R.C, Design and construction of stone columns, Washington D.C: FHWA, 1983.
- [14] K. K y K. F, Ground improvement by deep vibratory methods, Spon press, 2010.
- [15] C. A. Q. Ortega, Mejoramiento de suelos en base a los métodos de vibroflotación y vibrosustitución, Valdivia, 2008.
- [16] M. Gunaratne, The Foundation Engineering Handbook, New York: Taylor and Francis, 2006.
- [17] S. d. cimentación, *Vibro Reemplazo*, Bogotá, 1991.
- [18] S. d. Cimentación, *Vibro-Flotación*, Buenaventura, 1996.
- [19] K. Terzaghi y Ralph B. Peck, Mecánica de suelos en la ingeniería práctica, El ateneo S.A., 1978.
- [20] R. e. tiempo, «Soluciones De Cimentación Para Obras,» *El Tiempo*, 8 7 1995.
- [21] N. L. Sánchez, Licuefacción de suelos, 2013.
- [22] S. Ruzafa, «Mejora del suelo con columnas de grava en vía seca,» 2006.
- [23] P. A. R, «Solución Para Suelos Columnas de Grava,» *Gentileza pilotes terratest*, pp. 2-4, 2014.
- [24] H. J. Priebe, «The design of vibro replacement,» *Ground Engineering*, pp. GT 07-13 E, 1995.
- [25] J. A. Pollan, Diseño basado en técnicas de fiabilidad del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava, Madrid, 2014.

- [26] P. H-J, Desing of vibro replacement: The aplication of Priebe's method to extremely soft soils, floating foundations and proof against slope or embarkment failure, *Ground Engineering*, 2005.
- [27] A. I. C. HERNÁNDEZ, *ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN MODELO*, santander, 2009.
- [28] Fang, de *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Nueva York, 2006, p. 193.
- [29] C. E y C. J, «Análisis numérico de los efectos de ejecucion de columnas de grava,» 2013.
- [30] C. B. Chávez, *Modificación de suelos por el método de vibro-sustitución o vibro-compactación aplicado en puertos marítimos*, Ciudad de mexico, 2005.
- [31] A. D. C. J. C. Cesar Sagaseta, «Modelización De Columnas De Grava,» de *Simposio sobre reconocimiento, tratamiento y mejoramiento del terreno*, Cantabria, 2016.
- [32] J. Castro y C. Sagaseta, «Consolidation around stone columns. influence of column deformation,» *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, pp. Vol 33: 851-877, 2009.

Anexos

ANEXO A: ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN EN LABORATORIO

Ensayo ejecutado en laboratorio con la muestra de suelo óptima para el modulo.

- Dimensiones de muestra usada en el equipo de consolidación

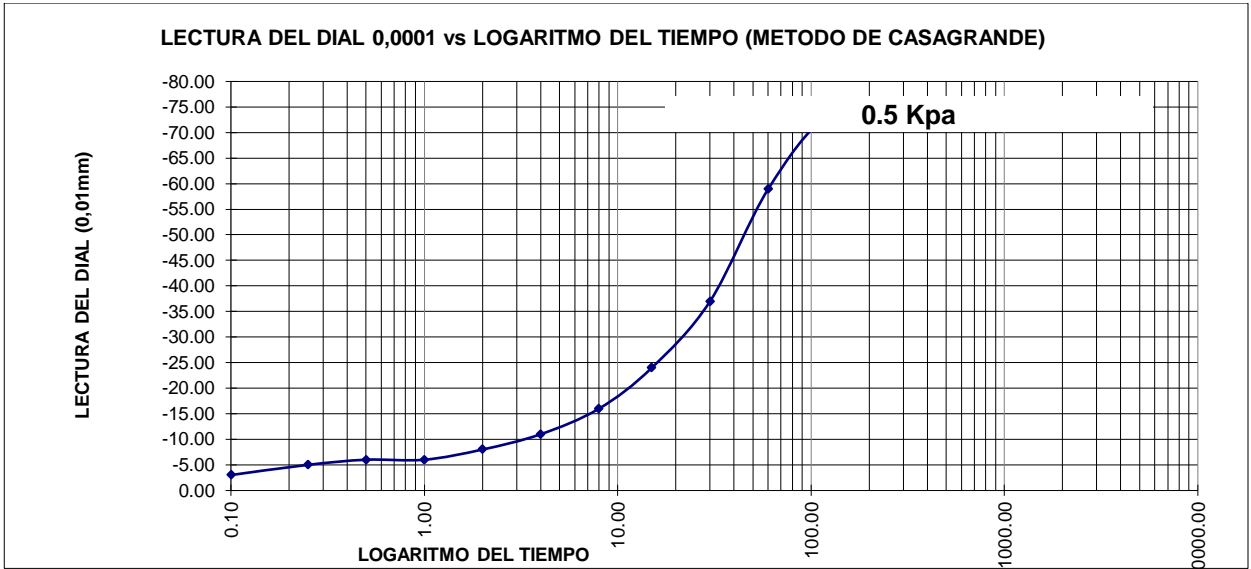
	INICIAL
Diámetro, D (cm.)	6.30
Altura, H (cm.)	2.00
W.Anillo (gr.)	71.60
W.Anillo + Muestra (gr.)	210.94
W.Bloqué.+ Piedra porosa(gr.)	293.80

- Lecturas del ensayo con los diversos ciclos de carga

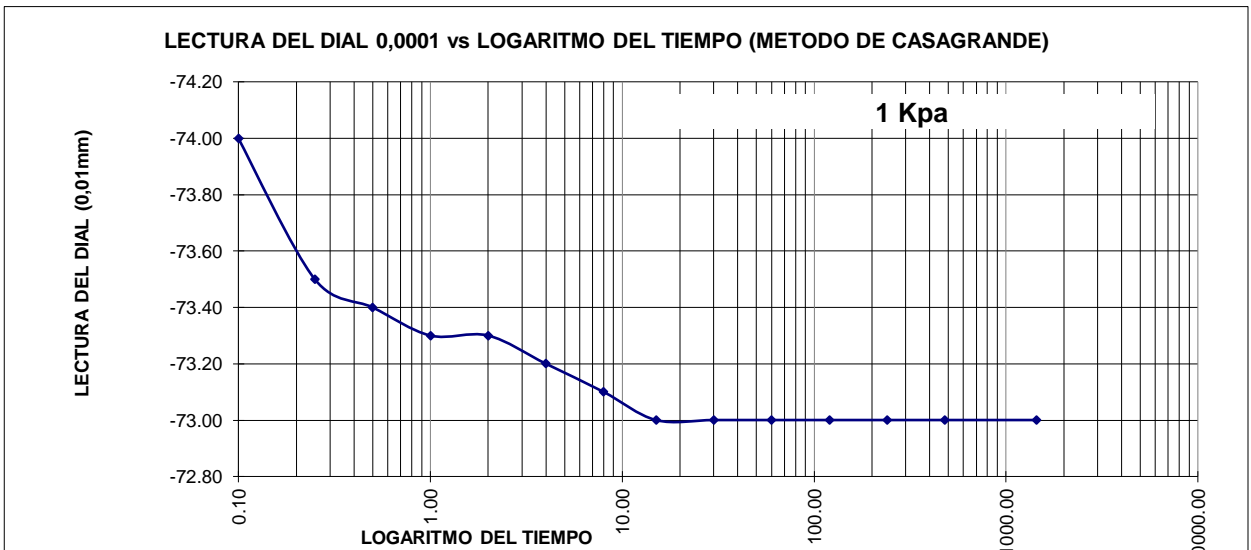
TIEMPO (t)		LECTURA DEL DIAL				
Minutos	Raíz de (t)	0.5 Kpa	1 Kpa	2 Kpa	4 Kpa	8 Kpa
			-73.00	-73.00	-42.00	167.00
0.10	0.32	-3.00	-74.00	-72.00	33.00	250.00
0.25	0.50	-5.00	-73.50	-72.00	38.50	268.00
0.50	0.71	-6.00	-73.40	-72.00	44.00	276.00
1.00	1.00	-6.00	-73.30	-71.20	51.00	277.00
2.00	1.41	-8.00	-73.30	-71.00	58.00	286.00
4.00	2.00	-11.00	-73.20	-70.90	66.00	298.00
8.00	2.83	-16.00	-73.10	-70.20	76.00	313.00
15.00	3.87	-24.00	-73.00	-70.00	84.00	328.00
30.00	5.48	-37.00	-73.00	-68.00	98.50	351.00
60.00	7.75	-59.00	-73.00	-66.00	112.00	381.00
120.00	10.95	-73.00	-73.00	-62.50	124.00	403.00
240.00	15.49	-73.00	-73.00	-55.00	134.00	425.00
480.00	21.91	-73.00	-73.00	-49.00	146.00	450.00
1440.00	37.95	-73.00	-73.00	-42.00	167.00	534.00

FASE DE CARGA

- Lectura método de Casagrande con carga de 0.5 kpa

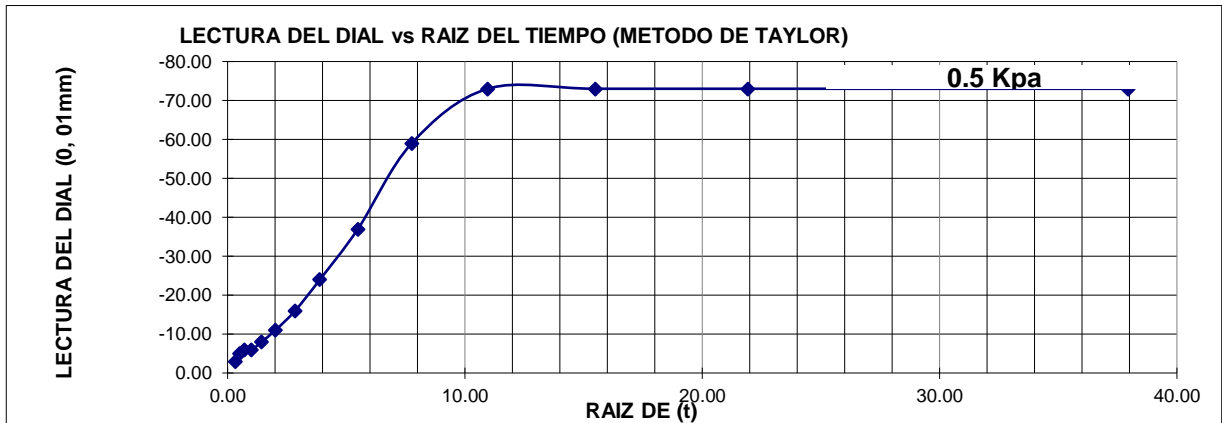


- Lectura del método de Casagrande con carga de 1kpa

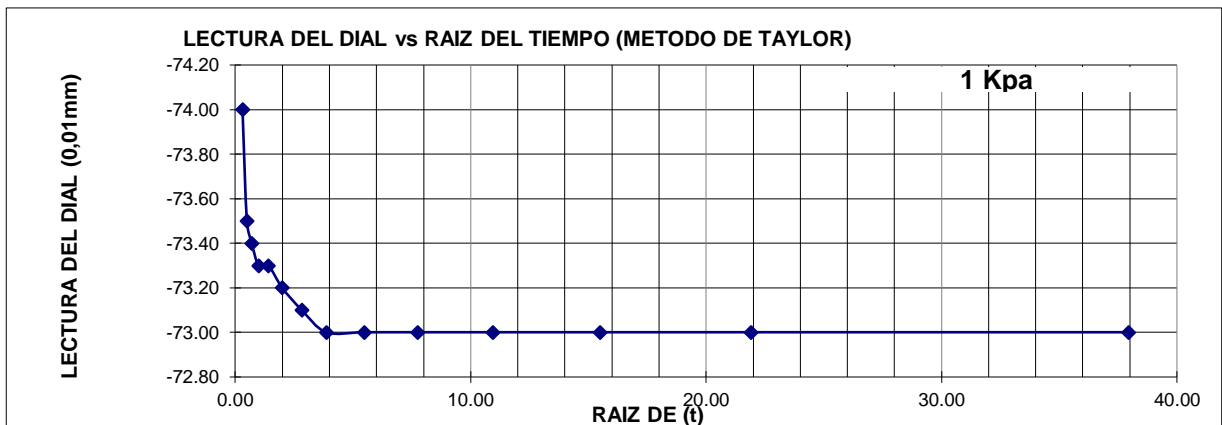


- Lectura del método de Casagrande con carga de 2kpa

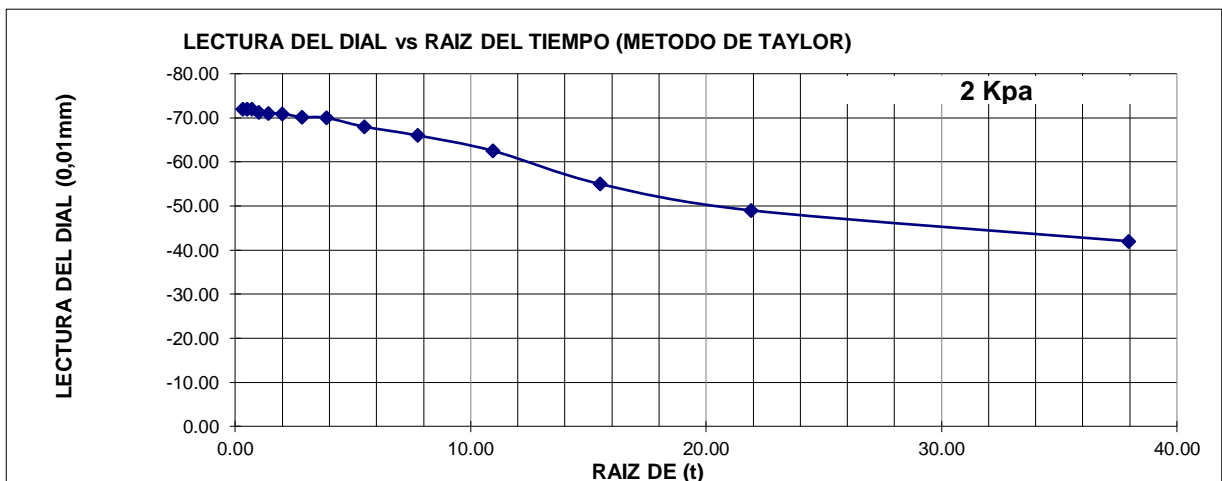
- Lectura del método de Taylor con carga de 0.5 kpa



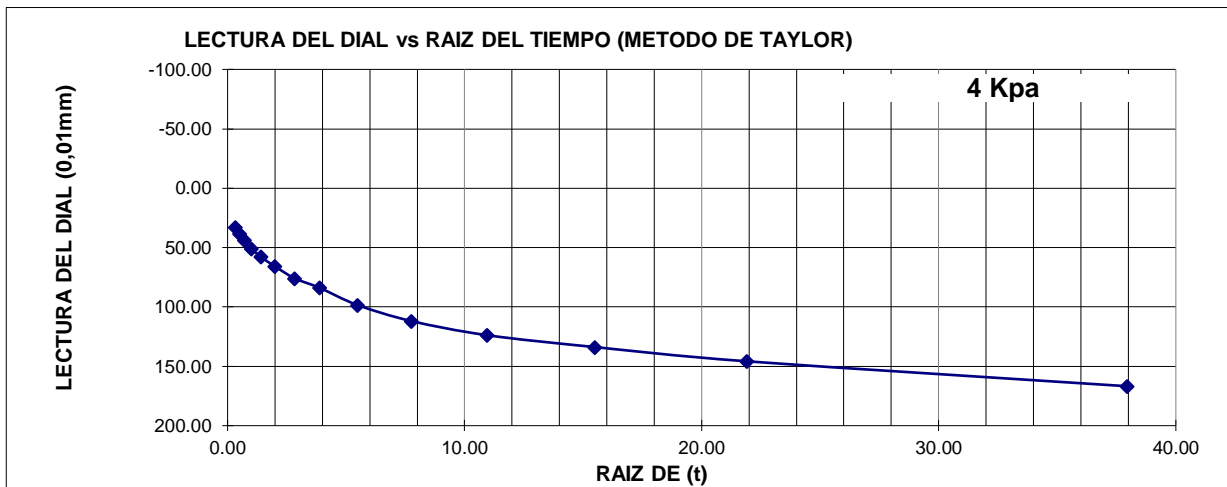
- Lectura del método de Taylor con carga de 1kpa



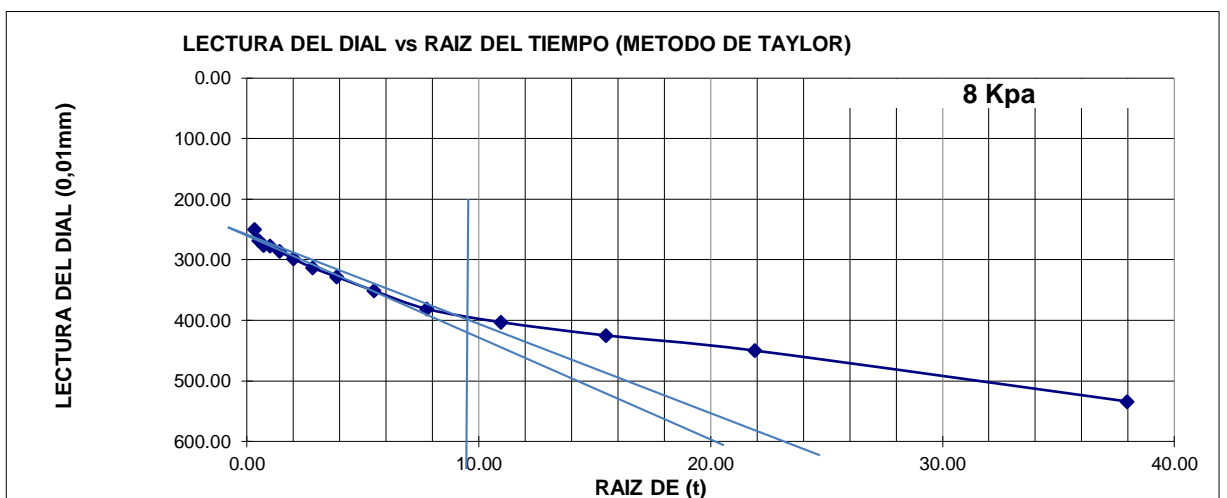
- Lectura del método de Taylor con carga de 2kpa



- Lectura del método de Taylor con carga de 4 kpa



- Lectura del método de Taylor con carga de 8 kpa



RESULTADOS

- Contenido de humedad

PESO DE LA MUESTRA		Final
Peso anillo+muestra húmeda	g	210.28
Peso anillo+muestra seca.	g	178.91
Peso anillo	g	71.60
Peso del agua	Ws	31.37
Peso suelo seco	g	107.31
Humedad	%	29.23

- Grado de saturación

GRADO DE SATURACIÓN %	
Inicial	100
Final	100

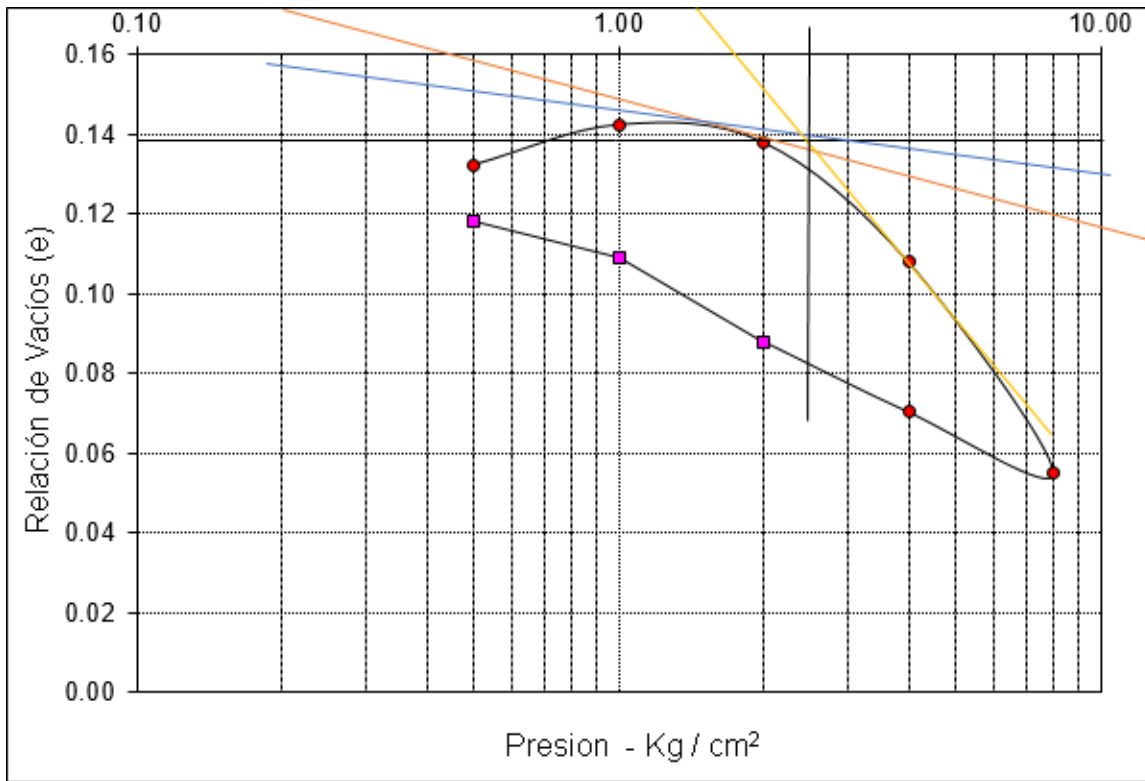
Gs= 2.43

Carga	Lectura		Altura	Relación de
Aplicada	Final	2H	Vacios (mm)	Vacios
(kg/cm ²)	(mm.)	(mm)	2H - 2Ho	e
0	0	0.7874	0.1576	0.2503
0.50	-0.0003	0.7877	0.1579	0.2508
1.00	-0.0073	0.7947	0.1649	0.2619
2.00	-0.0042	0.7916	0.1618	0.2570
4.00	0.0167	0.7707	0.1409	0.2238
8.00	0.0534	0.7340	0.1042	0.1655
4.00	0.0428	0.7446	0.1148	0.1824
2.00	0.0305	0.7569	0.1271	0.2019
1.00	0.0158	0.7716	0.1418	0.2252
0.50	0.0094	0.7780	0.1482	0.2354

Altura de solidos 2h0=1.5996; 0.628 mm

Relación de vacíos inicial	0.2503
Relación de vacíos final	0.2019
Presión de pre consolidación - Pc	2.20

- Relación de vacíos



ANEXO B: ENSAYO LIMITE LÍQUIDO Y LIMITE PLÁSTICO

- Ensayos ejecutados en laboratorio con el suelo que cumple las características necesarias para el método.

Limite líquido

	W Caps+Ma (gr)	W caps (gr)	Wmat (gr)	Wmat Sec + W cap (gr)	mat W sec(gr)	W agua(gr)	#Golpes	%agua
capsula 1	35.2	21.4	13.8	30.6	9.2	4.6	33	50.00
capsula 2	39.0	27.7	11.3	34.5	6.8	4.5	30	66.18
capsula 3	40.5	27.55	12.95	35.9	8.35	4.6	22	55.10

Limite liquido	
capsula 1	51.71
capsula 2	67.65
capsula 3	54.24

W caps + ma: Peso de la capsula + peso del material

W caps: Peso de la capsula

Wmat: Peso del material

Wmat sec + cap: Peso del material seco + peso de la capsula

Wmat sec: Peso del material seco

W agua: Peso del agua

Limite plástico

	W Caps+Ma (gr)	W caps (gr)	Wmat (gr)	Wmat Sec + W cap(gr)	mat W sec(gr)	W agua (gr)	%agua
capsula 4	48.1	41	7.1	47.1	6.1	1	16.39
capsula 5	34	27.5	6.5	33	5.5	1	18.18

Índice de plasticidad
48.89

W caps + ma: Peso de la capsula + peso del material

W caps: Peso de la capsula

Wmat: Peso del material

Wmat sec + cap: Peso del material seco + peso de la capsula

Wmat sec: Peso del material seco

W agua: Peso del agua

- Ensayos ejecutados en laboratorio con distintos tipos de suelo de tal forma que se lograra determinar cuál suelo cumple con las características requeridas.

Suelo tipo 1 ubicado en lote adyacente a la vía Piedecuesta-Floridablanca.

Limite líquido

	W Caps+Ma (gr)	W caps (gr)	Wmat Wmat (gr)	Wmat Sec + cap(gr)	W mat sec(gr)	W agua (gr)	#Golpes	%agua
c1	44.7	27.6	17.1	39.2	11.6	5.5	28	47.41
c2	48.3	27.4	20.9	41.6	14.2	6.7	24	47.18
c3	48.8	27.8	21	41.9	14.1	6.9	20	48.94

LL= 46.95

Limite plástico

	W Caps+Ma (gr)	W caps (gr)	Wmat Wmat (gr)	Wmat Sec + cap(gr)	W mat sec(gr)	W agua (gr)	#Golpes	%agua
c1	34.7	27.9	6.8	33.2	5.3	1.5		28.30
c2	27	21.3	5.7	25.8	4.5	1.2		26.67

LP= 28.30

IP= 19.60

Suelo no cumple.

Suelo tipo 2 ubicado en el lote adyacente al anillo vial Floridablanca Giron.

Limite líquido

	W Caps+Ma (gr)	W caps (gr)	Wmat (gr)	Wmat Sec + cap(gr)	W mat sec (gr)	W agua (gr)	#Golpes	%agua
c1	42	21.1	20.9	38	16.9	4	28	23.67
c2	42.9	20.7	22.2	38.4	17.7	4.5	26	25.45
c3	47.4	27.1	20.3	43.6	16.5	3.8		23.03

Limite plástico

	W Caps+Ma (gr)	W caps (gr)	Wmat (gr)	Wmat Sec + cap(gr)	W mat sec (gr)	W agua (gr)	#Golpes	%agua
c1	35.7	27.8	7.9	34.1	6.3	1.6		25.40
c2	36.2	27.4	8.8	34.5	7.1	1.7		23.94

IP
0.753

Suelo no cumple.

Evidencia fotográfica de ensayos.



ANEXO C: PROCTOR ESTÁNDAR

Datos obtenidos en el laboratorio del ensayo proctor estándar de la arcilla.

Humedad		
peso capsula	27.08	gr
peso muestra + cap	69.14	gr
peso seco + capsula	61.66	gr
peso seco	34.58	gr
peso agua	7.48	gr
(%) humedad	17.784	(%)
Volumen del molde	5301.48	cm ³
Peso molde+muestra	10400	gr
Peso muestra	8617	
Densidad	1,63	g/cm ³

Evidencia fotográfica:



ANEXO D: DENSIDAD RELATIVA

Ensayo de densidad relativa realizado en laboratorio de la arena.

Compactación		
Numero de capas	5	
Numero de golpes	250	
Peso del suelo + molde	10.47	kg
Peso del molde	4.06	kg
Volumen del molde	2130	cm ³
Peso del suelo compactado	6410	g
Densidad Húmeda	3.01	g/cm ³

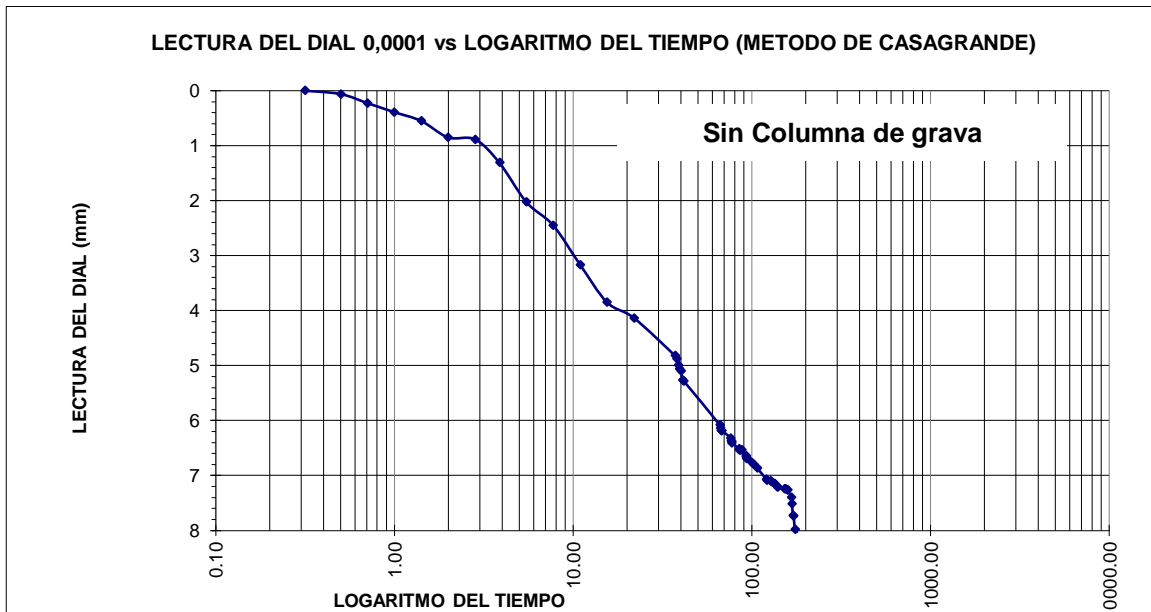
ANEXO E: LECTURAS DE ASENTAMIENTO DE SUELO EN EL MODULO

Datos obtenidos en los ensayos ejecutados en el módulo con las características previamente establecidas, de acuerdo a 4 deformímetros ubicados estratégicamente sobre la superficie del suelo.

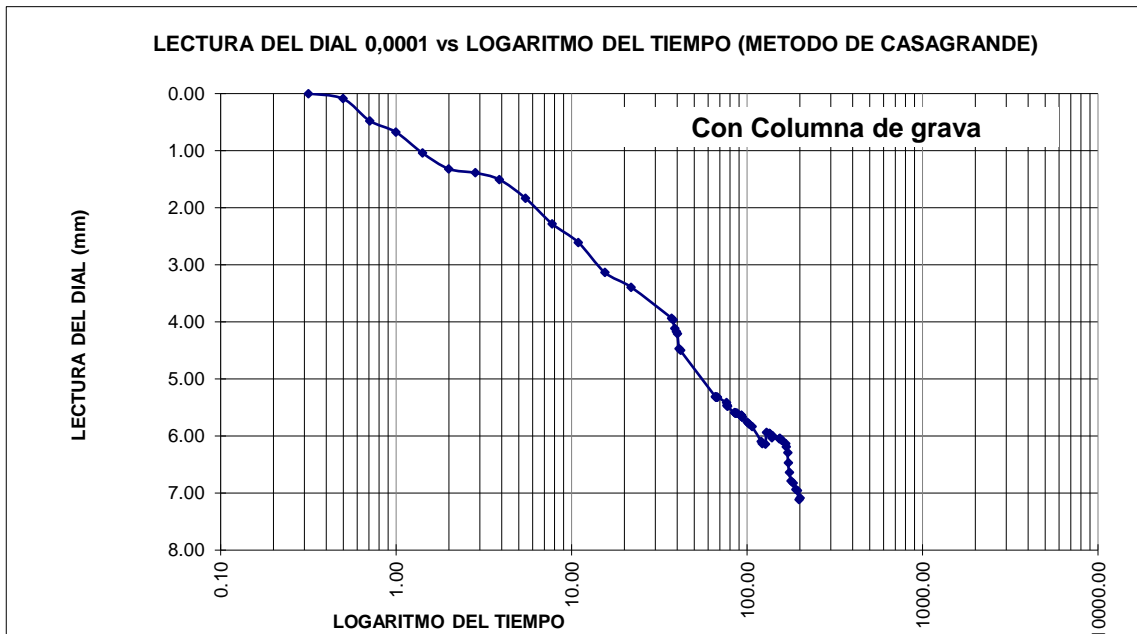
T(minutos)	Suelo sin mejorar		Suelo mejorado	
	Lectura 1 (0.01mm)	Lectura 2 (0.01mm)	Lectura 3 (0.01mm)	Lectura 4 (0.01mm)
0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	0.06	0.06	0.06	0.12
0.50	0.30	0.15	0.30	0.65
1.00	0.47	0.31	0.47	0.88
2.00	0.70	0.40	0.70	1.38
4.00	1.18	0.52	1.18	1.46
8.00	1.21	0.56	1.21	1.57
15.00	1.41	1.21	1.41	1.60
30.00	1.84	2.21	1.84	1.83
60.00	2.37	2.53	2.37	2.19
120.00	2.82	3.51	2.82	2.40
240.00	3.51	4.19	3.51	2.76
480.00	3.89	4.38	3.89	2.90
1380.00	4.46	5.18	4.46	3.41
1440.00	4.52	5.24	4.52	3.42
1500.00	4.68	5.31	4.68	3.55
1560.00	4.75	5.37	4.75	3.59
1620.00	4.80	5.40	4.80	3.62
1680.00	5.05	5.48	5.05	3.90
1740.00	5.08	5.49	5.08	3.92
4380.00	5.99	6.17	6.09	4.54
4440.00	6.07	6.21	6.10	4.54
4500.00	6.14	6.22	6.11	4.54
4560.00	6.15	6.22	6.11	4.54
4620.00	6.15	6.22	6.11	4.54
5820.00	6.29	6.35	6.22	4.63
5880.00	6.35	6.38	6.27	4.66
5940.00	6.38	6.39	6.28	4.66
6000.00	6.41	6.40	6.31	4.66
7200.00	6.53	6.50	6.45	4.74
7260.00	6.55	6.51	6.45	4.74
7320.00	6.55	6.52	6.45	4.74
7380.00	6.55	6.52	6.45	4.77
7560.00	6.55	6.52	6.45	4.77
7740.00	6.55	6.52	6.45	4.77
8600.00	6.67	6.62	6.51	4.77
8640.00	6.69	6.64	6.51	4.77

8700.00	6.73	6.65	6.56	4.78
8760.00	6.73	6.65	6.56	4.78
8820.00	6.73	6.65	6.56	4.78
10020.00	6.79	6.74	6.66	4.87
10440.00	6.85	6.75	6.69	4.90
11460.00	6.94	6.79	6.73	4.95
14580.00	7.19	6.95	6.84	5.36
14820.00	7.22	6.95	6.88	5.40
16320.00	7.23	6.96	6.89	5.41
16620.00	7.25	6.99	6.89	5.00
17820.00	7.28	7.02	6.89	5.02
18060.00	7.28	7.04	6.89	5.02
19140.00	7.30	7.09	6.97	5.09
19560.00	7.30	7.12	6.97	5.03
23340.00	7.35	7.13	7.00	5.10
23820.00	7.35	7.13	7.00	5.08
24900.00	7.35	7.17	7.03	5.14
25080.00	7.35	7.17	7.03	5.14
27600.00	7.59	7.20	7.07	5.20
28080.00	7.61	7.41	7.13	5.25
29040.00	7.89	7.57	7.24	5.35
29520.00	7.89	7.59	7.43	5.52
30420.00	8.14	7.83	7.53	5.75
31860.00	8.22	7.86	7.58	6.00
33420.00	8.44	8.12	7.61	6.04
36240.00	8.66	8.14	7.64	6.25
37620.00	8.70	8.16	7.66	6.26
39000.00	8.77	8.16	7.69	6.55
40260.00	9.02	8.18	7.73	6.45
84900.00	9.22	8.62	7.87	6.83

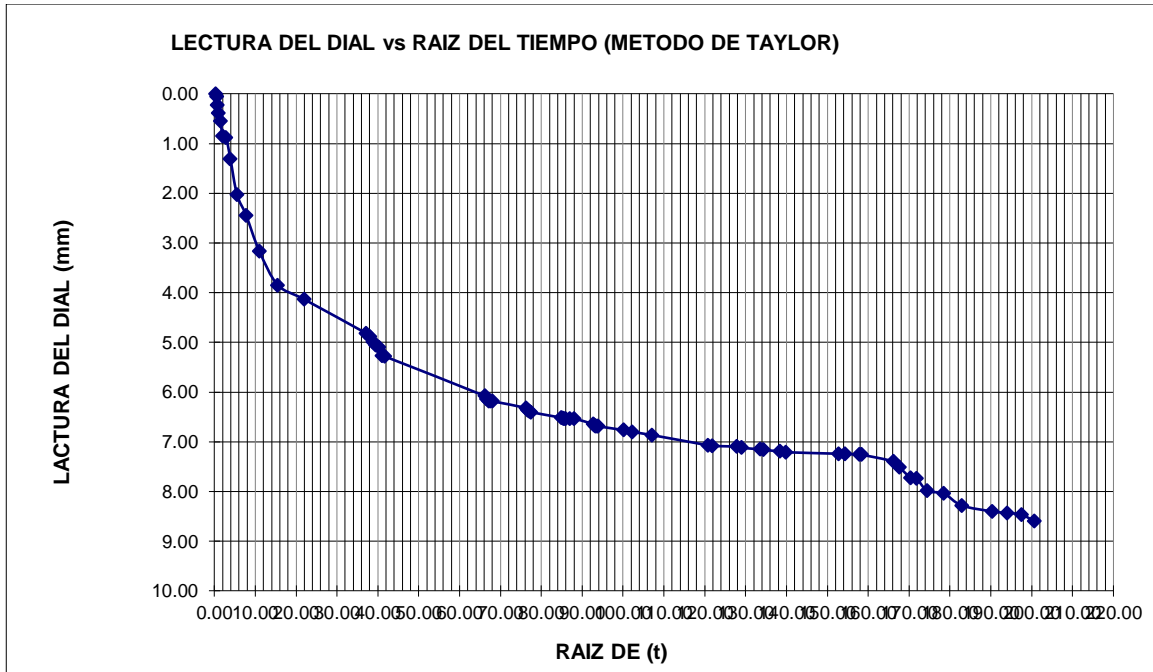
Grafica de asentamiento por medio del método de Casagrande aplicando el método columnas de grava.



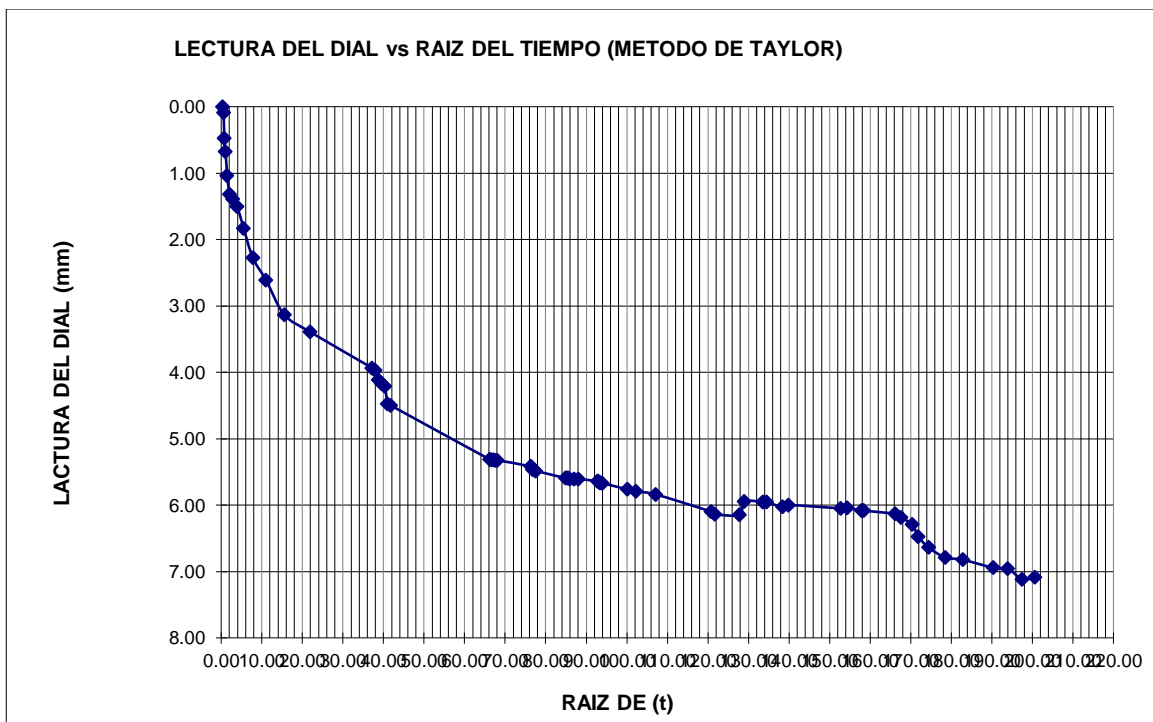
Grafica de asentamiento por medio del método de Casagrande sin aplicar método.



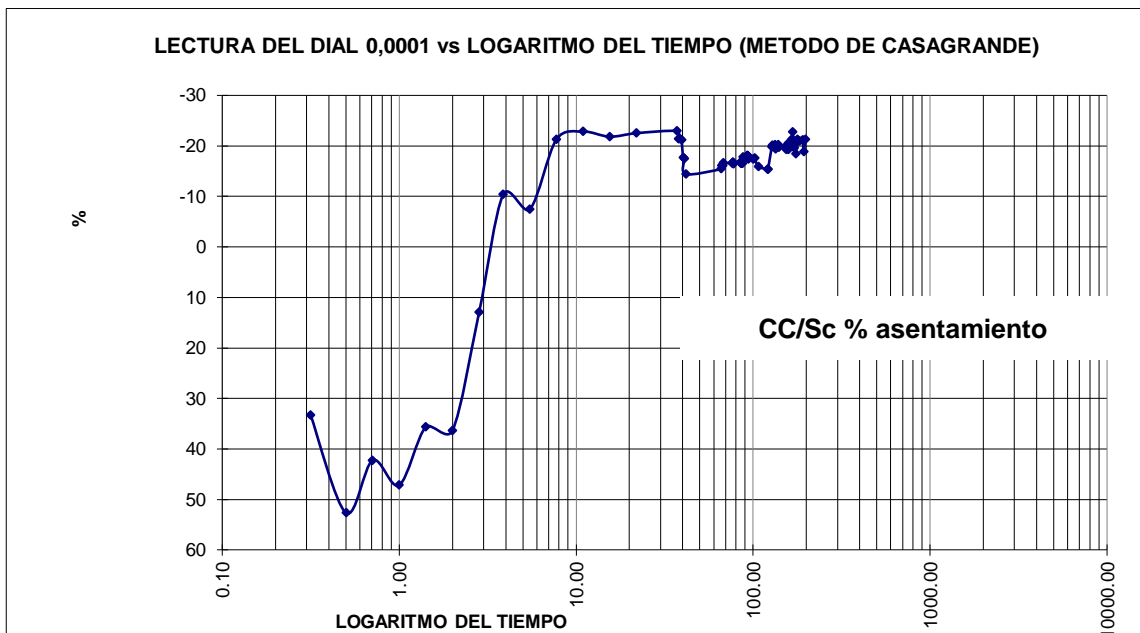
Grafica del método de Taylor sin carga aplicada (condiciones naturales).



Grafica del método de Taylor con carga aplicada de 0.50kg/cm².



Grafica del porcentaje de asentamiento por medio del método de Casagrande.

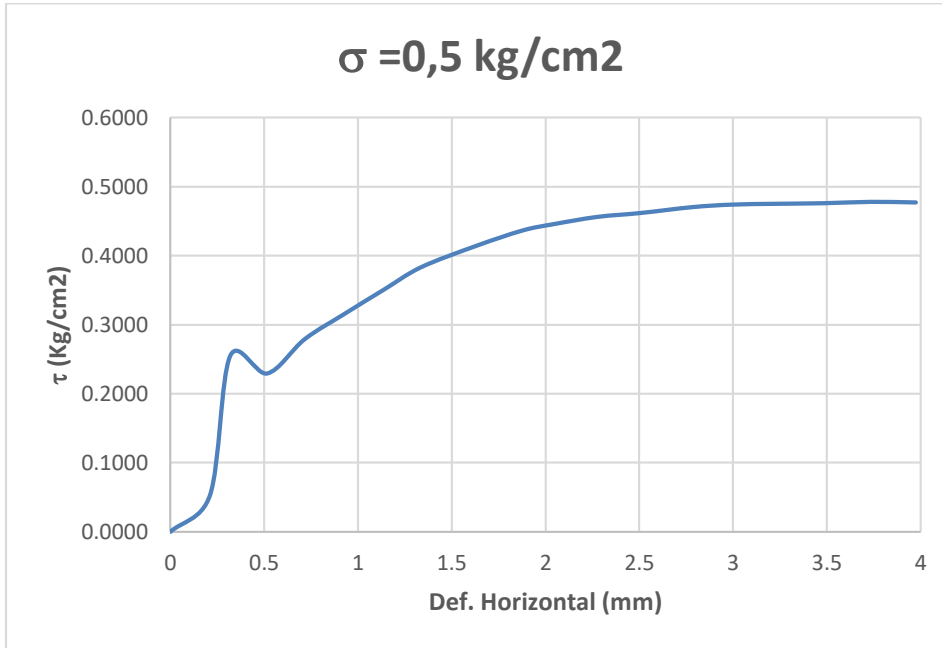


ANEXO F: ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Sondeo o Apique		Peso muestra + Molde (g)	140.6	Capsula No.	32
Profundidad		Peso del molde (g)	274.2	Peso capsula (g)	21.3
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1.9	Peso suelo húmedo + Capsula (g)	31.65
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0.5	Peso suelo seco + Capsula (g)	29.7
		σ (Kg/cm ²)	0.5		

Peso agua (g)	1.95
Peso suelo seco (g)	8.4
Humedad (%)	23.21

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm ²)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0.0000	0.0000
0.5	18.8	0.212	0.0533	1.9171
1	90.1	0.32	0.2552	9.1876
1.5	81	0.516	0.2294	8.2597
2	98.5	0.716	0.2790	10.0442
2.5	111.2	0.924	0.3150	11.3392
3	123.9	1.139	0.3510	12.6342
3.5	135.3	1.336	0.3832	13.7967
4	146	1.623	0.4135	14.8878
4.5	154.1	1.876	0.4365	15.7137
5	157.4	2.044	0.4458	16.0503
5.5	161.1	2.277	0.4563	16.4275
6	163.1	2.507	0.4620	16.6315
6.5	166.1	2.783	0.4705	16.9374
7	167.4	2.996	0.4742	17.0700
7.5	167.8	3.225	0.4753	17.1108
8	168.1	3.482	0.4761	17.1413
8.5	168.8	3.737	0.4781	17.2127
9	168.5	3.975	0.4773	17.1821
9.5	167.8	4.233	0.4753	17.1108
10	167.1	4.485	0.4733	17.0394
19.5	165.1	4.727	0.4677	16.8354



Sondeo o Apique	Peso muestra + Molde (g)	291.49	Capsula No.	2	
Profundidad	Peso del molde (g)	140.09	Peso capsula (g)	27.5	
# Muestra	Altura de la muestra (cm)	2	Peso suelo humedo + Capsula (g)	117.49	
Area de la muestra (cm2)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0.5	Peso suelo seco + Capsula (g)	45.1
		σ (Kg/cm2)	1		

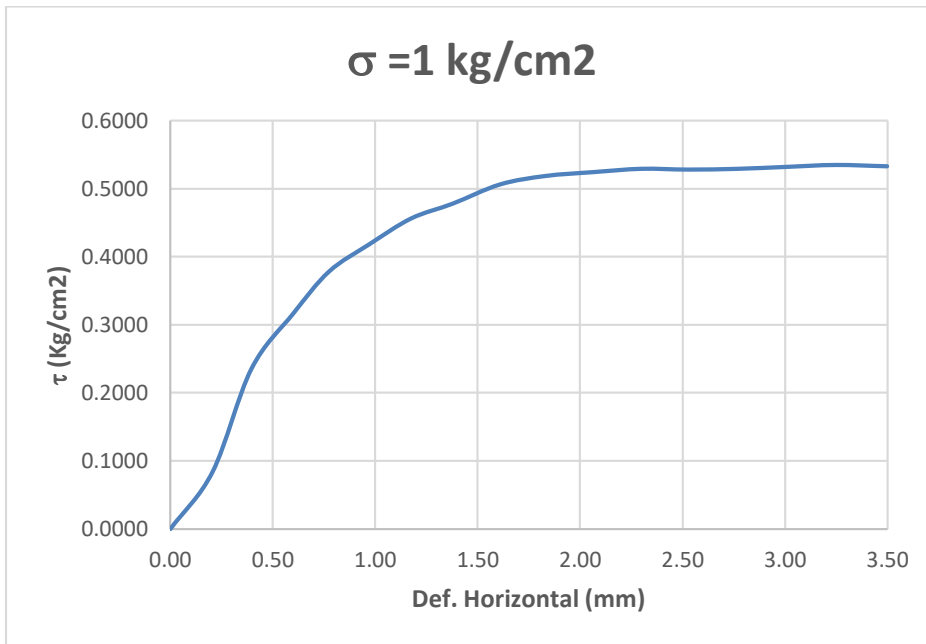
Peso agua (g) 72.39

Peso suelo seco (g) 17.6

Humedad (%) 411.31

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm2)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0.00	0.0000	0.00
0.5	30	0.21	0.0844	3.04
1	83	0.40	0.2354	8.47
1.5	112	0.60	0.3170	11.41
2	134	0.78	0.3784	13.62

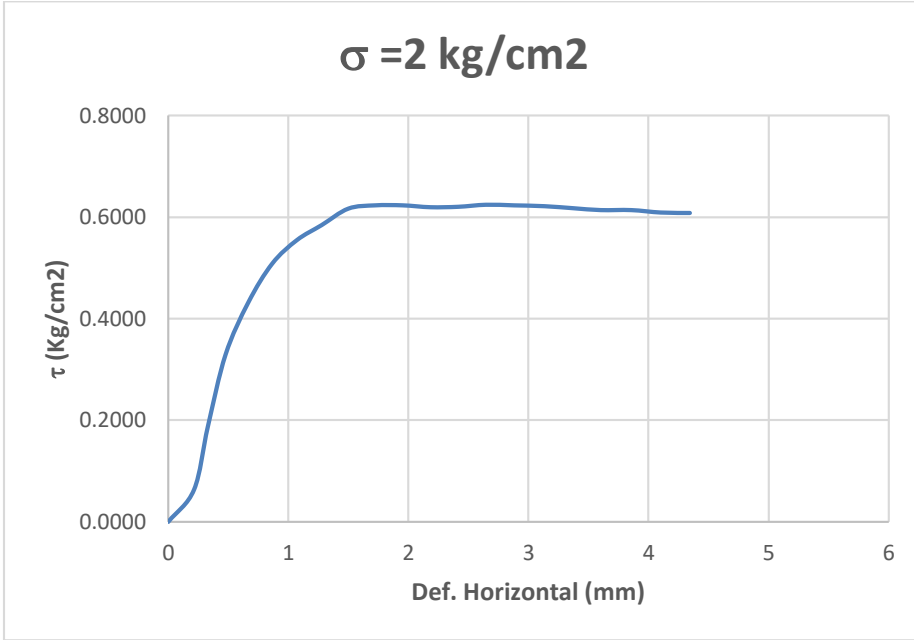
2.5	148	0.97	0.4184	15.06
3	161	1.18	0.4563	16.43
3.5	169	1.38	0.4781	17.21
4	179	1.61	0.5065	18.23
4.5	183	1.83	0.5189	18.68
5	185	2.07	0.5246	18.89
5.5	187	2.30	0.5294	19.06
6	187	2.53	0.5283	19.02
6.5	187	2.77	0.5294	19.06
7	188	3.01	0.5322	19.16
7.5	189	3.25	0.5351	19.26
8	188	3.50	0.5331	19.19
8.5	188	3.75	0.5322	19.16
9	188	3.99	0.5331	19.19
9.5	187	4.25	0.5283	19.02
10	186	4.50	0.5266	18.96



Sondeo o Apique	Peso muestra + Molde (g)	280.66	Capsula No.	3
Profundidad	Peso del molde (g)	134.34	Peso capsula (g)	21.1
# Muestra	Altura de la muestra (cm)	2	Peso suelo humedo + Capsula (g)	172.21

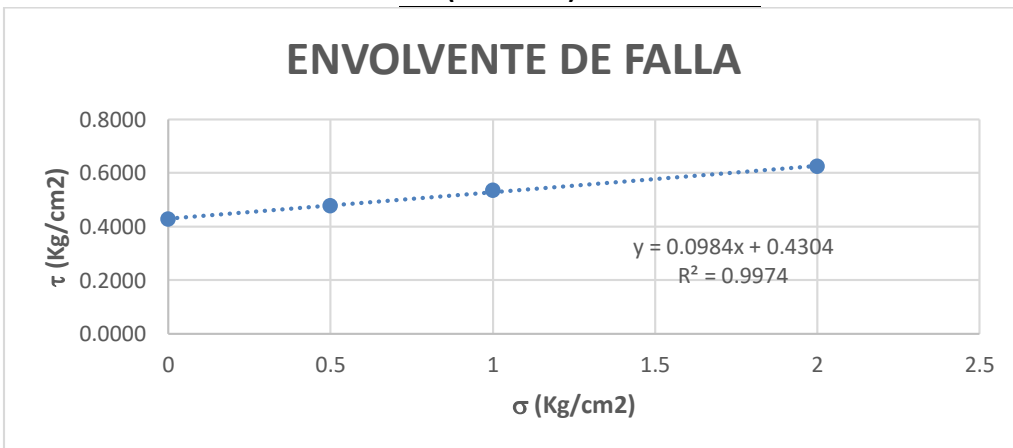
Area de la muestra (cm²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0.5	Peso suelo seco + Capsula (g)	30.7
		σ (Kg/cm²)	2		
<hr/>					
		Peso agua (g)	141.51		
<hr/>					
		Peso suelo seco (g)	9.6		
<hr/>					
		Humedad (%)	1474.06		
<hr/>					

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm²)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0.0000	0.0000
0.5	22.4	0.215	0.0634	2.2842
1	66.3	0.33	0.1878	6.7607
1.5	116.2	0.477	0.3291	11.8490
2	152.4	0.666	0.4317	15.5404
2.5	179.5	0.866	0.5084	18.3038
3	195.8	1.071	0.5546	19.9659
3.5	206.3	1.278	0.5844	21.0366
4	217.7	1.499	0.6166	22.1991
4.5	220	1.723	0.6232	22.4336
5	220	1.953	0.6232	22.4336
5.5	218.7	2.184	0.6195	22.3011
6	219	2.415	0.6203	22.3317
6.5	220.4	2.645	0.6243	22.4744
7	220	2.879	0.6232	22.4336
7.5	219.4	3.135	0.6215	22.3725
8	218	3.372	0.6175	22.2297
8.5	216.7	3.602	0.6138	22.0971
9	216.7	3.856	0.6138	22.0971
9.5	215	4.101	0.6090	21.9238
10	214.7	4.344	0.6081	21.8932



σ (Kg/cm ²)	τ (Kg/cm ²)
0	0.4283
0.5	0.48
1	0.54
2	0.62

Pendiente	0.0984
Θ Angulo de fricción interna	5.62
C (Cohesión)	0.4283



Evidencia fotográfica.









ANEXO G: ENSAYO DE PERMEABILIDAD.

Se realizó el ensayo pero debido a que contamos con una arcilla de alta plasticidad con permeabilidad muy baja no se presentaron escapes de fluido, por lo tanto no se obtuvieron datos del ensayo.

Evidencia Fotográfica:

