



**Demostración experimental de los fenómenos de consolidación y licuefacción en suelos
típicos de Bogotá D.C.**

Brian Steev Doncel López

10481825448

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

**Demostración experimental de los fenómenos de consolidación y licuefacción en suelos típicos de
Bogotá D.C.**

Brian Steev Doncel López

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Civil

Director (a):

I.C. M.Sc. July Estefany Carmona Álvarez

Línea de Investigación:

Geotecnia

Grupo de Investigación:

GRESIA

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá D.C. Colombia

2023

DEMOSTRACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS FENÓMENOS DE CONSOLIDACIÓN Y LICUEFACCIÓN EN SUELOS TÍPICOS DE BOGOTÁ D.C.

EXPERIMENTAL DEMONSTRATION OF CONSOLIDATION AND LIQUEFACTION PHENOMENA IN TYPICAL SOILS OF BOGOTÁ D.C.

Doncel López, Brian Steev; Carmona Alvarez, July Estefany

¹ Universidad Antonio Nariño, Colombia, Estudiante, bdoncel13@uan.edu.co

² Universidad Antonio Nariño, Colombia, Docente, jcarmona55@uan.edu.co

Resumen: Con el fin de realizar la demostración experimental de los fenómenos de consolidación, asentamiento y licuefacción en suelos típicos de la ciudad de Bogotá y su respuesta a la carga aportada. Se desarrolló la caracterización de los materiales, a partir de cuáles se construyó un modelo a escala (1:100) con suelos conformados a partir de la arena del guamo y el caolín, relacionados en diferentes proporciones y estratificados en el modelo, para ser afectados por estructuras convencionales en Bogotá D.C. De hace 40 años y edificios con los requerimientos actuales, en un tiempo de 8 semanas. Se calcularon las propiedades de los agregados comparados con la teoría disponible, logrando argumentar asentamientos para estructuras actuales de hasta 9 metros, evidenciando la vulnerabilidad frente a los asentamientos diferenciales, daños a estructuras vecinas y posible licuefacción. Finalizando con el desarrollo de métodos de enseñanza de “consolidación, asentamientos y licuefacción” para la asignatura de Geotecnia 1 de la Universidad Antonio Nariño. Concluyendo con una eficiente presentación de los fenómenos reales a tamaño escala (1:100) y definición de variables de alto impacto, como las arcillas y presión de poros, el nivel freático y la posible licuefacción.

Palabras claves: Consolidación; Consolidación primaria; Consolidación Secundaria; Sobreconsolidación; Asentamientos; Licuefacción; Limite líquido; Limite plástico; Límite de contracción; Granulometría; Corte directo; Modelos a escala; Métodos de enseñanza ingeniería civil.

Abstract: In order to perform the experimental demonstration of consolidation, settlement and liquefaction phenomena in typical soils of the city of Bogota and their response to the load provided. The characterization of the materials was developed, from which a scale model was built (1:100) with soils formed from Guamo sand and kaolin, related in different proportions and stratified in the model, to be affected by conventional structures in Bogotá D.C. From 40 years ago and buildings with current requirements, in a time of 8 weeks. The properties of the aggregates compared with the available theory were calculated, being able to argue settlements for current structures of up to 9 meters, evidencing the vulnerability to differential settlements, damage to neighboring structures and possible liquefaction. Finalizing with the development of teaching methods of "consolidation, settlements and liquefaction" for the subject of Geotechnics 1 of the Antonio Nariño University. Concluding with an efficient presentation of real phenomena at scale size (1:100) and definition of high impact variables, such as clays and pore pressure, water table and possible liquefaction.

Key words: Consolidation; Primary consolidation; Secondary consolidation; Overconsolidation; Settlement; Liquefaction; Liquid limit; Plastic limit; Shrinkage limit; Granulometry; Direct cutting; Scale models; Civil engineering teaching methods.

INTRODUCCIÓN

Los componentes vulnerables a diferentes amenazas representan un riesgo a los relacionados. La norma (NSR, 2010) define que una estructura como factor principal debe salvaguardar la vida de sus habitantes, definiendo para Bogotá un nivel sísmico medio y condiciones a seguir de acuerdo a dicho nivel. El suelo se posiciona como un factor fundamental para las estructuras y proceso de diseño.

Es importante destacar que la construcción de los suelos en la ciudad de Bogotá D.C. Se estableció durante 3,2 Ma como lo afirma (Torres et al., 2005) con condiciones problemáticas para el desarrollo estructural según el tipo de suelo conformado por sedimentos lacustres. En conjunto (Mendoza et al., 2022) presenta que dicho desarrollo se ve reglamentado para Colombia desde el año 1984, representando una baja exigencia en el desarrollo estructural hasta hace 40 años y hoy en día regulado por (NSR, 2010).

Colombia, al ser un país centralizado, su capital se posiciona como un factor clave en la estabilidad de la nación, con gran variedad de estructuras típicas y actuales. Vulnerables a fenómenos de consolidación, asentamientos excesivos, diferenciales o posible licuefacción. Es relevante comprender el comportamiento de los suelos en relación con los fenómenos que pueden variar sus impactos, desde daño a estructuras vecinas o hasta fallas por capacidad de carga, de acuerdo a (Day, 2012).

Por lo tanto, desarrollar relaciones entre conceptos teóricos, datos experimentales y modelos de comportamiento a escala puede generar un marco de referencia frente a los efectos generados por fenómenos difíciles de visualizar en la zona de estudio. De ser efectiva, dicha relación y procedimiento cumplen con el objetivo de demostrar experimentalmente los fenómenos de consolidación y posible licuefacción, además de cumplir los parámetros de (González, 2016) para producir métodos de enseñanza a partir de modelos a escala para conceptos geotécnicos.

PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Fenómenos como la consolidación afectan las estructuras de acuerdo con el diseño y la relación suelo-estructura, generando posibles asentamientos controlados o en su defecto asentamientos diferenciales que comprometen los servicios de la construcción, adiciónemele el fenómeno secundario de licuefacción generado por sismo, puede ser la fuente de asentamientos adicionales.

La vulnerabilidad estructural es un factor fundamental en la gestión de riesgo de las diferentes poblaciones. De acuerdo con la norma (NSR, 2010) primordialmente las estructuras deben salvaguardar las vidas de quienes se encuentren en su entorno. Analizando las diferentes características que tiene la ciudad capital Bogotá D.C. y teniendo en cuenta lo relacionados por (Torres et al., 2005) el suelo tiene condiciones de sedimentos lacustres a gran profundidad (586 m), desarrollados a lo largo de 3,2 millones de años. (IDIGER, 2023) junto con (INGEOMINAS et al., 1997) clasifican el nivel de sismicidad de Bogotá con importancia Media.

El desarrollo estructural de la ciudad en los últimos 40 años ha conllevado a un asentamiento excesivo en los suelos, como lo afirma (Mendoza et al., 2022). Actualmente, no se tiene en cuenta el asentamiento causado por la compresión secundaria. Además de que la normativa exige una mejor interacción con el suelo para las estructuras actuales.

Identificando las variables principales para conocer el nivel de vulnerabilidad frente a las amenazas por fenómenos de consolidación y licuefacción, se determina la exposición a la amenaza de las zonas de evaluación; las cuales genera un marco de referencia para el desarrollo de la gestión de riesgo en el territorio, la cual es fundamental para garantizar el bienestar de la población y sus bienes.

Dichas amenazas son la base para análisis y demostración de la vulnerabilidad, entonces ¿La ciudad de Bogotá D.C. es vulnerable a los fenómenos de consolidación, asentamiento y posible licuefacción según su tipo y uso de los suelos?

ESTADO DEL ARTE

Fenómeno de licuefacción por consolidación

Las causas más comunes para una falla de asentamiento y capacidad de carga sísmica son debido al fenómeno de licuefacción. Autores como (Pathak et al., 2013) hacen uso de mesas vibratorias y agregados en diferentes condiciones, concluyendo que la licuefacción se activa con presiones intersticiales iguales o menores a uno, siendo dicho valor menor para arenas saturadas y aumentando conforme la densidad del material.

Por otro lado (Saha et al., 2020) menciona los posibles daños por expansión lateral de terraplén por licuefacción, como se observa de Figura 1 a la Figura 12 y (Rivera, 2009) recopila efectos de licuación en suelos sujetos a cargas dinámicas en los últimos 10 años en países como Alaska, la unión americana, Canadá, Centroamérica, Sudamérica, España y países europeos.

Figura 1

Título Fallos en terraplén y rotación de bloques



Nota. Fallos en terraplén y rotación de bloques en el Oeste del Capitol Lake. Fuente: (Rivera, 2009)

Figura 2

Burbujeo de arena



Burbujeo de arena en un área próxima al tren Union Pacific. Fuente: (Rivera, 2009)

Figura 3

Oquedad de 1,5 m de diámetro



Oquedad de 1,5 m de diámetro en Sinkhole al Sur de Alaska, en que se expulsó arena unos 15 metros. Fuente: (Rivera, 2009)

Figura 4

Expulsión de arenas a través de grieta



Expulsión de arenas a través de grieta, perpendicular a vía férrea en Alaska. Fuente: (Rivera, 2009)

Figura 5
Burbujeo de arenas



Burbujeo de arenas en el borde oriental del lago Sunser, Tumwater. Fuente: (Rivera, 2009)

Figura 6
Fallos del terreno en los cimientos de estructura



Fallos del terreno en los cimientos de estructura física ubicada al Sur Deschutes Parkway. Fuente: (Rivera, 2009)

Figura 7
Zona de desplome principal del terreno



Zona de desplome principal del terreno a causa de la licuación de los suelos. Fuente: (Rivera, 2009)

Figura 8
Grietas del suelo paralelo a vía de acceso



Grietas del suelo paralelo a vía de acceso próxima al Capitol Lake. Fuente: (Rivera, 2009)

Figura 9
Complejo de Presa Niteko Earth



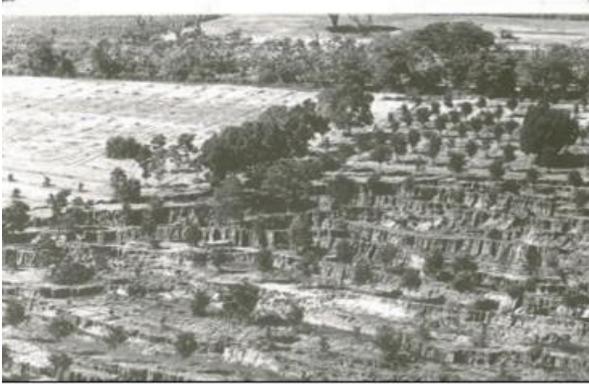
Complejo de Presa Niteko Earth después del Terremoto de Kobe en el año 1995. Fuente: (Susana, 2008)

Figura 10
Vista de la licuefacción en subsuelo



Vista de la licuefacción en subsuelo de carretera después del Terremoto de Loma Prieta (California) en el año 1989. Fuente: (Susana, 2008)

Figura 11
Expansión lateral de capas de arenas



Expansión lateral de capas de arenas después del Terremoto de Caracas en el año 1967. Fuente: (Susana, 2008)

Figura 12
Burbujeo de arenas en grieta de 100m de longitud



Burbujeo de arenas a lo largo de grieta de 100m de longitud con desplazamiento vertical de 13 cm. Fuente: (Rivera, 2009)

A lo largo del tiempo se evidencian ejemplos de licuefacción evidenciados desde la Figura 13 a la Figura 17, como lo son el terremoto de 7.5 Mw (Magnitud momento) en Niigata el 16 de junio de 1964 por fallas de asentamiento y capacidad de carga, Figura 14. Al igual que el terremoto de 7.6 Mw (Magnitud momento) en Izmit, Turquía, el día 17 de agosto del año 1999 Figura 15.

Figura 13
Fallas en la capacidad de carga inducida por la licuefacción



Nota. Edificios de apartamentos Kawagishi-cho ubicados en Niigata, Japón. Los edificios sufrieron fallas en la capacidad de carga inducida por la licuefacción durante el terremoto de Niigata el 16 de junio de 1964. (Fotografía de Godden Collection, EERC, Universidad de California, Berkeley) Fuente: (Matsumoto et al., 2017)

Figura 14
Asentamiento e inclinación de un edificio



Nota. Asentamiento e inclinación de un edificio de departamentos ubicado en Niigata, Japón. El Edificio sufrió asentamiento e inclinación inducidos por la licuefacción durante el terremoto de Niigata el 16 de junio de 1964. (Fotografía de la Colección Steinbrugge, EERC, Universidad de California, Berkeley). Fuente: (Matsumoto et al., 2017)

Figura 15
Asentamiento e inclinación de un edificio



Nota. Asentamiento e inclinación de un edificio ubicado en Niigata, Japón. El edificio sufrió asentamiento e inclinación inducidos por la licuefacción durante el terremoto de Niigata el 16 de junio de 1964. (Fotografía de la Colección Steinbrugge, EERC, Universidad de California, Berkeley). Fuente: (Matsumoto et al., 2017)

Figura 16
Falla por capacidad de carga



Nota. Falla por capacidad de carga en Izmit, Turquía, el día 17 de agosto del año 1999. Fotografía de la Colección Izmit, EERC, Universidad de California, Berkeley. Fuente: (Day, 2012).

Figura 17
Falla por punzonamiento en Izmit



Nota. Falla por punzonamiento en Izmit, Turquía, el día 17 de agosto del año 1999. Fotografía de la Colección Izmit, EERC, Universidad de California, Berkeley. Fuente: (Day, 2012).

Consolidación y sobreconsolidación en asentamiento y fenómenos de licuefacción

La consolidación de suelos es un fenómeno que afecta el volumen, propiedades y comportamiento del suelo afectado. El libro (*Geomecánica, 2016*) identifica la consolidación como una compresión gradual que sufre el suelo, debido a los esfuerzos inducidos por estructuras superpuestas, ya sean de origen natural o antrópico, además de permanentes o transicionales.

A partir de lo anterior se establece que dichos esfuerzos son parte fundamental de su historia, ya que definirán su comportamiento para un tiempo específico, dando lugar a variables como consolidación natural y sobreconsolidación. En la guía de (Salinas et al., 2018) los autores definen parámetros como el OCR (Grado de sobreconsolidación) basándose en la relación entre el máximo esfuerzo vertical de la estructura (suelo) a lo largo de su historia y el esfuerzo del momento de observación, estableciendo suelos normalmente consolidados para $OCR=1$ y suelos sobreconsolidados para $OCR>1$.

Es importante conocer dicho OCR, para entender el comportamiento del suelo frente a un esfuerzo antrópico inducido por una estructura y su rango de consolidación. El rango de consolidación y la deformación final producirán un asentamiento que estará directamente relacionado con la transmisión de esfuerzos y la deformación vertical del terreno.

Según lo expuesto hasta este punto. Se establece que los asentamientos son producto de la consolidación de los suelos y que los fenómenos de licuefacción tienen relación directa con dichos comportamientos. Presentado con anterioridad desde la Figura 13 hasta la Figura 17 y las fallas por asentamiento, capacidad de carga, punzonamiento e inestabilidad de terraplén.

Siendo el asentamiento la falla primordial en la zona de estudio en la ciudad de Bogotá D.C., de acuerdo con el siguiente orden general.

1. Conformación de los suelos de alta profundidad.
2. Compactación natural de los suelos lacustres.
3. Aplicación de cargas estáticas (estructuras antiguas convencionales).
4. Compactación primaria.
5. Asentamiento de las estructuras.
6. Compactación secundaria.
7. Asentamiento de baja intensidad.
8. Actualización de compactación natural del suelo, simultáneo a una sobre consolidación.
9. Aumento de cantidad de cargas con mayor magnitud (crecimiento vertical de la ciudad).
10. Repetición de los pasos 3,4,5,6,7,8 y 9.

Dicho orden general debe ser analizado según su vulnerabilidad a los sismos. Aunque existe una normativa sísmo resistente para Colombia (NSR-10), dichos parámetros se hicieron presentes hace no más de 40 años. Generando un riesgo variable para las estructuras según su tipo de construcción y la profundidad de la compactación del suelo habitado. Todo lo anterior bajo la amenaza a la licuefacción.

La aplicación de lo anterior en casos tangibles y de alta magnitud se evidencian gracias a (Ortiz-Hernández et al., 2022) en la ciudad de Chone, Ecuador, donde la población sufrió daños estructurales, debido a un terremoto de 7.8 Mw (Magnitud momento). Generando la necesidad de desarrollar estudios de suelos (SPT) para comprender su comportamiento y vulnerabilidad. Identificando el suelo como altamente licuable, entre 7-9 m de profundidad. Por otro lado, se identificó que la formación del suelo se desarrolló por depósitos aluviales, permitiendo la presencia de suelos de la edad del Holoceno.

Modelos físicos del comportamiento mecánico y geotécnico de los suelos

Una propuesta de estudios de los parámetros del comportamiento mecánico de los suelos en la ciudad de Pisco, Perú, se realizó con el propósito de identificar el nivel de amenaza sísmica y su correspondiente

aplicación en administración de riesgo y desastre en zonas específicas. Algunas de las características evaluadas fueron el tipo de suelo, el ángulo de fricción y el fenómeno de licuefacción de los suelos. Estos valores se determinaron como claves para intentar predecir la vulnerabilidad de una zona, frente a diferentes fenómenos. Como se evidencia en (Izquierdo-Horna, 2021) y su uso de los diferentes parámetros, a fin de mejorar las técnicas de identificación de nivel de amenazas.

Diferentes iniciativas desean comprender el comportamiento mecánico y geotécnico de los suelos, intentando relacionar bases de datos, según la variable SPT (Standard Penetration Test) (Ghorbani & Rajabi, 2020) apunta a mejorar los métodos de evaluación para determinar la licuefacción. Además de suministrar información valiosa de acuerdo con las zonas estudiadas y sus cambios consecuentes al tiempo.

En Italia se realizaron pruebas de centrifugación dinámica, revisando las ondas sísmicas, la corteza fina y la estructura local en el proceso del fenómeno de licuefacción, (Fioravante et al., 2021). Analiza el comportamiento sísmico de depósitos arenosos, llanos, saturados, a 14 m de profundidad, homogéneos o estratificados, de acuerdo con excitaciones sísmicas hasta la licuefacción, aplicando cimentaciones superficiales para la estructura o sin estructura.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, es clave conocer y analizar el comportamiento de suelos típicos de la región de la ciudad de Bogotá D.C. Colombia. Las condiciones de desarrollo del suelo de la sabana de Bogotá, presenta condiciones de sedimentos lacustres a gran profundidad (586 m), desarrollados a lo largo de 3,2 Ma. Permitiendo delimitar los estratos y condiciones de estos. (Torres et al., 2005) menciona características favorables para fenómenos de expansión y contracción como lo son el tipo de suelo especial de diatomeas y (Zhang et al., 2023) confirma su relación con riesgos geológicos.

-Métodos de enseñanza a partir de modelación en ingeniería

Entre los métodos de enseñanza siempre destaca la capacidad del docente para transmitir la información, afectado por diferentes factores como lo pueden ser: El material disponible, la metodología desarrollada, el nivel de comprensión de los estudiantes, la comodidad de los presentes, la calidad de la comunicación, la relación docente-estudiantes, entre otros.

Entre los diferentes métodos, el más común y practicado es el método científico, el cual se ha establecido como el proceso idóneo para generar información a lo largo del tiempo, desarrollado de forma estricta en la educación superior e incluso de forma más general por los infantes a lo largo del desarrollo de sus habilidades. Como informa (González, 2016) es importante saber que no hay certezas absolutas y que toda información generada debe ser susceptible de ser refutada. Por lo tanto, la transmisión de información y la observación son parte clave de los modelos de enseñanza.

La aplicación del método científico en el campo de la ingeniería permite relacionar diferentes procesos, los cuales responden a los siguientes:

- Teoría existente.
- Evidencias.
- Normativas.
- Ensayos o procesos.
- Fenómenos o casos relacionados.
- Modelos.
- Simulaciones.
- Software.

La comprensión y manejo de la información disponible, de acuerdo con los anteriores parámetros, permite desarrollar prácticas de enseñanza eficaces, debido a la implementación adecuada de la información. Dicha eficacia aumentará entre más procesos se relacionan. Esto debido a que facilita la comprensión del público y cuenta con mayor probabilidad de retención en los diferentes procesos individuales de aprendizaje.

Investigadores como (Ochoa et al., 2020) emplean una mesa vibratoria para representar el fenómeno de licuefacción a pequeña escala. Lo anterior según la dificultad de estudio insitu del fenómeno de licuefacción. Obteniendo resultados favorables al evidenciar el movimiento ascendente del flujo y el arrastre de partículas.

Adicionalmente, autores como (Nespereira et al., 2013) emplean modelos a escala de situaciones reales, basándose en diferentes tipos de obras estructurales (Presa de hormigón) bajo efectos sísmicos, con el objetivo de estudiar el comportamiento geomecánico de agregados cohesivos y granulares. Generando evidencias claras del fenómeno de licuefacción a pequeña escala y comportamiento de estructuras.

MARCOS REFERENCIAS

Marco Conceptual

Licuefacción de los suelos

La licuefacción es un fenómeno secundario, dependiente de un movimiento que estimule la reacción. Afecta la capacidad del suelo y por ende las estructuras relacionadas con el mismo. De acuerdo con (Richard L. Handy, 2020) cuando el terremoto genera movimiento en los granos de arena, estos comienzan a realizar una reorganización cubriendo los vacíos que están llenos de agua. Alterando las propiedades del suelo y por ende la relación suelo-estructura.

Puede identificarse de forma superficial debido a que el suelo sin buena capacidad de cohesión está sujeto a una carga de tipo no drenada, además el significativo aumento de la presión que ejerce el agua intersticial se ve reflejada en un flujo ascendente. Provocando forúnculos de arena, chorros de lodo y en mayor magnitud una zona de arena licuada (Licuefacción) Figura 18.

Figura 18

Ebullición de arena en Niigata



Nota. Ebullición de arena en Niigata causada por la licuefacción durante el terremoto de Niigata (Japón) del 16 de junio de 1964. (Fotografía de la Colección Steinbrugge, EERC, Universidad de California, Berkeley).

Presentado por primera vez por Casagrande a fines de la década de 1930, el fenómeno de la licuefacción es un efecto secundario, depende de variables específicas. (Day, 2012) los divide como la presencia de suelo poco cohesivo, principalmente arenas sueltas o ya sean lacustres y arcillas, el cual requiere de un

nivel freático cerca de la superficie del suelo y como detonante la aplicación de movimiento, la cual es proveniente de un sismo o terremoto.

Consolidación

Entre los componentes fundamentales del ambiente podemos identificar el suelo. (*Suelo - IDEAM, s. f.*) indica que está construido por diferentes variables tales como:

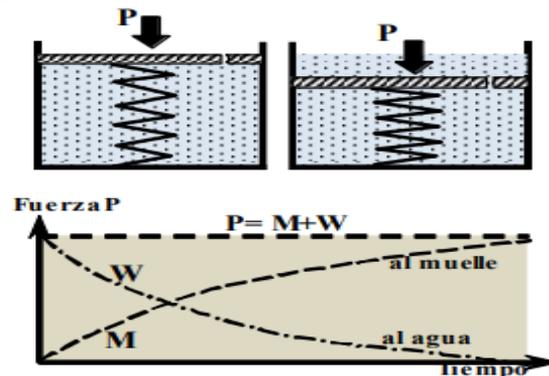
- Partículas minerales (arcillas, arenas, gravas y piedras).
- Aire.
- Agua.
- Materia orgánica.

De acuerdo con la interacción de dichas variables se generan las propiedades del suelo, las cuales permitirán comprender su comportamiento frente a diferentes acciones. Específicamente en el caso de aplicación de cargas estáticas, el suelo sufrirá lo denominado consolidación.

En el libro (*Geomecánica, 2016, s. f.*) indica que la consolidación se identifica como la compresión gradual del suelo, debido a la presión ejercida por estructuras superpuestas (cargas estáticas). Generando la reducción del volumen de poros (aire, gases y agua). El autor presenta la consolidación por medio de la “Analogía del pistón con orificio estrecho” la cual hace uso de un pistón con orificio estrecho, un resorte, agua y una fuerza aplicada P . Al generar la fuerza P sobre el pistón (carga estática) el resorte (muelle o suelo) será deformado conforme el agua es expulsada por el orificio, transmitiendo los esfuerzos del agua al pistón deformado, como se evidencia en la siguiente Figura 19.

Figura 19

Analogía del pistón con orificio estrecho

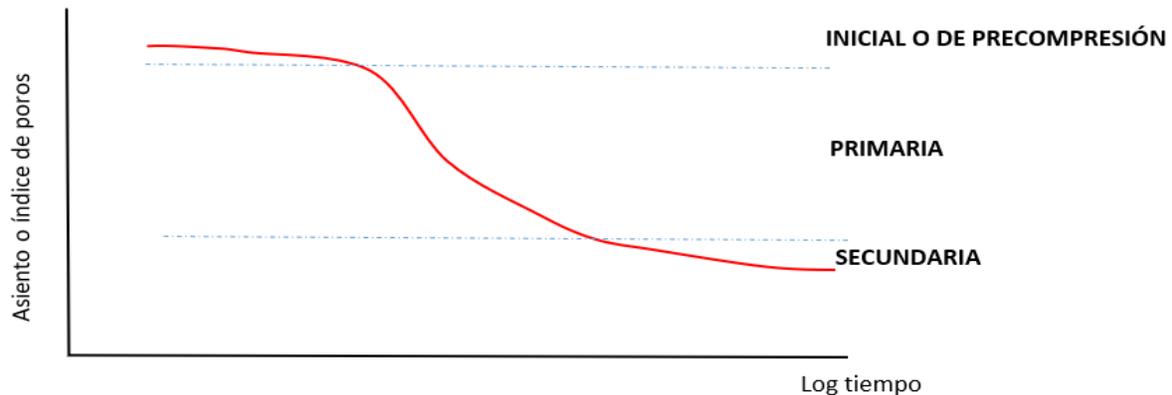


Nota. Se ilustra la interacción de los componentes de la analogía, además de agregar la gráfica Fuerza (P) vs Tiempo, para evidenciar gráficamente el comportamiento. Fuente: (*Geomecánica, 2016.*)

Clases de consolidación

Como se evidencia en la Figura 20 los esfuerzos en el suelo van cambiando de acuerdo con el tiempo y se representan por la deformación. Al ser un proceso de reacción de los componentes del suelo, se divide en 3 etapas, como se evidencia en la siguiente Figura 20

Figura 20
Clases de consolidación



Nota. Asentamiento deformación vs tiempo, para clasificar las 3 etapas de consolidación.
Fuente: (Geomecánica, 2016.)

Consolidación Inicial.

(Geotechnical, 2022) A través de su ensayo de consolidación la define como la disminución inmediata de volumen a causa de la aplicación de un estrés extremo, el cual afecta inicialmente el aire contenido debido a su compresión.

Consolidación primaria.

Es la reacción directa del suelo a la carga, presentando deformación por la pérdida de agua y transferencia de esfuerzos al esqueleto mineral. (Geomecánica, 2016.) informa que esta condición es típica en suelos de Ciudad de México, del cual (Caicedo et al., 2018) afirma que es bastante similar al suelo de Bogotá, Colombia.

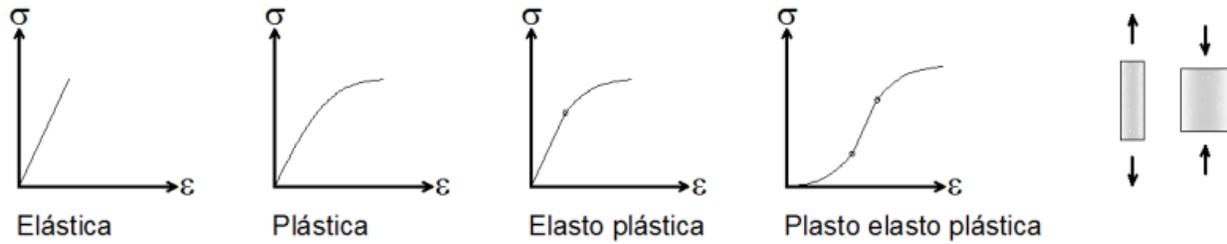
Consolidación secundaria.

De acuerdo con la disminución de la presión de poros (agua, gases y aire) inducida por la consolidación primaria y la transferencia de esfuerzos, posteriormente se genera el reajuste del esqueleto mineral, (Geomecánica, 2016.) explica que dicho esqueleto mineral soporta la mayor magnitud de carga.

Deformaciones en el suelo

El capítulo 9 del libro (Geomecánica, 2016.) indica que las deformaciones ϵ que presente el suelo conforme al esfuerzo σ que generen las cargas, definirán si la deformación es permanente o no, como se observan en la siguiente Figura 21.

Figura 21
Tipos de deformaciones del suelo



Nota. Teniendo en cuenta que las deformaciones del suelo son unidimensionales (verticales), las propiedades del suelo y la magnitud del esfuerzo definirán si la deformación es permanente. Fuente: (*Geomecánica*, 2016.)

Asentamientos

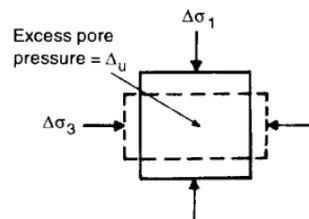
Consecuencia directa de la consolidación, el asentamiento es el hundimiento o deformación vertical del suelo provocado por la aplicación de esfuerzos que generan compresión. (AN, 2021) afirma que la magnitud del asentamiento puede afectar la estructura, causando fisuras, alterando la capacidad de carga del suelo o generando punzonamiento del suelo.

El autor (Borselli, 2022) establece que las 2 problemáticas más representativas de los asentamientos son la evaluación de la cantidad de asentamientos y la velocidad y el tiempo para llegar a dicho valor de asentamiento. Adicionalmente, presenta de acuerdo con la teoría de (Terzagui, 1943) que el estrés inducido por una carga en el suelo tiene 3 posibles tipos de asentamientos.

Asentamiento elástico

En términos generales, es el asentamiento inmediato (horas o días) en cualquier tipo de terreno (finos y gruesos). De acuerdo con la Figura 22 la deformación a causa de la expulsión de aire, el reordenamiento de las partículas y la deformación de las partículas, conocido también como asentamiento elástico.

Figura 22
Asentamiento inmediato



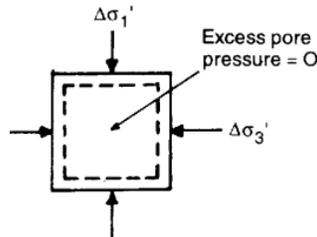
Fuente: (Borselli, 2022)

Asentamiento por consolidación primaria

En términos generales, es el asentamiento generado por la disminución de la presión de poros por pérdida de agua, presente mayormente en suelos a media y baja permeabilidad.

Con 2 tipos de definición de acuerdo con su tiempo de asentamiento, para lapsos cortos de tiempo se define como consolidación primaria y se evidencia generalmente en arenas y gravas (suelos permeables). Por otro lado, si requiere largos periodos de tiempo, se le denomina consolidación secundaria, la cual se presenta generalmente en suelos arcillosos de baja permeabilidad de acuerdo con la siguiente Figura 23.

Figura 23
Consolidación primaria



Fuente: (Borselli, 2022)

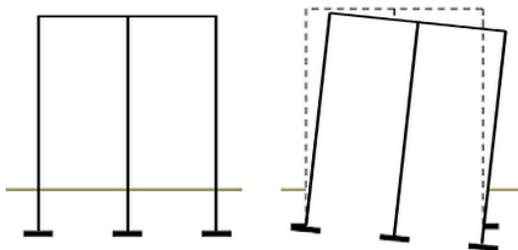
Asentamiento por consolidación secundaria

En términos generales, es el asentamiento generado por el reordenamiento de las partículas que conforman el esqueleto mineral, requiriendo más tiempo para su desarrollo posterior a la consolidación primaria.

Asentamientos es estructuras

Evidencia de los asentamientos convencionales en estructuras reales responden a la orden de asentamiento diferencial y daño a estructuras adyacentes. El asentamiento diferencial se define como los movimientos relativos en diferentes zonas de una estructura inducidos por un asentamiento irregular de la misma de acuerdo con (AN, 2021) como se observa en la Figura 24 y Figura 25.

Figura 24
Asentamiento diferencial



Fuente: (AN, 2021)

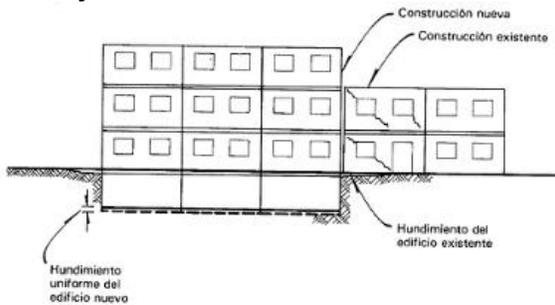
Figura 25
Asentamiento diferencial



Fuente: (AN, 2021)

Entre los daños por asentamiento a las estructuras adyacentes (AN, 2021) define que un asentamiento excesivo de una construcción afecta directamente las condiciones del suelo de las estructuras antiguas, generando daños estructurales, como se evidencia en la siguiente Figura 26 y Figura 27.

Figura 26
Daño adyacente



Fuente: (AN, 2021)

Figura 27
Asentamiento diferencial



Fuente: (AN, 2021)

De acuerdo con lo anterior y la zona de estudio a trabajar (Bogotá D.C) el autor (Orozco, 2016) afirma que en la ciudad se han presentado diversos daños estructurales correspondientes a grietas, desplomes y colapsos de edificaciones. Problemáticas atribuidas directamente a la pobre predicción del comportamiento del suelo o de la estructura en su interacción con este.

Definiendo los daños relacionados por comportamiento de suelos como:

1. Asentamientos excesivos, diferenciales y totales.
Debido a la presencia de suelos blandos en Bogotá, peso excesivo de estructuras o cimentación de baja calidad. Por otro lado, también generado por cimentaciones sobre medios antrópicos de pobres características.
2. Movimientos diferenciales por expansión de arcillas.
Ubicados con mayor probabilidad en el sur, occidente y sur de la capital, en zonas de Kennedy, Bosa y Soacha.
3. Fenómenos de reptación y deslizamientos.
Debido a fenómenos de remoción en masa, especialmente en laderas periféricas, a la sabana y principalmente al oriente y sur oriente de la ciudad.
4. Fallas de taludes por excavaciones profundas.
Afectando a las edificaciones vecinas, se presentaron los primeros casos al norte de la ciudad por el desarrollo de sótanos profundos y parqueaderos subterráneos en zonas blandas.
5. Daños por movimientos debidos a sismos y licuefacción.
Vulnerabilidad alta al fenómeno de licuefacción debido a la presencia de arenas. Posible presencia en toda la ciudad, pero especialmente en piedemontes y taludes. Con evidencias de licuación de suelos en el valle de Tunjuelo y alta probabilidad en cercanías al río Bogotá y río Fucha.

Marco Teórico

Métodos para estimar la susceptibilidad a la licuefacción

Entre los diferentes métodos, se evidencia el desarrollo a lo largo del tiempo. Entre los más utilizados encontramos Método de Seed e Idriss, 1971. El cual se ha intervenido en el año 2001 por medio del método de Youd e Idriss. Aprovechando lo ya establecido y dando las bases a la variación del Método de la ROM-05, el cual destaca por su verificación de la seguridad frente a la licuefacción.

Método de Seed e Idriss, 1971

Los autores definen la razón CSR (Tensión tangencial cíclica) como consecuencia directa del sismo, Si dicha consecuencia es mayor la resistencia tangencial de la zona o suelo estudiado, se producirá el fenómeno de licuefacción. Se expresa de la siguiente forma:

$$CSR = \frac{T_{cm}}{\sigma'_v} = 0,65 \frac{\sigma_v a_{max}}{\sigma'_v g} r_d$$

CSR= Tensión tangencial cíclica

T_{cm} = Esfuerzo cortante cíclico medio

σ_v = Tensión total

σ'_v = Tensión efectiva

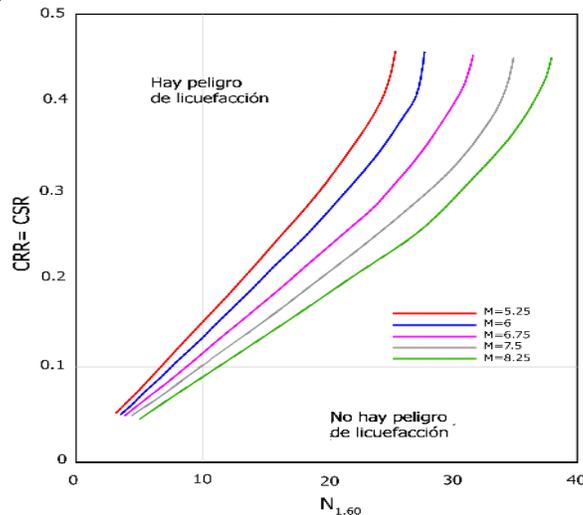
a_{max} = Aceleración máxima horizontal

g = Aceleración de la gravedad

r_d = Factor de reducción con la profundidad ($r_d = 1 - 0,015z$, siendo Z la profundidad)

Con base en lo anterior, se hace uso del CSR (Tensión tangencial cíclica), la magnitud del sismo y el valor $(N_1)_{60}$ del ensayo de penetración estándar (SPT) siendo este el valor normalizado para ρ 100 KPa y una energía del 60% en la Figura 28.

Figura 28
Método de Seed e Idriss, 1971



Nota. Susceptibilidad a la licuefacción de un suelo en función del $N_{1.60}$ y la razón de esfuerzo cortante cíclico CSR para distintas magnitudes de terremotos. Hoy Kavazanjian, 1986 y modificado por González de Vallejo, 2002. Fuente: («GF Geotecnia Facil», 2018).

Método de Youd e Idriss, 2001

Los autores hacen uso de la razón CSR (Tensión tangencial cíclica) de Seed e Idriss con un cambio en la variable r_d y el valor CRR (Capacidad del suelo de resistir la licuefacción).

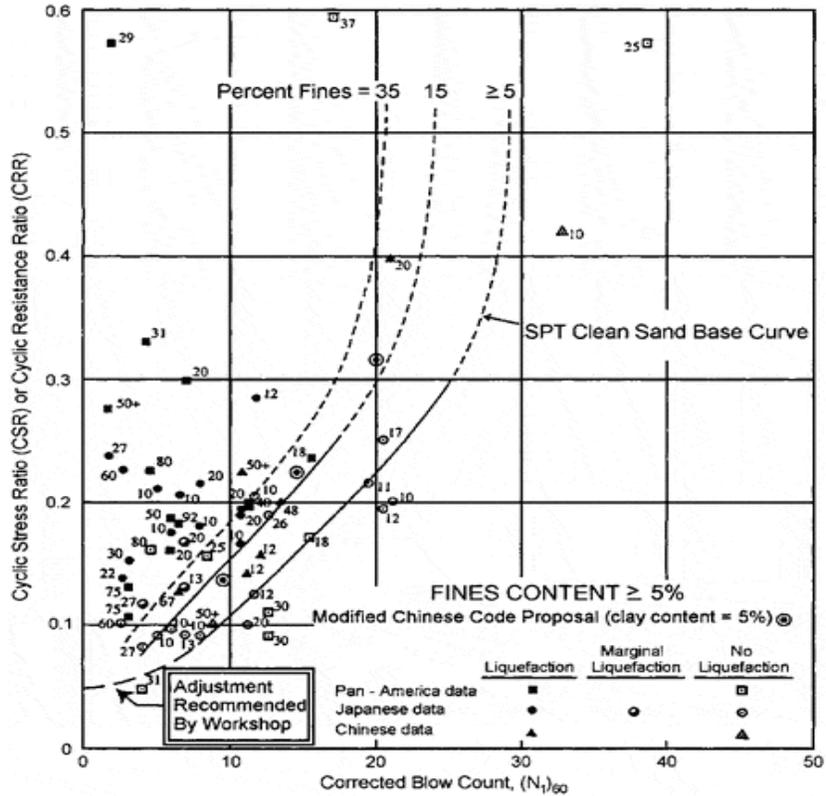
$$r_d = 1,0 - 0,00765z \text{ si } Z \leq 9,15 \text{ m}$$

$$r_d = 1,174 - 0,00765z \text{ si } Z \geq 9,15 \text{ m}$$

El valor de CRR (Capacidad del suelo de resistir la licuefacción) puede ser definido a partir de la velocidad de las ondas v_s , del piezocono CPT (Ensayo de penetración estática) o del SPT (Ensayo de penetración estándar).

Concluyendo que se puede calcular la susceptibilidad del sismo con los valores de CSR (Tensión tangencial cíclica) y CRR (Capacidad del suelo de resistir la licuefacción) para terremotos < 7,5 Mw. De lo contrario se hace empleo de la siguiente Figura 29.

Figura 29
Método de Youd e Idriss, 2001



Nota. Susceptibilidad a la licuefacción en función del SPT (N1)60 para un sismo de magnitud de 7,5 basados en casos históricos. Youd e Idriss, 2001. Fuente: («GF Geotecnia Fácil», 2018)

Licuefacción según el Método de la ROM-05

Destacando por verificar la seguridad frente al fenómeno de licuefacción, funciona a partir del factor F (Coeficiente de seguridad) que se expresa de la siguiente manera:

$$F = \frac{CRR}{CSR}$$

CSR= Tensión tangencial cíclica

Definiendo nuevamente la variable r_d

$$r_d = 1,0 - 0,001z^2 \text{ Donde } Z \text{ es la profundidad de estudio de licuefacción}$$

CRR= Capacidad del suelo de resistir la licuefacción

(«GF Geotecnia Fácil», 2018)

Ensayos y estimación para la consolidación

Para prácticas reales es fundamental determinar el tiempo de consolidación y el asentamiento y deformación del suelo, como lo menciona (Poliotti & Sierra, 2007). Para lo anterior se desarrolla la prueba de compresión confinada o ensayo para determinar las propiedades de consolidación unidimensional de suelos, cuyo objetivo es “determinar la magnitud y proporción de consolidación del suelo cuando es refrendado lateralmente y vaciado axialmente mientras que este sujeto a una carga de esfuerzo controlado aplicado incrementalmente” (ASTM D-2435, 2018).

El desarrollo del ensayo de consolidación unidimensional requiere equipos y procedimientos determinados.

Equipos

Figura 30
Edómetro o aparato de carga



Nota. Aparato de carga con una precisión de 0.5% de la carga aplicada

Figura 31
Caja de consolidación



Nota. Fabricado en bronce de una sola pieza de 127mm diámetro x 76,2mm de alto.

Figura 32
Anillo cortante cilíndrico



Nota. De bronce con dimensiones de 63,5mm de diámetro x 25,4mm de alto.

Figura 33
Piedra porosa



Nota. Con dimensiones de 62,7mm de diámetro x 12,7 mm de espesor

Figura 34
Deformímetro



Nota. Con sensibilidad de 0,01mm.

Figura 35
Balanza



Nota. Balanza de laboratorio

Figura 36
Título Horno de laboratorio.



Nota. Horno de laboratorio.

Figura 37
Título Carga para edómetro



Nota. Diferentes pesas con pesos variables, con forma precisa para asegurar su ajuste

Procedimiento

El ensayo realizado por (UPTL, 2009) documenta e indica el proceso completo, inicialmente destacan que la muestra sobre la cual se va a trabajar será inalterada. (ASTM D 3550) solicita que las muestras obtenidas deben estar en bloques con su humedad natural del suelo y sellados (con parafina) en campo. Posteriormente, se inserta el anillo cortante en la muestra y se enrasa por las dos caras, como se evidencia en la Figura 38 y Figura 39.

Figura 38
Anillo cortante en la muestra.



Nota. Extracción de la parafina sin alteración de propiedades de la muestra. Fuente: (UPTL, 2009)

Figura 39
Enrasado de la muestra en el anillo.



Nota. De ser necesario cubrir los vacíos con material recortado de la muestra. Fuente: (UPTL, 2009)

La muestra obtenida debe registrar su peso en conjunto con el anillo, además de la documentación de sus dimensiones y volumen. Destacando como importante hacer toma de los datos 3 veces para obtener un valor promedio acertado.

Por otro lado, la humedad inicial de la muestra se obtendrá a partir de los recortes iniciales de la muestra, ejecutando la norma ASTM D 2216 como se observa en la siguiente Figura 40.

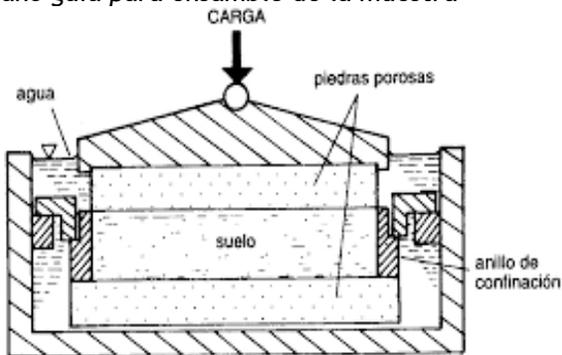
Figura 40
Ensayo de humedad inicial de la muestra (ASTM D 2216)



Nota. Recortes de muestra que serán introducidos al horno con sus respectivos recipientes. Fuente: (UPTL, 2009)

Ya que se documentaron las condiciones iniciales de la muestra, se procede a realizar el embalaje de la muestra en la caja de consolidación, ubicando las piedras porosas y el papel filtro. La humedad será definida por según el tipo de muestra y el contexto del ensayo, como se ve en Figura 41 y Figura 42.

Figura 41
Plano guía para ensamble de la muestra



Nota. Las restricciones del anillo varían según los datos que se desea obtener. Fuente: (UPTL, 2009)

Figura 42
Ubicación de piedra porosa en la caja de consolidación.



Nota. Las restricciones del anillo varían según los datos que se desea obtener. Fuente: (UPTL, 2009)

Tras ajustar la carga de consolidación en el aparato de carga (edómetro) con su respectivo deformímetro, se aplicarán las cargas de 5 kPa (160 g) para suelos firmes y de 2 o 3 kPa (80 g) para suelos blandos. Simultáneamente, a la aplicación de la carga se satura con agua la muestra dentro de la caja de consolidación Figura 43 y Figura 44

Figura 43
Aplicación de cargas



Nota. Aplicación de pesos en el aparato de carga
Fuente: (UPTL, 2009)

Figura 44
Saturación de la muestra



Nota. Saturación de la muestra con agua. Fuente: (UPTL, 2009)

Establecida la condición inicial anterior, se deberá tomar registro del diferencial de altura de la muestra antes de la aplicación de una nueva carga, las cuales responden al siguiente orden:

- 30.40 kPa (1 kg).
- 61.80 kPa (2 kg).
- 123.60 kPa (4 kg).
- 248.20 kPa (8 kg).
- 495.40 kPa (16 kg).
- 991.80 kPa (32 kg).

Lo anterior, teniendo en cuenta que los incrementos de carga son cada 24 horas, simultáneo al incremento se debe tomar información de la deformación inmediata en los siguientes órdenes de tiempo:

- 0.1 minutos.
- 0.25 minutos.
- 0.5 minutos.
- 1 minuto.
- 2 minutos.
- 4 minutos.
- 8 minutos.
- 15 minutos.
- 30 minutos.
- 1 hora.
- 2 horas.
- 4 horas.
- 8 horas.
- 24 horas.

Finalmente, se descarga el suelo retirando las cargas hasta dejar la carga inicial, con el fin de evitar la expansión del suelo hasta la finalización del ensayo donde se retirará esta última carga.

Se extrae la muestra en el anillo y se toma el peso (consolidado), se seca por medio del horno a una temperatura de 110°C y se vuelve a tomar el peso (seco), permitiendo el cálculo de la humedad final de acuerdo con la norma ASTM 2216.

Cálculos del ensayo consolidación unidireccional 3°

Cálculo de la humedad inicial y final a partir de la siguiente ecuación:

$$W_0 = \frac{M_{H0} - M_S}{M_S - M_{recipiente}} \times 100$$

W_0 = Contenido de humedad inicial, %.

M_{H0} = Peso del recipiente + muestra húmeda antes del ensayo, g.

M_S =Peso del recipiente + suelo seco antes del ensayo, g.

$M_{recipiente}$ = Peso del recipiente, g.

$$W_f = \frac{M_{Tf} - M_{Sf}}{M_{Sf} - M_{anillo}} \times 100$$

W_f = Contenido de humedad final, %.

M_{Tf} =Peso del anillo + muestra húmeda después del ensayo, g.

M_{Sf} =Peso del anillo + suelo seco después del ensayo, g.

M_{anillo} = Peso del anillo, g.

Simultáneamente, al cálculo de humedades se calcula la densidad seca inicial de la muestra de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_d = \frac{M_{Tf}}{V_0}$$

P_d =Densidad seca de la muestra, g/cm^3 .

M_{Sf} =Peso del anillo + suelo seco después del ensayo, g.

V_0 =Volumen inicial de la muestra, cm^3 .

Cálculo del volumen de los sólidos, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{M_{Sf}}{G * P_w}$$

P_w =Densidad del agua, $1.0g/cm^3$.

M_{Sf} =Peso del anillo + suelo seco después del ensayo, g.

V_s =Volumen de sólidos, cm^3 .

G =Gravedad específica de los sólidos.

Cálculo de la altura de los sólidos, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$H_s = \frac{V_s}{A}$$

H_s =Altura de sólidos, cm.

V_s =Volumen de sólidos, cm^3 .

A =Área de la muestra, cm^2 .

A partir del valor de G , la altura de sólidos (H_s) de la probeta se calcula una vez finalizado el ensayo a partir de la siguiente ecuación:

$$H_s = (H_0 - \Delta H) - \left(\frac{M_{Tf} - M_{Sf}}{A} \right)$$

H_s =Altura de sólidos, cm.

H_0 =Altura inicial de la muestra, cm.

ΔH =Asentamiento total de la muestra al finalizar el ensayo, cm.

M_{Tf} =Peso del anillo + muestra húmeda después del ensayo, g.

M_{Sf} =Peso del anillo + suelo seco después del ensayo, g.

A =Área de la muestra, cm^2 .

Cálculo de la altura final, a partir de la siguiente ecuación.

$$H_f = H_0 - \Delta H$$

H_f =Altura final de la muestra, cm.

H_0 =Altura inicial de la muestra, cm.

ΔH =Asentamiento total de la muestra al finalizar el ensayo, cm.

Cálculo de relación de vacíos inicial y final, a partir de la siguiente ecuación:

$$e_0 = \frac{H_0 - H_s}{H_s}$$

e_0 =Relación de vacíos inicial.

H_s =Altura de sólidos, cm.

H_0 =Altura inicial de la muestra, cm.

$$e_f = \frac{H_f - H_s}{H_s}$$

e_f =Relación de vacíos final.

H_s =Altura de sólidos, cm.

H_f =Altura final de la muestra, cm.

Cálculo del grado de saturación inicial y final, a partir de la siguiente ecuación:

$$S_0 = \frac{M_{T0} - M_{Sf}}{A * p_w * (H_0 - H_s)} * 100$$

S_0 =Grado de saturación inicial, %.

A = Área de la muestra, cm^2 .

M_{T0} = Peso del anillo + muestra húmeda antes del ensayo, g.

p_w = Densidad del agua, $1.0g/cm^3$.

M_{Sf} = Peso del anillo + suelo seco después del ensayo, g.

H_0 = Altura inicial de la muestra, cm.

H_s = Altura de sólidos, cm.

$$S_f = \frac{M_{Tf} - M_{Sf}}{A * p_w * (H_f - H_s)} * 100$$

S_f =Grado de saturación final, %.

A = Área de la muestra, cm^2 .

p_w = Densidad del agua, $1.0g/cm^3$.

M_{Tf} = Peso del anillo + muestra húmeda después del ensayo, g. H_0 = Altura inicial de la muestra, cm.
 M_{Sf} = Peso del anillo + suelo seco después del ensayo, g. H_s = Altura de sólidos, cm.

Cálculo de la relación de vacíos para incremento de carga, a partir de la siguiente ecuación.

$$e = e_0 - \frac{\Delta H_c}{H_s}$$

e = Relación de vacíos.

e_0 = Relación de vacíos inicial.

ΔH_c = Variación de asentamiento para cada incremento de carga, cm.

H_s = Altura de sólidos, cm.

Cálculo de la altura final para incremento de carga, a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{fc} = H_0 - (\Delta H_{c-1} + \Delta H_c)$$

H_{fc} = Altura final para cada incremento de carga, cm.

H_0 = Altura inicial de la muestra, cm.

ΔH_{c-1} = Variación de asentamiento para un incremento de carga anterior, cm.

ΔH_c = Variación de asentamiento para cada incremento de carga, cm.

Cálculo de altura promedio (H) para cada incremento de carga, a partir de la siguiente ecuación:

$$H = \frac{H_0 + H_{fc}}{2}$$

H_{fc} = Altura final para cada incremento de carga, cm. H = Altura promedio, cm.

H_0 = Altura inicial de la muestra, cm.

Cálculo de longitud promedio de la trayectoria de drenaje, a partir de la siguiente ecuación:

$$Hm = \frac{H}{2}$$

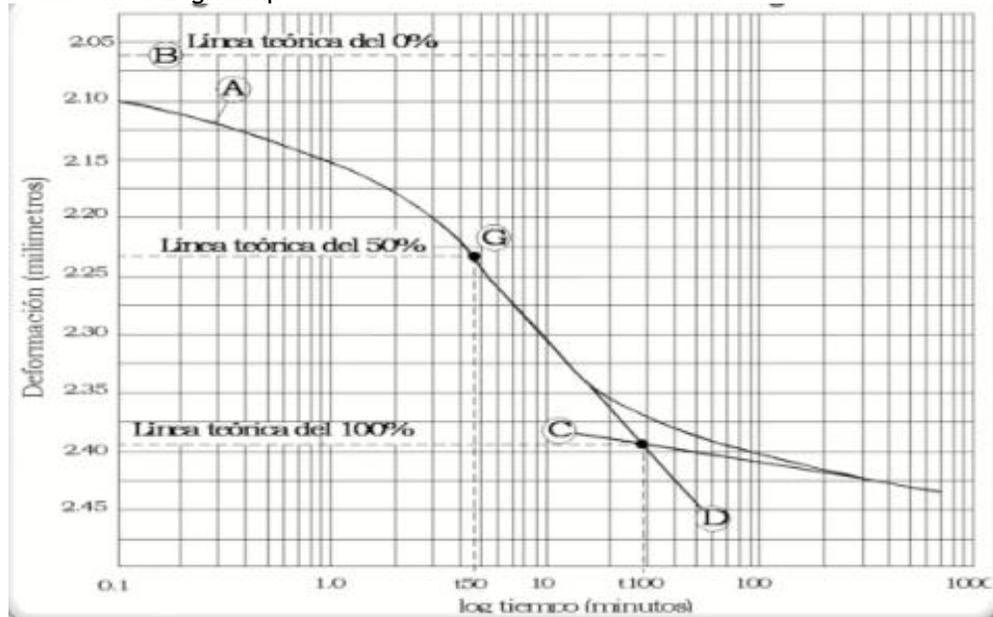
Hm = Longitud promedio de la trayectoria de drenaje.

H = Altura promedio, cm.

Método de logaritmo de Tiempo

(UPTL, 2009) Representa sus datos obtenidos en laboratorio por medio de la siguiente Figura 45:

Figura 45
Curva deformación vs Log tiempo



Nota. Se grafica en escala semilogarítmica la curva deformación (ordenadas) vs Logaritmo tiempo (abscisas).
Fuente: (UPTL, 2009)

El procedimiento para obtener los valores del 100, 0 y 50% teórico de consolidación primaria, corresponden a trazar una línea recta (C) entre los puntos que representan las lecturas finales y que exhiben una tendencia recta y una inclinación suave. Así mismo se traza una segunda recta tangente a la parte más pronunciada de la curva (D).

Del resultado anterior, el punto de encuentro entre las 2 rectas representa la deformación al 100% de la consolidación primaria y la consolidación que sobrepase el 100% se define como consolidación secundaria.

Para culminar la definición de valores de la Figura 45, se determina la deformación que representa el 0% de la consolidación primaria, seleccionando un punto de la curva próximo al eje de deformaciones (t_1) y su tiempo respectivo, posteriormente se selecciona un punto cuya abscisa es 4 veces la del punto (t_1), así definiendo el punto (t_2); La diferencia de ordenadas de los 2 puntos anteriores se duplica y se aplica a partir del segundo punto (t_2), sobre una paralela al eje de las ordenadas, generando el tercer punto. Finalmente, se traza una paralela del punto 3 al eje de los tiempos, siendo dicha paralela la que define el 0% teórico de la consolidación y por ende el punto medio entre 0% y 100% teóricos definirán el 50% teórico de la consolidación.

Ensayos y estimación para el esfuerzo deformación

Los ensayos de compresión triaxial son los más empleados generalmente en busca de estimar las características de esfuerzo-deformación y resistencia del suelo. Autores como (Salas, 2011) establecen dicho ensayo como uno de los más confiables en busca de la resistencia al cortante.

Se desarrolla a partir de un espécimen cilíndrico de suelo, el cual se encuentra revestido por una membrana de látex dentro de una cámara a presión. Contando con discos porosos a los extremos de la muestra, esto permite la saturación y drenaje del espécimen.

Este tipo de ensayo permite variar las presiones actuantes en 3 direcciones ortogonales sobre la muestra de suelo, efectuando mediciones sobre las propiedades mecánicas del suelo. Lo anterior se desarrolla gracias a las presiones laterales de un líquido que por excelencia es el agua.

El agua de la cámara funciona a partir de adquirir cualquier presión seleccionada debido a la influencia de un compresor conectado, la conexión es por medio un vástago que atraviesa la parte superior de la cámara. Las presiones resultantes en la muestra serán iguales en todas las direcciones y denominando los esfuerzos σ_1 =principal mayor, σ_2 =intermedio y σ_3 =mínimo. Donde la presión axial corresponde al esfuerzo principal mayor y los esfuerzos intermedios y mínimos son iguales ($\sigma_2 = \sigma_3$) y corresponden al valor de la presión lateral.

Tipos de pruebas triaxiales y equipos.

1. Prueba lenta - Prueba con consolidación y con drenaje (CD).
Con la característica fundamental de aplicación de esfuerzos efectivos y generalmente aplicados en suelos granulares (arenas), sin embargo, se pueden aplicar también en suelos finos con condiciones de tiempo más extensas (semanas).
2. Prueba rápida - Prueba con consolidación y sin drenaje (CU).
Para esta prueba se requiere inicialmente que el espécimen se consolide bajo presión hidrostática; así el esfuerzo logra ser efectivo, actuando sobre la fase sólida del suelo.
Se realiza generalmente con medición de presión de poros o neutra con el fin de definir las variables en términos de esfuerzos totales y esfuerzos efectivos.
3. Prueba rápida - Prueba sin consolidación y sin drenaje (UU).
No permite acciones de consolidación de la muestra, además de inhabilitar la válvula para restringir el drenaje de la muestra.
Se aplica generalmente sobre muestras de arcillas dentro del concepto de resistencia para suelos cohesivos saturados y obteniendo resultados en términos de esfuerzos totales.

Lo anterior desarrollado por medio de los equipos de la Figura 46 hasta la Figura 54.

Equipos

Figura 46
Máquina triaxial



Nota. Vista general de la máquina.
Fuente: (Salas, 2011)

Figura 47
Panel de control.



Nota. Sistema conformado por válvulas y reguladores mediante los cuales se administra el flujo de aire y agua.
Fuente: (Salas, 2011)

Figura 48
Dispositivo de cambio de volumen



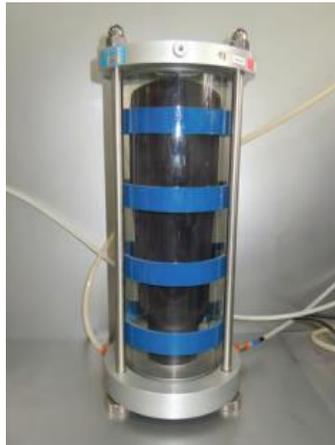
Nota. Realiza su función comprimiendo un pistón sellado contra un dispositivo de precisión en la cámara de calibración.
Fuente: (Salas, 2011)

Figura 49
Prensa Triaxial



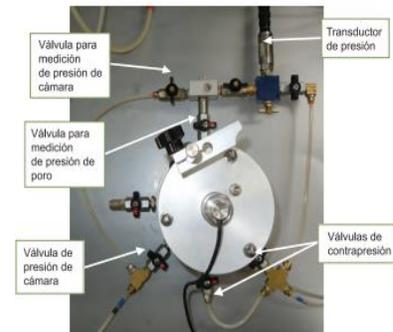
Nota. Marco de dos columnas con una viga transversal móvil (marco de carga) y una base que contiene la unidad de empuje mecánico, el motor eléctrico, los componentes electrónicos y los controles. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 50
Blader



Nota. Cámara constituida por un cilindro de bandas de plexiglass, una placa base, una placa superior y una membrana de hule que trabaja como interface aire/agua Fuente: (Salas, 2011)

Figura 51
Cámara triaxial



Nota. Está conformada por una cámara de bandas de metacrilato que permiten una presión máxima de funcionamiento de 2000 KPa, una base con cinco conexiones, de las cuales dos son para presión de poro, dos para contrapresión y una para presión de cámara Fuente: (Salas, 2011)

Figura 52
Transductor de presión



Nota. Para la automatización del ensayo triaxial se requieren transductores de presión.

Fuente: (Salas, 2011)

Figura 53
LVDT



Nota. Se encargan de transformar una señal eléctrica en una magnitud física, la cual, en este caso, es enviada al datalogger para así poder registrar tanto las presiones a las que está sometido el espécimen como las deformaciones que sufre durante el ensayo. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 54
Datalogger



Nota. Es una nueva serie de los Universal Data Loggers, con 8 canales de micro procesamiento para la adquisición de datos provenientes de las señales eléctricas de los transductores. Fuente: (Salas, 2011)

Procedimiento

Inicialmente, se clasifica la muestra de acuerdo con diferentes propiedades de esta:

- Límites de Atterberg (LL, LP y IP)
- Gravedad específica G_s
- Porcentaje pasando No.200
- Clasificación
- Humedad natural (%)
- Densidades húmedas (g/cm^3)
- Humedad Especimen (%)
- Saturación (%)

Para evidenciar la falla de especímenes (Salas, 2011) realiza la siguiente secuencia en orden de la Figura 55 hasta la Figura 67.

Figura 55
Montaje de la pastilla



Nota. Fase inicial. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 56
Revestimiento de la pastilla con membrana



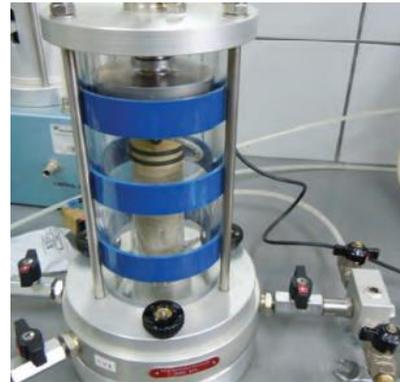
Nota. Ajuste de la muestra. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 57
Colocación de cámara



Nota. Inicio de confinado. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 58
Llenado de cámara con Lucita



Nota. Líquido de compresión. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 59
Montaje en la prensa de carga



Nota. Ajuste en prensa. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 60
Falla del espécimen



Nota. Proceso de falla. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 61
Procesamiento y captura de datos



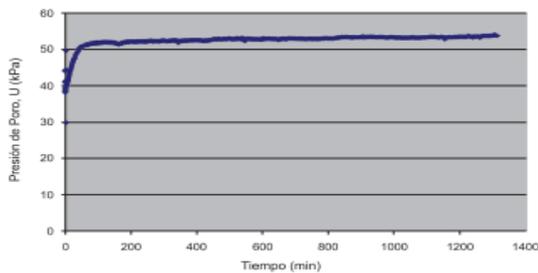
Nota. Gestión de datos. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 62
Lecturas de presiones y contrapresiones



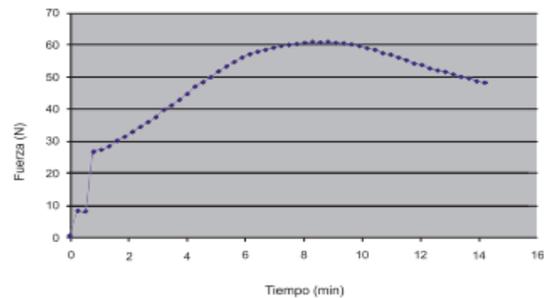
Nota. Indicador digital. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 63
Corroboración de la saturación (Parámetro B Skempton)



Nota. Proceso de saturación, reflejado en las lecturas de presión de poros. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 64
Fase rotura espécimen 3 ($\sigma_3 = 200$ kPa)



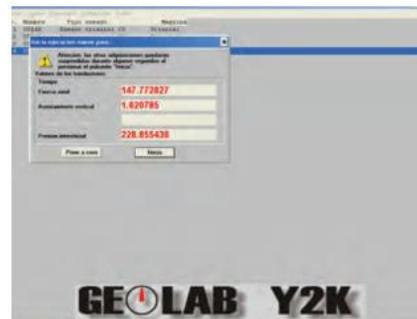
Nota. Fuerza producto de la falla que se genera al someter el espécimen a un esfuerzo desviador a una velocidad constante, medido en el tiempo. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 65
Fase rotura-lectura de instrumentos, cámara 3



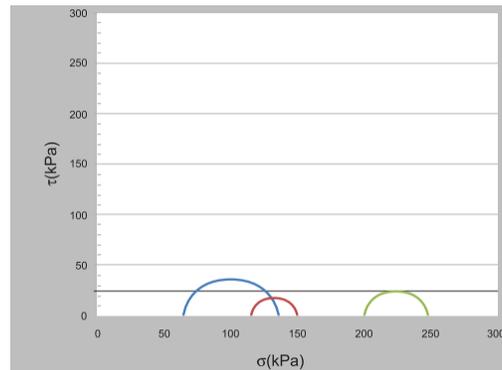
Nota. Etapas propias del programa de adquisición y procesamiento de datos. Verificación de la adecuada lectura de los instrumentos. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 66
Fase rotura-cero de los instrumentos



Nota. Segundos previos al inicio de la falla, en donde el ejecutante se debe asegurar de “poner en cero” todos los respectivos instrumentos. Fuente: (Salas, 2011)

Figura 67
Resumen de resultados



Nota. Resumen de los esfuerzos obtenidos de la aplicación de un ensayo. Fuente: (Salas, 2011)

Análisis y cuantificación del Riesgo

El desarrollo estructural de la ciudad de Bogotá, Colombia en los últimos 40 años ha conllevado a un asentamiento excesivo en los suelos, como lo afirma (Mendoza et al., 2022) de acuerdo con estudios de tipo de suelo. Los sedimentos lacustres en dichos suelos revelan que las construcciones no tienen actualmente en cuenta el asentamiento causado por la compresión secundaria. Parámetro destacado como importante en el asentamiento total de las edificaciones.

Evaluación de amenaza

La amenaza representa la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno, ya sea de origen natural o antrópico. Técnicamente, es la probabilidad de sobrepasar un nivel de ocurrencia y severidad de un fenómeno en un lugar y tiempo determinados. (Cardona Arboleda, 1991) afirma que actualmente no se cuenta con técnicas de alta precisión para modelar dichos sistemas, debido a la gran cantidad de variables, se pueden variar el comportamiento de este. Por lo tanto, realizar un análisis del comportamiento físico del fenómeno junto a un análisis probabilístico permite obtener los mejores datos posibles. Lo anterior con base en la información de fenómenos en el pasado y sus características.

Debido a que la evaluación de amenaza permite establecer los parámetros de exigencia para el desarrollo de diferentes actividades, según el fenómeno y el sitio estudiado. El fenómeno natural del cual depende la licuefacción es el sismo, establecido por la (INGEOMINAS et al., 1997) y reglamentado por la (NSR, 2010) en Bogotá D.C. de nivel medio. Adicionalmente, el fenómeno de consolidación definido por la interacción suelo estructura se ve reglamentado a partir del Decreto-Ley 1400 de 1984 (García, 2015), actualizado en 1998 y 2010, variando los requerimientos y por ende la interacción suelo estructura.

Como parte importante de la evaluación de amenaza es la diferencia entre la posibilidad y la probabilidad, debido a que un evento posible es aquel que puede suceder y un evento probable es aquel del cual se tienen registros, razones y bases técnico-científicas. Al igual que permiten definir acciones de precaución o prevención.

Análisis de Vulnerabilidad

El autor (Cardona Arboleda, 1991) define que un elemento puede ser afectado por un fenómeno, dicha susceptibilidad del elemento a ser afectado se llama vulnerabilidad. Desarrollándose en ámbitos técnicos y sociales, el primero cuantificable de acuerdo con daños y alteración de servicios, diferente al segundo que es más relativo, cualitativo en factores como economía, educación, cultura, etc.

Definir la amenaza permite analizar la interacción de un elemento o grupo de elementos con un fenómeno determinado, obteniendo el riesgo sobre el contexto social y material, además de la importancia de este en un sistema mayor.

Con base a lo anterior, se debe enfatizar que los análisis de amenaza y vulnerabilidad deben ser desarrollados por especialistas de las diferentes disciplinas involucradas, relacionar sus conocimientos y condiciones para entender el comportamiento social y material.

Estimación del Riesgo

Para evaluar el riesgo se requiere de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno (Amenaza) junto con la susceptibilidad de los elementos frente a dicho fenómeno (Vulnerabilidad). Obteniendo un riesgo de carácter geológico, atmosférico o dependiendo de la naturaleza de la amenaza, como enfatiza (Cardona Arboleda, 1991).

Como aspecto fundamental, cualquier cambio en la amenaza o vulnerabilidad altera de forma inmediata el riesgo. Generalmente, se estima el riesgo en el campo físico, dado que la vulnerabilidad en el aspecto social es complicada de adaptar a valores cuantitativos. El autor (Cardona Arboleda, 1991) informa que como solución a esto se desarrollan los riesgos relativos que pueden influir en decisiones o prioridades de mitigación y prevención.

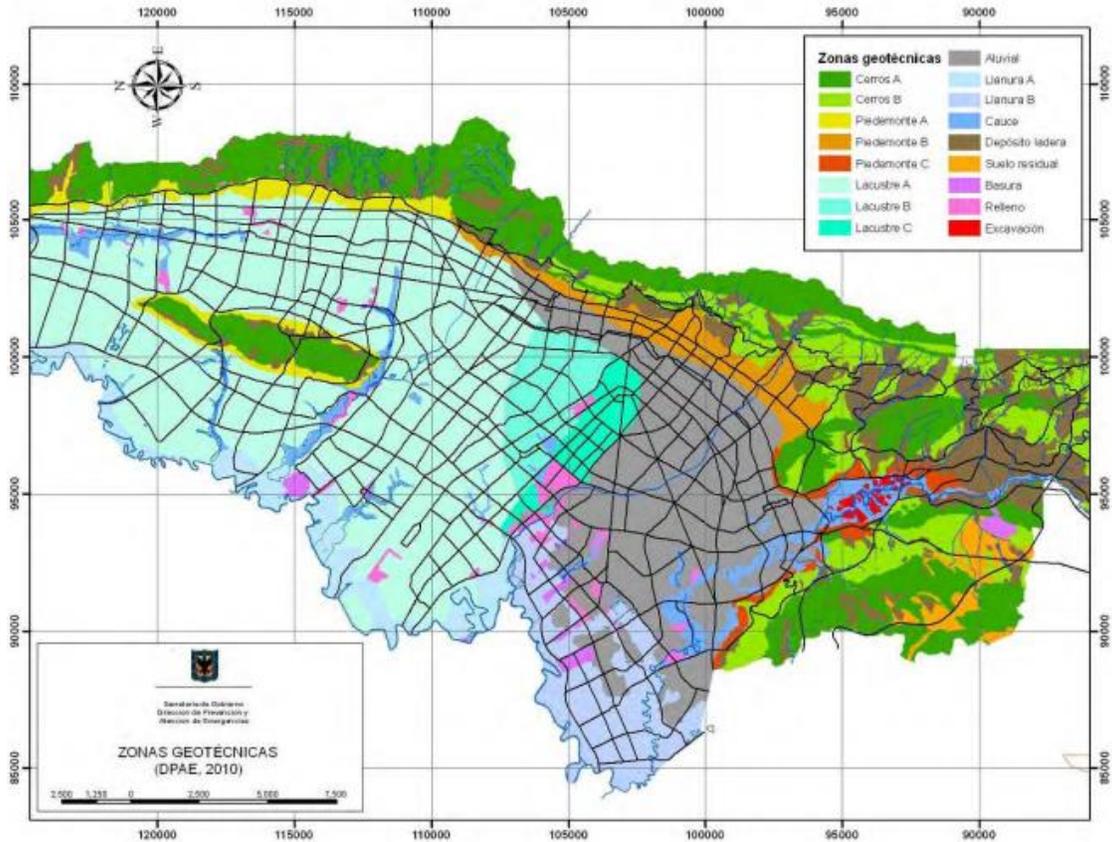
La estimación de riesgo es importante para el desarrollo de un plan de emergencia y contingencia, ya sea para una población por el decreto 2157 de 2017 o una empresa mediante normativas como la ISO 22301.

Ya que el nivel de sismicidad en Bogotá es afectado según (IDIGER, 2023) por el sistema de falla frontal de la cordillera oriental, Falla Guaicáramo, Falla Algeciras, Falla Usme, Falla Honda y Falla Ibagué. Donde la Falla Frontal de la cordillera oriental es la que genera mayor contribución al riesgo sísmico en Bogotá, debido a su cercanía no mayor a 40 km, además de que los efectos de propagación de ondas sísmicas varían de acuerdo con los tipos de suelos y la topografía del terreno. Por lo tanto (NSR, 2010) clasificará el nivel de sismicidad medio para Bogotá.

Dicha información es fundamental para conocer el nivel de vulnerabilidad que tiene una zona de acuerdo con el fenómeno de licuefacción, el cual es favorecido por la presencia de sismos, los cuales afectan directamente la relación suelo-estructura de acuerdo con (Day, 2012).

Por lo tanto, se definen las poblaciones vulnerables, mediante el reconocimiento del tipo de suelo licuable de la Figura 68.

Figura 68
Mapa actualizado de zonificación geotécnica 2010



Nota. Zonas geotécnicas de Bogotá D.C. Fuente: (Castro, 2010)

Definiendo localidades del Oriente y Sur de la capital, como lo son Bosa, Kennedy, Puente Aranda, Los Mártires, Antonio Nariño, Rafael Uribe Uribe, Tunjuelito y parte de Teusaquillo para tipo de suelo aluvial y cauce, mezclas de suelos tipo Lacustre A, Llanura A y Llanura B en las localidades de Fontibón, Engativá, Barrios Unidos, Teusaquillo y Suba.

OBJETIVOS

GENERAL

Realizar la demostración experimental de los fenómenos de consolidación y licuefacción en suelos típicos de la ciudad de Bogotá y su respuesta a la carga aportada por las estructuras construidas hace más de 40 años y las edificaciones recientes.

ESPECÍFICOS

- Caracterizar la arena del guamo y el caolín mediante los ensayos estandarizados en Colombia para los suelos.
- Desarrollar el modelo físico (1:100) en relación con las estructuras convencionales de 40 años de antigüedad en Bogotá D.C. y edificios actuales para la validación de la interacción con los tipos de suelos identificados en Bogotá.
- Evaluar la relación entre las variables del modelo físico y la influencia sobre las estructuras en un lapso de 2 meses.
- Aplicar la relación de los modelos físicos con los suelos y sus propiedades obtenidas, para ser trabajados en procesos de enseñanza.

METODOLOGÍA

Con el fin de demostrar experimentalmente los fenómenos de consolidación y licuefacción en suelos típicos de Bogotá D.C. Se desarrolló un modelo a escala (1:100) con suelos conformados a partir de la arena del guamo y el caolín, relacionados en diferentes proporciones y estratificados en el modelo, para ser afectados por estructuras convencionales en Bogotá D.C. De hace 40 años y edificios con los requerimientos actuales, en un tiempo de 8 semanas.

Adicionalmente, se desarrolla la caracterización de materiales por medio de los ensayos edométricos (consolidación y resistencia), y ensayos de caracterización para determinar el límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y límite de contracción.

Lo anterior para obtener bases teóricas, experimentales y modelos físicos, que permitan relacionar y sustentar los datos obtenidos, a fin de desarrollar un modelo de enseñanza para la asignatura de Geotecnia 1 de la Universidad Antonio Nariño.

VARIABLES

Consolidación: Obtenido mediante un análisis del comportamiento de los agregados arena del guamo y caolín en diferentes proporciones 1,2,3 - 3,2,1. En condiciones de suelo saturado y no saturado a lo largo de un tiempo definido. Desarrollado en los modelos bajo los puntos de referencia que permitirán medir y describir los cambios del volumen del suelo.

Asentamiento: Obtenido mediante un análisis del comportamiento de los agregados arena del guamo y caolín en diferentes proporciones 1,2,3 - 3,2,1. Con relación a las estructuras (Cargas estáticas) antiguas y actuales de Bogotá D.C. Ejecutado en los modelos bajo los puntos de referencia, que permitirán medir y describir la deformación y asentamiento de las cargas, así como la influencia de de nuevas cargas a las cargas anteriormente soportadas por el suelo.

Licuefacción: Obtenido mediante un análisis del comportamiento de la arena saturada y su interacción con estructuras bajo la influencia de ondas de sismo producidas por una mesa vibratoria, en la clase de “Consolidación, asentamientos y licuefacción” de Geotecnia 1 en la Universidad Antonio Nariño (12 de mayo).

De acuerdo con un proceso descriptivo se generan condiciones para una posible licuefacción, comprobable al someter los modelos A y B en ondas de sismo producidas por una mesa vibratoria el día de sustentación (25 de mayo).

Límite líquido: Obtenido de acuerdo con la norma INV E-125-13, ensayo para la estimación del límite líquido, trabajado experimentalmente y calculado según la norma, para ser analizado y usado como argumento del comportamiento del modelo.

Límite plástico: Obtenido de acuerdo con la norma INV E-126-13, ensayo para la estimación del límite plástico, trabajado experimentalmente y calculado según la norma, para ser analizado y empleado como argumento del comportamiento del modelo.

Índice de plasticidad: Obtenido de acuerdo con la norma INV E-126-13, ensayo para la estimación del índice de plasticidad, trabajado experimentalmente y calculado según la norma, para ser analizado y utilizado como argumento del comportamiento del modelo.

Límite de contracción: Obtenido de acuerdo con la norma INV E-127-13, ensayo para la estimación del límite contracción, trabajado experimentalmente y calculado según la norma, para ser analizado y empleado como argumento del comportamiento del modelo.

Granulometría: Obtenido de acuerdo con la norma INV E-154-13, ensayo para la estimación de la granulometría de los agregados, trabajado experimentalmente y calculado según la norma, para ser analizado y empleado como argumento del comportamiento del modelo.

Corte directo: Obtenido de acuerdo con la norma INV E -213-13 ensayo para la estimación del límite líquido, trabajado experimentalmente y calculado según la norma, para ser analizado y usado como argumento del comportamiento del modelo.

RECOLECTAR DATOS O INFORMACIÓN

Para la extracción de los datos de los modelos se hace empleo de los puntos y líneas de referencia en relación con el seguimiento fotográfico, generando valores cuantificables y directos del comportamiento de los agregados y estructuras.

Para la extracción de datos de los ensayos de laboratorio se emplearon balanzas de gramos y kilogramos, cazuela de Casagrande, probetas, equipo de corte directo y tamices de ensayo disponibles en el laboratorio de ingeniería civil de la Universidad Antonio Nariño. Generando valores registrados en tablas de Excel de fuente propia,

PROCESAMIENTO DE DATOS O INFORMACIÓN

Los datos experimentales extraídos del análisis de comportamiento y relación de las variables junto con el seguimiento fotográfico de los modelos serán relacionados con las propiedades obtenidas por medio de los ensayos de caracterización de los materiales. Dicha relación es empleada para comprender, argumentar y describir el comportamiento de los modelos a escala.

ETAPA 1 Caracterización del material (Límites de consistencia)

El propósito de esta etapa es conocer las características y propiedades de los materiales usados en los experimentos. Para dar alcance a esta etapa se requiere desarrollar los siguientes ensayos de caracterización:

Límite líquido.

El desarrollo de este ensayo tiene como objetivo la caracterización de la muestra (suelo) para determinar los porcentajes de humedad que requiere el material para alcanzar la consistencia líquida. La preparación de las muestras y ejecución del ensayo son de acuerdo con la norma INV E-125-13. Definiendo 3 mezclas diferentes según la proporción de los agregados, arena del guamo y caolín, de la siguiente manera:

- Arena del guamo 60% y caolín 40%
- Arena del guamo 50% y caolín 50%
- Arena del guamo 40% y caolín 60%

Con el propósito de determinar la consistencia del material con diferentes humedades en la cazuela de Casagrande se tomaron datos en rangos de:

- Unión de la ranura a los 15 golpes \pm 2 golpes
- Unión de la ranura a los 20 golpes \pm 2 golpes
- Unión de la ranura a los 30 golpes \pm 2 golpes

Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.

El desarrollo de este ensayo tiene como objetivo la caracterización de la muestra (suelo) para determinar los porcentajes de humedad que requiere el material para alcanzar la consistencia plástica, requiere una adecuada ejecución (manual) de acuerdo con la norma INV E-126-13. Definiendo 3 mezclas diferentes según la proporción de los agregados, arena del guamo y caolín, de la siguiente manera:

- Arena del guamo 60% y caolín 40%
- Arena del guamo 50% y caolín 50%
- Arena del guamo 40% y caolín 60%

Límite de contracción.

El desarrollo de este ensayo tiene como objetivo la caracterización de la muestra (suelo) para determinar los porcentajes de humedad máximos, en el cual un secado adicional no causa disminución de volumen de la muestra, pero por encima del cual un incremento en el contenido de humedad, si produce aumento en el volumen. La preparación de las muestras y ejecución del ensayo son de acuerdo con la norma INV E-127-13. Definiendo 3 mezclas diferentes según la proporción de los agregados, arena del guamo y caolín, de la siguiente manera:

- Arena del guamo 60% y caolín 40%
- Arena del guamo 50% y caolín 50%
- Arena del guamo 40% y caolín 60%

Corte directo.

El desarrollo de este ensayo tiene como objetivo la caracterización de la muestra (suelo) para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo. La preparación de las muestras y ejecución del ensayo son de acuerdo con la norma INV E-154-13. Definiendo 3 mezclas diferentes según la proporción de los agregados, arena del guamo y caolín, de la siguiente manera:

- Arena del guamo 60% y caolín 40%
- Arena del guamo 50% y caolín 50%
- Arena del guamo 40% y caolín 60%

Granulometría.

El desarrollo de este ensayo tiene como objetivo la caracterización de la muestra (suelo) para determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados grueso y fino de un material, por medio de tamizado. La preparación de las muestras y ejecución del ensayo son de acuerdo con la norma INV E-213-13. Aplicado a los materiales Caolín y Arena del Guamo.

ETAPA 2 Desarrollo de componentes de los modelos físicos

- Con el fin de obtener modelos que se adapten a las condiciones de la ciudad estudiada (Bogotá) se desarrollarán los componentes y materiales a emplear en los modelos mediante las siguientes actividades:
Construcción de 2 casas escala 1:100 con las siguientes características:
 - 6 m de ancho x 10 m de profundidad x 4,2 m de alto (2 pisos de 2,1m).
 - Losa de cimentación superficial típica hace 40 años en Bogotá D.C.
 - Un peso bajo el orden de $1.0 \text{ ton}/\text{m}^2$ para 70 toneladas según las técnicas de construcción de la época.
- Construcción de 2 edificios escala 1:100 con las siguientes características:
 - 15 m de ancho x 15 m de profundidad x 27,3 m de alto (13 pisos de 2,1m).
 - 9 pilotes de cimentación y placas de entrepiso aligeradas de acuerdo con el riesgo sísmico nivel medio en la ciudad de Bogotá D.C. (NSR, 2010).
 - Un peso bajo el orden de $4.44 \text{ ton}/\text{m}^2$ para 1000 toneladas según las técnicas de construcción actuales.
- Construcción de 2 peceras a escala 1:100 la cual contiene los estratos de agregados, delimitación de horizontes a 1 cm y un hilo guía para identificar la deformación entre los 3 estratos.
- Construcción de 2 peceras escala 1:100 con las siguientes características:
 - 40 m de ancho x 20 m de profundidad x 30 m de alto.
 - Líneas externas negras separadas cada metro.
 - Líneas alterables rojas entre los estratos, cada 9 delimitando la proporción de agregados en el modelo A (1,2,3) y modelo B (3,2,1).

ETAPA 3 Análisis y seguimiento fotográfico de los modelos físicos

Etapa de seguimiento fotográfico con pequeñas alteraciones que permiten comprender el comportamiento según la relación de las variables y las condiciones generadas a partir de los siguientes pasos:

- Consolidación natural.

- Saturación de suelos.
- Aplicación de cargas típica de Bogotá D.C. hace 40 años.
- Saturación de suelos.
- Aplicación de cargas actuales bajo reglamento sismo resistente (NSR, 2010).

ETAPA 4 Desarrollo de modelos de enseñanza y relación de resultados

Etapa de desarrollo de clase presencial para la asignatura de Geotecnia 1 de la Universidad Antonio Nariño, abarcando los temas de los fenómenos de Consolidación, Asentamientos y Licuefacción. Se fundamenta en el manejo de la información disponible, las normativas, los ensayos, fenómenos y un modelo desarrollado para evidenciar la teoría empleada a lo largo del documento.

Teniendo como factor clave, el uso de una mesa vibratoria y un modelo sobre el cual se desarrollaron las condiciones ideales de acuerdo con la teoría para evidenciar los fenómenos deseados. Adicionalmente, se cuenta con modelos inalterados de referencia.

Análisis y relación de datos teóricos, experimentales y del modelo con el fin de desarrollar el modelo de enseñanza bajo las siguientes actividades:

- Análisis y comprensión del comportamiento de los modelos.
- Comparación del comportamiento con la teoría disponible.
- Comparación de la teoría y comportamiento de los modelos con las propiedades obtenidas en los ensayos de caracterización de los agregados.
- Desarrollo de procesos de enseñanza y demostración experimental de consolidación y licuefacción en suelos típicos de Bogotá.
- Desarrollo de la clase en la asignatura Geotecnia 1 Universidad Antonio Nariño.
- Utilización de mesa vibratoria con modelo para presentar el fenómeno de licuefacción y asentamientos por licuefacción.
- Empleo de los modelos A y B para presentar el fenómeno de consolidación y asentamiento por consolidación.
- Sustentar los pasos anteriores bajo la teoría y los ensayos desarrollados para argumentar el comportamiento de los agregados.

Resumen de la metodología

En las siguientes figuras se resumen las metas, objetivos y sus respectivos tiempos Figura 69- Figura 72

Figura 69

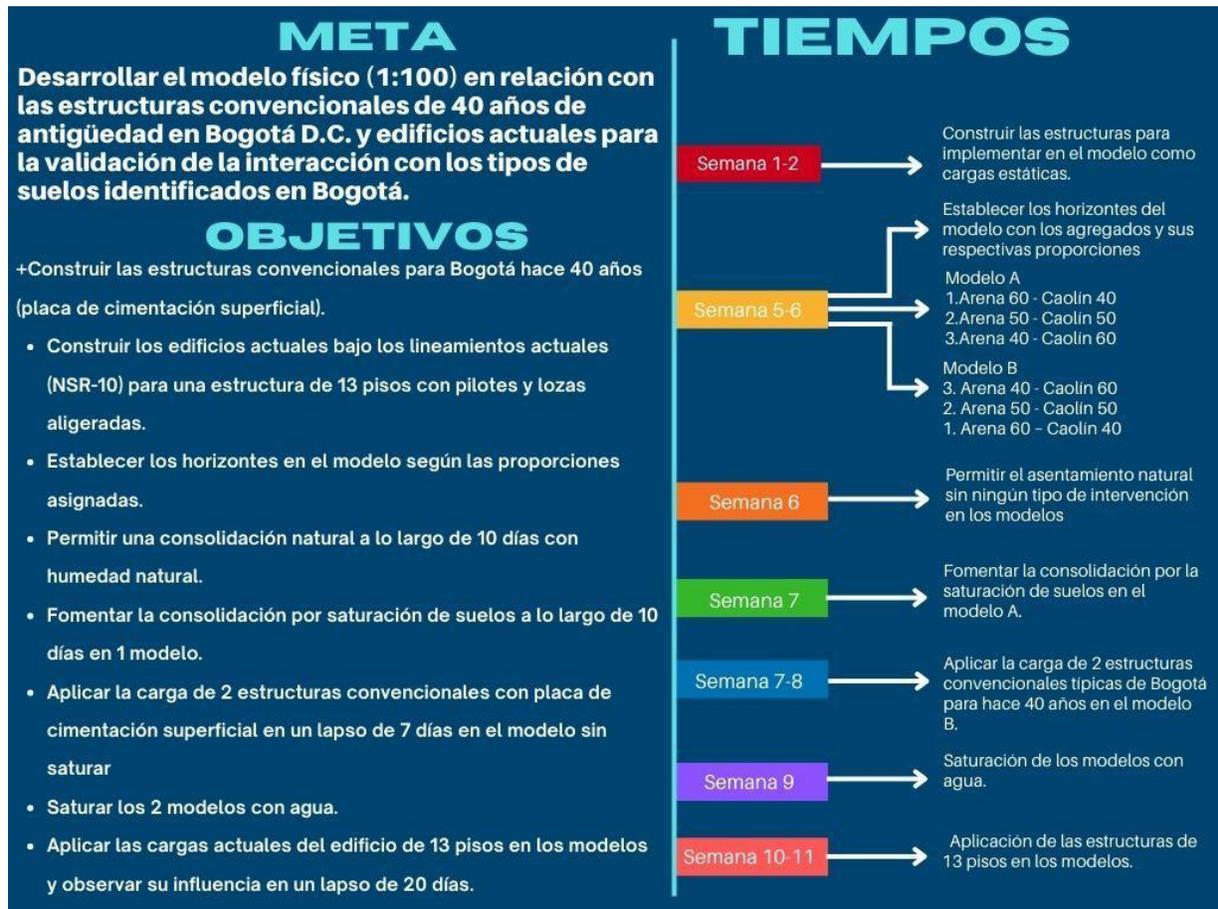
Etapa 1



Fuente: Propia

Figura 70

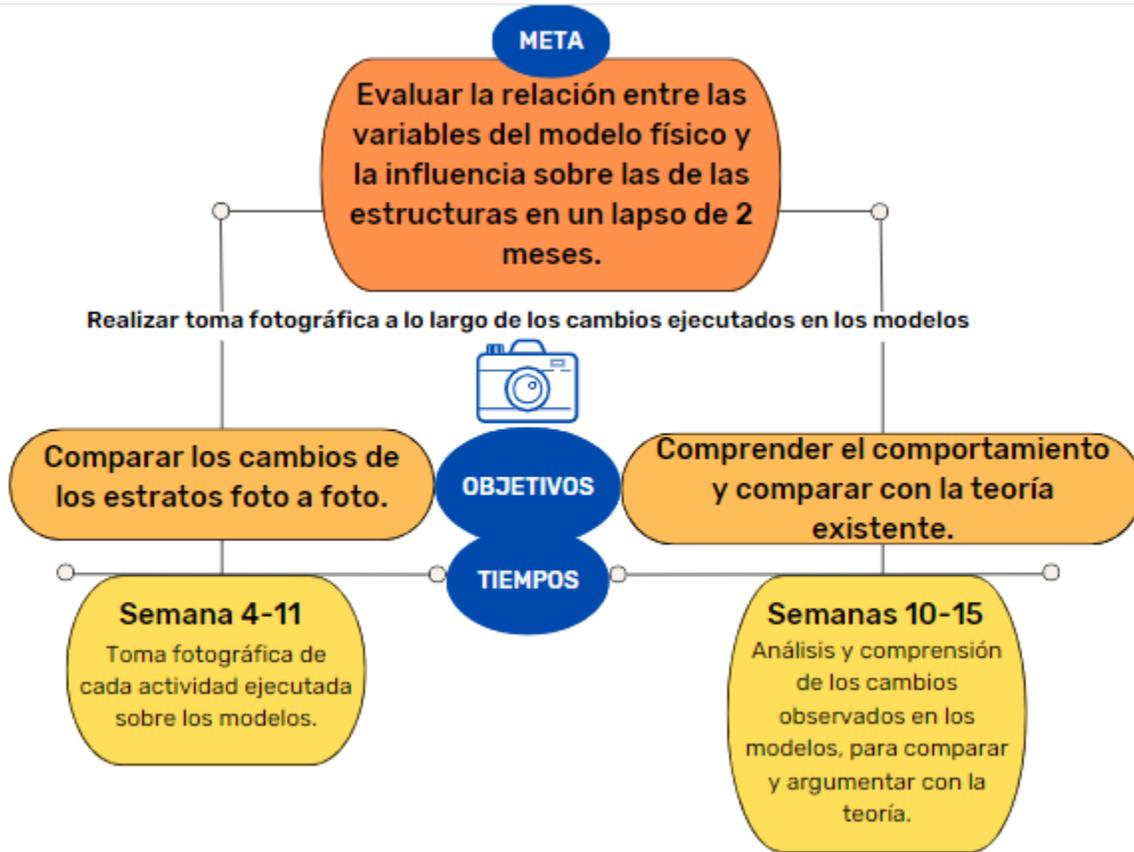
Etapa 2



Fuente: Propia

Figura 71

Etapa 3



Fuente: Propia

Figura 72

Etapa 4



Fuente: Propia

RESULTADOS

Etapa 1

Límite líquido

Una vez definida las proporciones y la cantidad de golpes por lograr, se realizaron la extracción de 3 muestras del mismo suelo y se emplearon los equipos para la continuación del ensayo.

Equipos del ensayo.

Delimitados por la norma INV E-125-13 deben cumplir el material y la calibración original, evitando fallos por desgaste o mala manipulación, principalmente en la cazuela de Casagrande, Figura 73

Figura 73

Cazuela de Casagrande



Nota. De bronce para evitar la oxidación y con los parámetros de las normas INV E-125-13.
Fuente: (Garibay, 2005)

Figura 74

Mortero



Nota. Recipiente para los agregados, totalmente limpio para evitar alteración de materiales.
Fuente: (Unicen, 2022)

Procedimiento.

De acuerdo con la normativa se agrega el material con su proporción de agregados y humedad experimental deseada a la cazuela con un espesor de 1cm y enrasado para el siguiente paso de abertura de la muestra en la Figura 75.

Figura 75

Cazuela con la muestra enrasada.



Nota. Con un espesor de 1 cm de acuerdo con ASTM D4318; AASHTO T89, T90, INV E-125-13.
Fuente: (Garibay, 2005)

Es la determinación de humedad para una muestra, a partir de la cazuela de Casagrande y se toma a partir de la junta de 10mm en la ranura trazada con un ancho de 2mm, como se observa en la Figura 76. Registrado en el proceso desarrollado por (Garibay, 2005a) en la siguiente Figura 77

Figura 76
Abertura de la muestra de 2mm



Nota. Ranura por en medio vertical de la muestra con un ancho de 2mm.
Fuente: (Garibay, 2005)

Figura 77
Ranura lista para proceso de golpes



Nota. Ranura final en la cazuela, lista para los 2 golpes por segundo. Fuente: (Garibay, 2005)

Con los pasos anteriores listos, se procede a realizar los golpes (2 por segundo) según la norma (INV E-125-13) ejecutado con diferentes humedades de la muestra según número de golpes a lograr, posteriormente se extrae la porción horizontal de la ranura que se unió como se evidencia en las siguientes Figura 78 y Figura 79

Figura 78

Unión de la abertura



Nota. Unión de la ranura de 12,5 mm (en el caso experimental de la fuente).
Fuente: (Garibay, 2005)

Figura 79

Extracción de la porción de la muestra



Nota. Extracción de la muestra para definición de humedad.
Fuente: (Garibay, 2005)

Toma de datos

Para la extracción eficiente del material se debe realizar registro de pesos del recipiente, recipiente + muestra húmeda y recipiente + muestra seca. Todo lo anterior en su correspondiente proporción de agregados y número de golpes deseados, como se observa en la siguiente Figura 80.

Figura 80

Toma de datos experimentales del ensayo de límite líquido.

LÍMITE LÍQUIDO								
Proporción	CAOLÍN 50 ARENA 50							
Recipiente	W.Rec (g)	W.Rec+W.Sh (g)	W.Sh (g)	W.Rec+W.Ss (g)	W.Ss (g)	Agua (g)	Número de golpes	Límite Líquido
3	136,5	321	184,5	288,5	152,0	32,5	13	21,39%
51	95	169	74	160,1	65,1	8,9	15	13,63%
5	126	207,5	81,5	199,6	73,6	7,9	17	10,80%
Brian14	124	215	91	204,9	80,9	10,1	22	12,53%
10	96	181	85	169,9	73,9	11,1	29	14,99%
A	77,5	169	91,5	154,3	76,8	14,7	31	19,12%
Proporción	CAOLÍN 60 ARENA 40							
Recipiente	W.Rec (g)	W.Rec+W.Sh (g)	W.Sh (g)	W.Rec+W.Ss (g)	W.Ss (g)	Agua (g)	Número de golpes	Límite Líquido
B-VIII	27,38	49,76	22,38	45,33	17,95	4,43	18	24,68%
B-IX	16,7	42,66	25,96	37,42	20,72	5,24	16	25,29%
B-X	16,69	34,61	17,92	30,89	14,2	3,72	15	26,20%
B-IV	18,64	46,88	28,24	41,41	22,77	5,47	25	24,02%
B-V	16,98	41,17	24,19	36,54	19,56	4,63	23	23,67%
B-VI	25,65	51,41	25,76	46,68	21,03	4,73	21	22,49%
B-VII	17,02	47,45	30,43	44,94	27,92	2,51	33	8,99%
B-XI	18,4	41,8	23,4	37,47	19,07	4,33	33	22,71%
B-XII	19,25	45,83	26,58	41,02	21,77	4,81	30	22,09%

Nota. Los colores demarcan el número de golpes a lograr, siendo 15 el más claro y 30 el más oscuro.

Fuente: Propia

Límite plástico

Equipos del ensayo.

Los requerimientos en equipos en materiales son variables, desde que permitan generar rollos de 3mm de espesor y 10 cm (± 2 cm) con la condición fundamental de no alterar ni contaminar las propiedades originales del suelo trabajado. Posteriormente, se emplean materiales básicos como recipientes y hornos para procesos de secado de la muestra.

Procedimiento.

(Garibay, 2005b) presenta el proceso dentro de los lineamientos de la norma INV E-126-13 la cual establece que se deben generar masas (esferas) que sean manipulables (no se adhieran a la mano). Seguidamente, rolar en la superficie limpia Figura 81, en busca de rollos de 3mm de espesor sin grietas, como se observa en la Figura 82, otro parámetro es que se pueda levantar de un extremo sin su rotura.

Figura 81

Trozo de muestra para moldear



Nota. Masa para moldear en rollos
 . Fuente: (Garibay, 2005b)

Figura 82

Rolado de material en busca de las condiciones de la norma INV E-126-13



Nota. Rollos deseados sin rotura.
 Fuente: (Garibay, 2005b)

Generan 3 rollos por recipiente, a fin de 3 recipientes por proporción de agregados en la muestra para su ingreso al horno y cálculo de la humedad.

Toma de datos.

La extracción eficiente del material se debe realizar registro de pesos del recipiente, recipiente + muestra húmeda y recipiente + muestra seca. Todo lo anterior en su correspondiente proporción de agregados, como se observa en la siguiente Figura 83.

Figura 83

Toma de datos experimentales del ensayo de límite plástico.

LÍMITE PLÁSTICO							
Proporción	CAOLÍN 50 ARENA 50						
Recipiente	W.Rec (g)	W.Rec+W.Sh (g)	W.Sh (g)	W.Rec+W.Ss (g)	W.Ss (g)	Agua (g)	Límite Plástico
1	120,5	169	48,5	158,25	37,75	10,75	28,48%
22	92,5	165,5	73	148,15	55,65	17,35	31,18%
6	96	167,5	71,5	151,94	55,94	15,56	27,82%
Proporción	CAOLÍN 60 ARENA 40						
Recipiente	W.Rec (g)	W.Rec+W.Sh (g)	W.Sh (g)	W.Rec+W.Ss (g)	W.Ss (g)	Agua (g)	Límite Plástico
B-I	25,45	38,65	13,2	36,62	11,17	2,03	18,17%
B-II	18,69	29,45	10,76	27,82	9,13	1,63	17,85%
B-III	18,31	29,02	10,71	27,4	9,09	1,62	17,82%

Fuente: Propia

Límite de contracción

Equipos y materiales.

En equipos la normativa no requiere de componentes sofisticados, pero si exige que el mecanismo o aparato desarrollado para medir el volumen sea muy eficiente, conformado de acuerdo con la norma INV E-127-13 como se observa en las siguientes Figura 84 , Figura 85 y Figura 86.

Figura 84

Conjunto para determinar el límite de contracción de suelos



Nota. a) Probeta plástica de 25 ml. b) Placa de contracción con púas. c) Recipiente para cristalización Ø 55 mm x 23 mm altura. D) Plato de contracción Monel Ø 45 mm x 12,7 mm altura. e) Cápsula de porcelana de 125 ml.
Fuente: (Pinzuar, 2023)

Figura 85

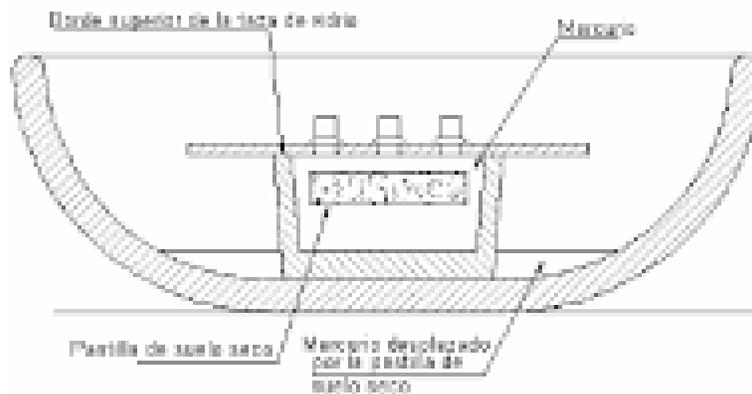
Mercurio



Nota. Autores como (Peña & Rey, 2020) comparan el uso de fluidos diferentes al mercurio (Peña & Rey, 2020).
Fuente: (ConceptoDef,2021)

Figura 86

Aparato para determinar el cambio volumétrico del suelo



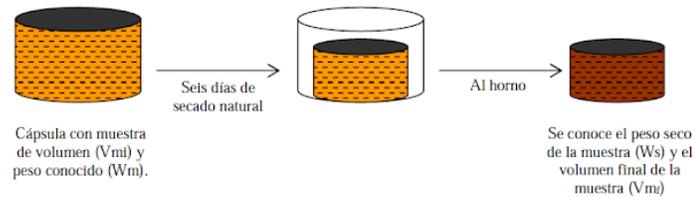
Nota. Diagramas de construcción del equipo para desarrollo del ensayo.
Fuente: (INV E-127-13)

Procedimiento.

La muestra de suelo en su proporción específica de agregados se coloca en la vasija de evaporación, compactando para generar consolidación de vacíos con contenidos de aire. Posteriormente, se deja secar de manera natural. Como se evidencia en la Figura 87, para luego emplear el mercurio y el aparato dictado por norma y medir el volumen nuevo como en la Figura 88.

Figura 87

Contracción de la muestra por secado natural



Nota. Secuencia de tratamiento de la muestra Fuente:(LLDI, 2017)

Figura 88

Desarrollo del ensayo por (Bowles, 2018)



Nota. Desarrollo del ensayo. Fuente: (Bowles, 2018)

Toma de datos.

Para la extracción eficiente del material se debe realizar registro de pesos y volumen del recipiente, recipiente + muestra húmeda y recipiente + muestra seca. Todo lo anterior en su correspondiente proporción de agregados, como se observa en la siguiente Figura 89.

Figura 89

Toma de datos experimentales del ensayo de límite de contracción

LÍMITE DE CONTRACCIÓN												
CAOLÍN 50 ARENA 50												
Proporción	W.Rec (g)	Vol.Re c (mL)	W.Rec+ W.Sh (g)	W.Sh (g)	W.Rec+ W.Ss (g)	W.Ss (g)	W.Rec+W .Agua (g)	W.Agu a (g)	Vol.Agu a (mL)	Vol.Ss (mL)	Cont.Hu medad	Límite de Contracción
V-I	2,50	17,50	51,61	49,11	45,69	43,19	5,92	3,42	3,50	14,00	7,92	7,84
V-II	45,50	47,50	116,60	71,10	63,68	18,18	52,92	7,42	7,50	40,00	40,81	40,40
CAOLÍN 60 ARENA 40												
Proporción	W.Rec (g)	Vol.Re c (mL)	W.Rec+ W.Sh (g)	W.Sh (g)	W.Rec+ W.Ss (g)	W.Ss (g)	W.Rec+W .Agua (g)	W.Agu a (g)	Vol.Agu a (mL)	Vol.Ss (mL)	Cont.Hu medad	Límite de Contracción
V°	3,00	36,50	89,71	86,71	77,61	74,61	12,10	9,10	9,00	27,50	12,20	12,08
V°°	3,00	35,50	90,10	87,10	78,23	75,23	11,87	8,87	9,00	26,50	11,79	11,67
V°°°	3,50	35,50	88,55	85,05	76,74	73,24	11,81	8,31	8,00	27,50	11,35	11,24
CAOLÍN 40 ARENA 60												
Proporción	W.Rec (g)	Vol.Re c (mL)	W.Rec+ W.Sh (g)	W.Sh (g)	W.Rec+ W.Ss (g)	W.Ss (g)	W.Rec+W .Agua (g)	W.Agu a (g)	Vol.Agu a (mL)	Vol.Ss (mL)	Cont.Hu medad	Límite de Contracción
V1	2,50	19,50	68,75	66,25	65,75	63,25	3,00	0,50	0,50	19,00	0,79	0,78
V2	2,50	17,00	68,71	66,21	65,71	63,21	3,00	0,50	0,50	16,50	0,79	0,78
V3	1,50	18,50	68,73	67,23	66,64	65,14	2,09	0,59	0,50	18,00	0,91	0,90

Nota. Desarrollo del ensayo. Fuente: Propia

Granulometría

Equipos del ensayo.

Los tamices por utilizar se seleccionan según el tipo de material a trabajar. Dependiendo de si es fino o grueso, la norma INV E-213-13 tiene ciertas recomendaciones Figura 90.

Figura 90

Tamices de acuerdo con la necesidad del ensayo



Nota. Los marcos de los tamices se deberán acoplar de forma que se evite cualquier pérdida de material durante el proceso de tamizado (INV E-213-13).

. Fuente: (BIOWEB,2023)

Procedimiento.

De acuerdo con la norma INV E-213-13 la muestra se debe encontrar seca, a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) se emplearán tamices en orden decreciente con unidades 4, 10, 20, 40, 60, 140 y 200 aplicando arena de guamo y agitando a mano.

Toma de datos.

Para la extracción eficiente del material se debe realizar registro de pesos del recipiente y recipiente + muestra, ordenando los datos como se observa en la siguiente Figura 91.

Figura 91

Toma de datos experimentales del ensayo de granulometría

GRANULOMETRÍA ARENA DE GUAMO																		
PESO SECO MUESTRA = 500 g																		
# tamiz	Diámetro			W Retenido			W Corregido			W retenido			w acumulado			Pasa		
unidad	mm			g			g			%			%			%		
Muestra	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
4	4,75	4,75	4,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100
10	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100
20	0,85	0,85	0,85	40,2	39,5	45,21	40,26	39,51	45,23	8,05	7,9	9,05	8,05	7,9	9,05	91,95	92,1	90,95
40	0,43	0,43	0,43	229,7	230,1	234,1	230,07	230,15	234,22	46,01	46,03	46,84	54,07	53,93	55,89	45,93	46,07	44,11
60	0,25	0,25	0,25	202,5	204,6	200,2	202,82	204,64	200,3	40,56	40,93	40,06	94,63	94,86	95,95	5,37	5,14	4,05
140	0,11	0,11	0,11	24,3	23,4	19,25	24,34	23,4	19,26	4,87	4,68	3,85	99,5	99,54	99,8	0,5	0,46	0,2
200	0,08	0,08	0,08	2,5	2,3	0,98	2,5	2,3	0,98	0,5	0,46	0,2	100	100	100	0	0	0
fondo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	0	0	0
total				499,2	499,9	499,7	500	500	500									

Fuente: Propia

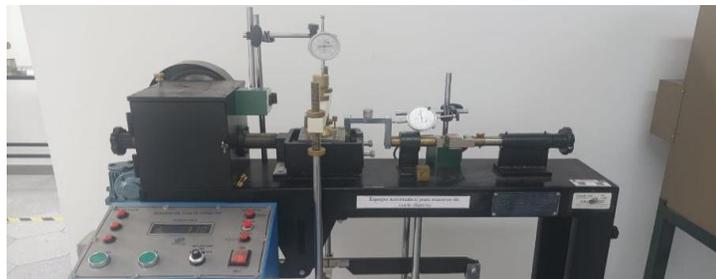
Corte directo

Equipos del ensayo.

Según la norma INV E-154-13 se debe usar el aparato de corte con sus correspondientes componentes e indicadores, de acuerdo con las siguientes Figura 92 a la Figura 96.

Figura 92

Aparato de corte



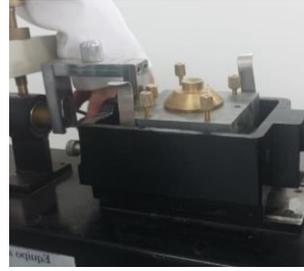
Fuente: Propia

Figura 93
Panel de control e indicador de Fuerza



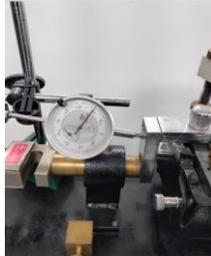
Fuente: Propia

Figura 94
Caja de corte



Fuente: Propia

Figura 95
Medidor de desplazamiento lateral



Fuente: Propia

Figura 96
Medidor de desplazamiento normal



Fuente: Propia

Procedimiento.

La muestra para trabajar fue extraída directamente del modelo B como se observa en la Figura 97, posteriormente fue definida y aplicada en la caja de corte Figura 99, donde se realiza el ensamble al aparato de corte Figura 100 y se activa el mecanismo para extraer la información de los medidores.

Figura 97
Extracción de la muestra



Fuente: Propia

Figura 98
Definición de la muestra



Fuente: Propia

Figura 99
Caja de corte lista



Fuente: Propia

Figura 100
Aparato de corte listo



Fuente: Propia

Toma de datos.

Para la extracción eficiente del material se debe ejecutar registro de pesos del recipiente y recipiente + muestra, ordenando los datos como se observa en la siguiente Figura 101.

Figura 101
Toma de datos experimentales del ensayo de corte directo.

ENSAYO DE CORTE DIRECTO											
MUESTRA	#	W Anillo (g)	Diam. anillo (cm)	W Anillo Muestra (g)	W Muestra (g)	Área Muestra (cm ²)	h Muestra (cm)	Vol Muestra (cm)	W Unitario (g/cm ³)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Carga (Kg)
Modelo B	1	73,6	5	146,72	73,12	19,63	2	39,27	1,86	0,204	4
	2	73,55	5	146,92	73,37	19,63	2	39,27	1,87	0,204	4
	3	73,55	5	146,85	73,3	19,63	2	39,27	1,87	0,204	4
	4	73,57	5	146,61	73,04	19,63	2	39,27	1,86	0,204	4
	5	73,57	5	147,6	74,03	19,63	2	39,27	1,89	0,204	4
CONTENIDO DE HUMEDAD											
MUESTRA	#	Recip (#)	W Anillo (g)	W Recip + Muestra hu (g)	W Recip+ Muestra se (g)	Cont. Humedad (%)					
Modelo B	1	15	48,39	119,89	101,22	35,3					
	2	7	41,48	165,63	133,56	34,8					
	3	10	39,86	143,09	117,11	33,6					
	4	9	42,82	123,88	104,24	32					
	5	14	39,6	133,7	110,35	33					

Fuente: Propia

Etapa 2

Construcción de 2 casas escala 1:100

Figura 102
Aplicación de acero en placa de cimentación.



Fuente: Propia

Figura 103
Placas de cimentación fundidas



Fuente: Propia

Figura 104
Casas para modelo A



Fuente: Propia

Construcción de 2 edificios escala 1:100

Figura 105

Placas de edificios



Nota. Fundición de placas. Fuente: Propia

Figura 106

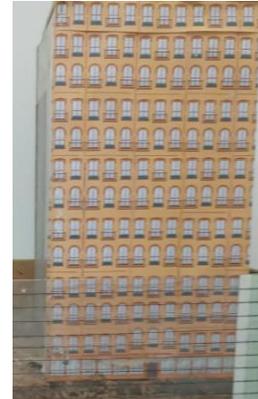
Edificio modelo A



Nota. Edificio modelo A. Fuente: Propia

Figura 107

Edificio modelo B



Nota. Edificio modelo B. Fuente: Propia

Construcción de 2 peceras escala 1:100

Modelo A.

1. Arena 60 - Caolín 40
2. Arena 50 - Caolín 50
3. Arena 40 - Caolín 60

Figura 108

Modelo A 123



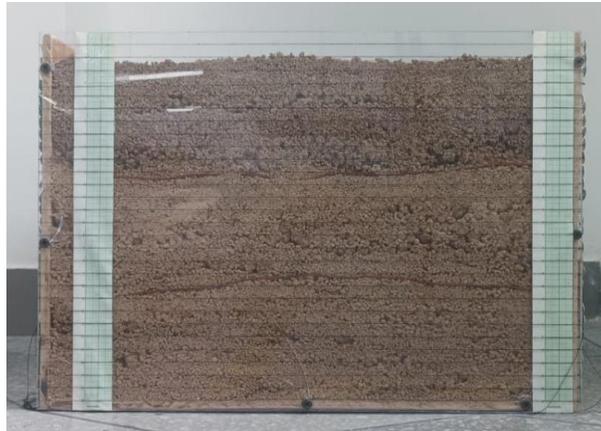
Nota. Momento exacto de vertimiento de agregados. Fuente: Propia

Modelo B.

- 3. Arena 40 - Caolín 60
- 2. Arena 50 - Caolín 50
- 1. Arena 60 - Caolín 40

Figura 109

Modelo B 321



Nota. Momento exacto de vertimiento de agregados. Fuente: Propia

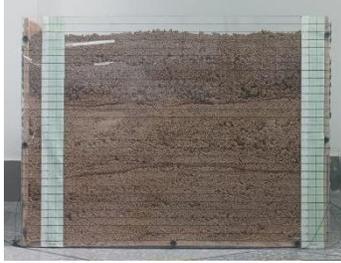
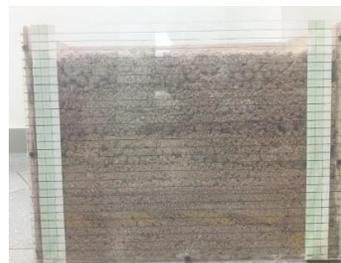
Etapas 3

Seguimiento fotográfico de los modelos físicos

Tabla 1

Tabla de registro fotográfico por tiempo y acción en los modelos A Y B

Tiempo	Acción	Toma fotográfica
--------	--------	------------------

<p>Semana 5-6</p>	<p>Establecer los horizontes del modelo con los agregados y sus respectivas proporciones Modelo A 1. Arena 60 - Caolín 40 2. Arena 50 - Caolín 50 3. Arena 40 - Caolín 60 Modelo B 3. Arena 40 - Caolín 60 2. Arena 50 - Caolín 50 1. Arena 60 - Caolín 40</p>	<p>Figura 110</p>  <p>Fuente: Propia</p>	<p>Figura 111</p>  <p>Fuente: Propia</p>
<p>Semana 6</p>	<p>Permitir el asentamiento natural sin ningún tipo de intervención en los modelos</p>	<p>Figura 112</p>  <p>Fuente: Propia</p>	<p>Figura 113</p>  <p>Fuente: Propia</p>
<p>Semana 7</p>	<p>Fomentar la consolidación por la saturación de suelos en el modelo B.</p>	<p>Figura 114</p>  <p>Fuente: Propia</p>	<p>Figura 115</p>  <p>Fuente: Propia</p>
<p>Semana 7-8</p>	<p>Aplicar la carga de 2 estructuras convencionales típicas de Bogotá para hace 40 años en el modelo A.</p>		

		<p>Figura 116</p>  <p>Fuente: Propia</p>	<p>Figura 117</p>  <p>Fuente: Propia</p>
<p>Semana 9</p>	<p>Saturación de los modelos con agua.</p>	<p>Figura 118</p>  <p>Fuente: Propia</p>	<p>Figura 119</p>  <p>Fuente: Propia</p>
<p>Semana 10-11</p>	<p>Aplicación de las estructuras de 13 pisos en los modelos.</p>	<p>Figura 120</p>  <p>Fuente: Propia</p>	<p>Figura 121</p>  <p>Fuente: Propia</p>

Figura 122



Fuente: Propia

Figura 123



Fuente: Propia

Figura 124



Fuente: Propia

Figura 125



Fuente: Propia

Figura 126

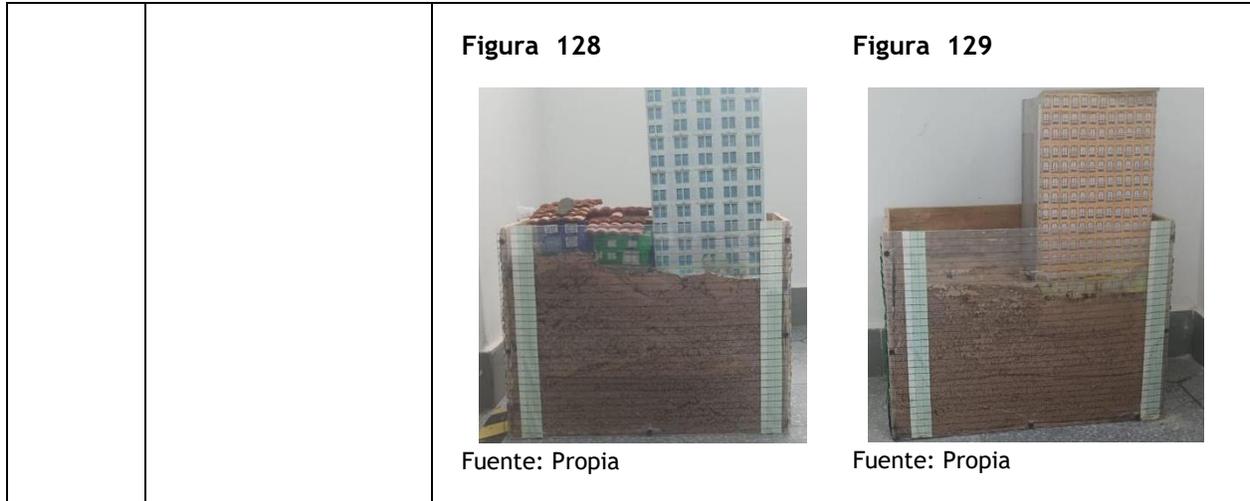


Fuente: Propia

Figura 127



Fuente: Propia



Etapa 4

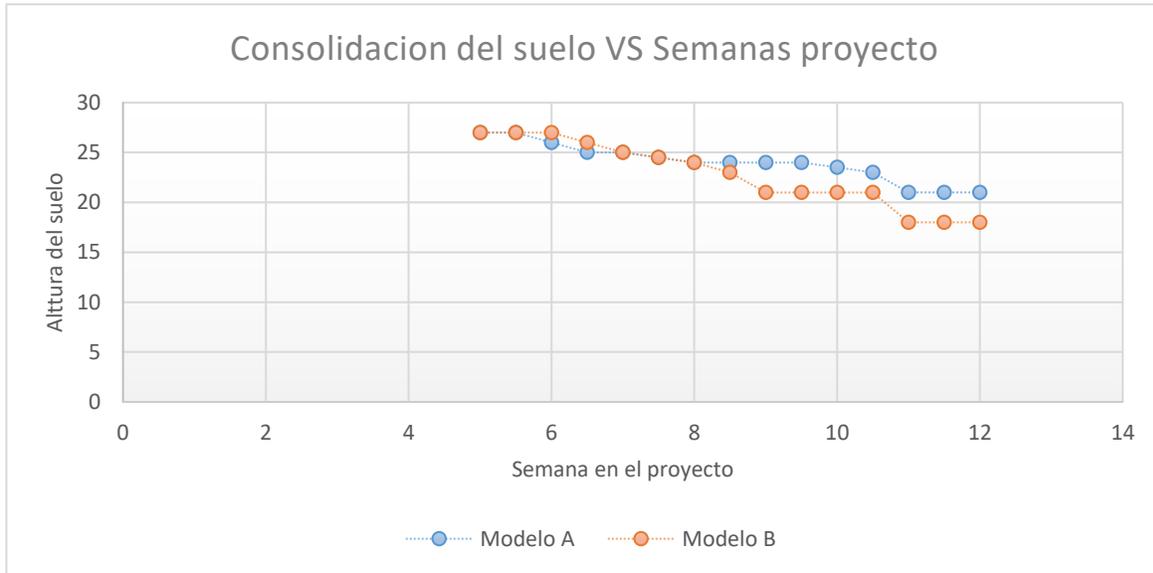
Tras el desarrollo de la clase de “Consolidación, asentamiento y licuefacción” en la asignatura Geotecnia 1 de la Universidad Antonio Nariño el día 12 de mayo de 2023 en el laboratorio de ingeniería civil en la sede circunvalar. Se obtuvieron resultados satisfactorios de acuerdo a la atención y comprensión de los estudiantes. Lo anterior debido al uso de fundamentos teóricos, datos de laboratorio y modelo experimentales, los cuales permitieron diferentes alternativas de información.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los ensayos desarrollados se ajustan de manera óptima a la teoría existente y en los estándares de comportamiento de los agregados según los límites típicos obtenidos de las arcillas (caolín) y arenas (arena del guamo). Adicionalmente, a los ensayos de caracterización se implementaron los modelos experimentales, obteniendo la figura 130 de acuerdo con los perfiles del suelo.

Figura 130

Gráfica altura del suelo vs tiempo.



La saturación del modelo B favoreció el asentamiento por consolidación final. Fuente: Propia

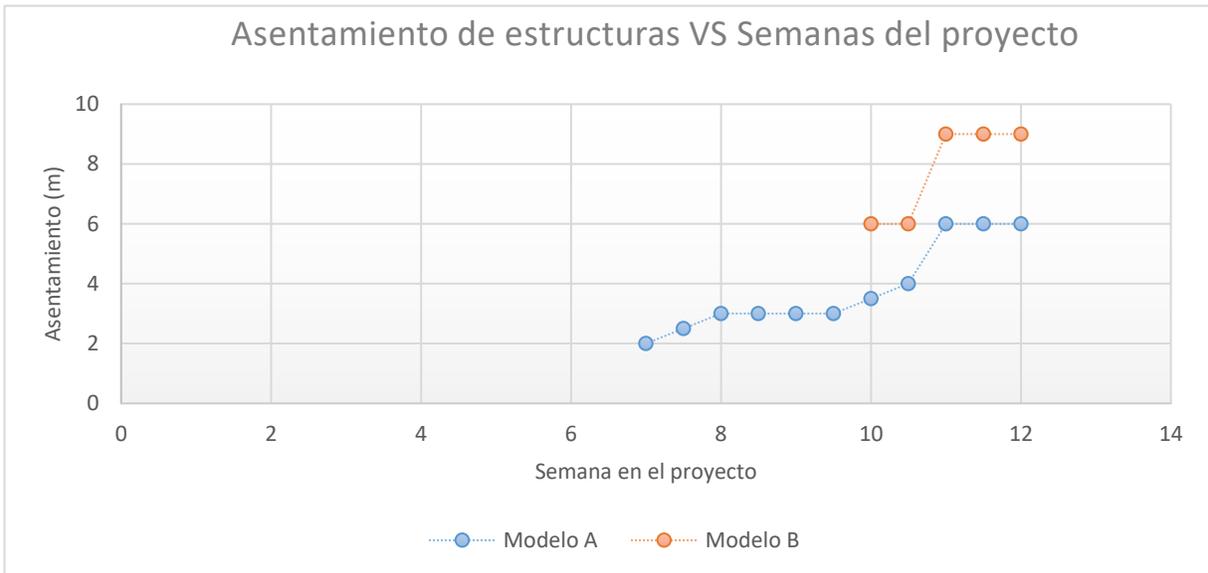
Direccionado a comprender el comportamiento de los modelos de la Figura 110 hasta Figura 129, se emplearon los análisis de resultados de los límites de consistencia. Destacando que los límites líquido y plástico no se pudieron desarrollar en la proporción C40-A60, reflejando que la mayor cantidad de arena afecta la resistencia y maleabilidad de la mezcla. Por otro lado, debido a que el límite de contracción se ejecutó satisfactoriamente en las 3 proporciones, es el más conveniente para otorgar los valores cuantitativos de referencia.

Teóricamente, la INV E-127-13 indica que el límite de contracción define la cantidad de agua máxima que altera el volumen del suelo. Experimentalmente, la proporción C40-A30 presento la mínima absorción de agua (Promedio de 0,53 g), caracterizando al caolín como el agregado más absorbente frente a la arena del guamo, deduciendo que a mayor proporción de caolín se genera mayor presión de poros y por ende aumento del volumen del suelo.

Aplicado a los modelos se identifica en la Figura 112 y Figura 113 que la consolidación natural es similar en los 2 modelos. Evidenciando un bajo asentamiento (1m) posterior a la implementación de las 2 viviendas típicas de hace 40 años en Bogotá D.C. Posterior a la saturación y completa absorción del agua por suelo, el modelo B se encuentra más consolidado sin ser cargado aún Figura 121. Finalmente, a razón de que el modelo B tiene mayor proporción de caolín en el estrato de contacto directo con la estructura (C60-A40), genero un asentamiento por consolidación primaria final 3 m mayor que en la estructura del modelo A Figura 123.

Figura 131

Gráfico asentamiento vs tiempo.



Nota. Los asentamientos de las estructuras del modelo B comienzan tiempo después debido a que primero se saturó el terreno a la vez que se aplicaron las viviendas típicas de hace 40 años para Bogotá en el modelo A.
Fuente: Propia

CONCLUSIONES

- Los resultados de los ensayos de laboratorio y de los modelos experimentales se ajustan a la teoría, obteniendo una metodología idónea para el desarrollo de modelos enseñanza de fenómenos de consolidación, asentamientos y posible licuefacción.
- Las magnitudes a escala de los modelos empleados reflejaron el comportamiento real de las variables en casos similares, argumentando el uso de modelos a escala en modelos de enseñanza de consolidación, asentamientos y posible licuefacción.
- La cantidad de agua presente en el suelo (N.F) es fundamental su comportamiento frente a las exigencias estructurales del suelo, incrementando la vulnerabilidad frente amenazas de asentamientos por consolidación y asentamientos por licuefacción.
- La sobreconsolidación desarrollada hasta la fecha puede verse afectada por el aumento en la magnitud de las construcciones y su interacción con el suelo, aumentando los asentamientos estructurales y llegando a estratos inalterados, lo que conlleva al aumento del riesgo por daño a estructuras vecinas antiguas, riesgo por asentamiento diferencial y riesgo de asentamiento por licuefacción de suelos.

CONTRIBUCIONES Y RECOMENDACIONES

Contribuye a desarrollar una metodología de enseñanza que se adapte a los diferentes procesos de comprensión de los estudiantes, generando alternativas teóricas, normativas, experimentas y por modelos a escala. Estableciendo comprensión de amenazas, vulnerabilidad, riesgo, consolidación, asentamientos, licuefacción, ensayos de caracterización, modelos a escala, entre otros.

Identificar la variedad de factores ambientales sin considerar y el estimar de forma analítica el comportamiento a gran escala de las zonas vulnerables a los diferentes fenómenos expuestos.

REFERENCIAS

- AN. (2021). *Asentamientos: Un riesgo para las estructuras*.
<https://www.anic.com.mx/post/asentamientos-en-suelos>
- ASTM D-2435. (2018). https://kupdf.net/download/astm-d-2435-consolidacion_5bec4da2e2b6f56e31838704_pdf
- Borselli, D. L. (2022). *GEOTECNIA I Año Académico 2022-2023*.
- Caicedo, B., Mendoza, C., López, F., & Lizcano, A. (2018). Behavior of diatomaceous soil in lacustrine deposits of Bogotá, Colombia. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(2), 367-379. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.10.005>
- Cardona Arboleda, O. D. (1991). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. En *Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo* (pp. 10-10).
- Castro, G. E. (2010). *ZONIFICACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE BOGOTÁ PARA EL DISEÑO SISMO RESISTENTE DE EDIFICACIONES* (p. 168).
https://www.idiger.gov.co/documents/20182/112614/Zonificacion_Respuesta_Sismica-FOPAE-2010.pdf
- Day, R. W. (2012). *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook: With the 2012 International Building Code*. McGraw-Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.uan.edu.co/content/book/9780071792387>
- Fioravante, V., Giretti, D., Airoldi, S., & Moglie, J. (2021). Effects of seismic input, fine crust and existing structure on liquefaction from centrifuge model tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(10), 3807-3833. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01139-4>
- García, L. E. (2015). Desarrollo de la Normativa Sismo Resistente Colombiana en los 30 años desde su primera expedición. *Revista de Ingeniería*, 41, Article 41.
<https://doi.org/10.16924/riua.v0i41.785>
- Geomecánica*, 2016. (s. f.). Recuperado 18 de abril de 2023, de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/geomecanica.pdf?sequence=15&isAllowed=y>

- Geotechnical, C. (2022). *Ensayo consolidacion de suelos y edometro*.
<https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/consolidacion-de-suelos/>
- GF Geotecnia Fácil. (2018, febrero 2). *geotecniafacil.com*. <https://geotecniafacil.com/licuefaccion-suelos/>
- Ghorbani, E., & Rajabi, A. M. (2020). A review on spt-based liquefaction potential evaluation to assess the possibility of performing a risk management. *Scientia Iranica*, 27(2 A), 639-656. Scopus.
<https://doi.org/10.24200/sci.2018.5664.1413>
- González, D. E. L. (2016). *El metodo científico*.
- IDIGER. (2023). *Riesgo Sísmico—IDIGER*. <https://www.idiger.gov.co/rsismico>
- INGEOMINAS, UPES, & Dirección nacional para la prevención y atención de desastres. (1997).
Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá.
- Matsumoto, T., Ueno, K., Isobe, K., Nishioka, H., & Watanabe, K. (Eds.). (2017). *Remedial Measures Against Soil Liquefaction: From Investigation and Design to Implementation*. Routledge.
<https://doi.org/10.1201/9780203740910>
- Mendoza, C., Caicedo, B., & Duque, J. (2022). Technical report on the compression, structure, and creep behaviors of lacustrine soil deposits in Bogotá, Colombia. *Soils and Foundations*, 62(5), 101215.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101215>
- Nespereira, J., Monterrubio, S., Yenes, M., Fernández, B., & Alonso, J. A. (2013). *CREACIÓN DE MODELOS A ESCALA DE SITUACIONES REALES EN DISTINTAS OBRAS PARA ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE MATERIALES GRANULARES Y COHESIVOS (II): PRESA DE HORMIGÓN Y EFECTOS SÍSMICOS EN SUELOS*.
- NSR. (2010). *Norma Sismo Resistente*.
- Ochoa Averos, S., Bizarreta-Ortega, J. C., & Quevedo, L. (2020, septiembre 14). *APARATO DIDÁCTICO PARA EXPERIMENTOS DE LICUACIÓN DE SUELOS*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4027968>
- Orozco, L. F. (2016). *ASENTAMIENTOS TOTALES Y DIFERENCIALES EN BOGOTÁ - RECUPERACIÓN DE LA VERTICALIDAD DE EDIFICIOS*.

- Ortiz-Hernández, E., Chunga, K., Toulkeridis, T., & Pastor, J. L. (2022). Soil Liquefaction and Other Seismic-Associated Phenomena in the City of Chone during the 2016 Earthquake of Coastal Ecuador. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(15). Scopus. <https://doi.org/10.3390/app12157867>
- Pathak, S. R., Kshirsagar, M. P., & Joshi, M. S. (2013). Liquefaction Triggering Criterion Using Shake Table Test. *International Journal of Engineering and Technology*, 5, 4439-4449.
- Poliotti, M., & Sierra, P. (2007). *Consolidación unidimensional de suelos*.
- Richard L. Handy. (2020). *Soils Behaving Badly*. McGraw-Hill Education. <https://ezproxy.uan.edu.co:2107/content/book/9781260026030/chapter/chapter4>
- Rivera, T. E. O. (2009, octubre 21). Antología de los efectos de la licuefacción en suelos sujetos a solicitaciones sísmicas. Ejemplos de casos. *Monografias.com*. <https://www.monografias.com/trabajos-pdf2/antologia-licuefaccion-suelos-sismicos/antologia-licuefaccion-suelos-sismicos>
- Saha, P., Horikoshi, K., & Takahashi, A. (2020). Performance of sheet pile to mitigate liquefaction-induced lateral spreading of loose soil layer under the embankment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106410>
- Salas, O. V. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. *Métodos y Materiales*, 1(1), 14-24. <https://doi.org/10.15517/mym.v1i1.8391>
- Salinas, .L.M, Yapari, H. J., Canelas, A., & Aranibar, A. (2018). *Mecánica Suelos II UMSS: Vol. II*. https://kupdf.net/download/texto-guia-mecanica-suelos-ii-umss_5af3d170e2b6f5d5620dff78_pdf
- Suelo–IDEAM*. (s. f.). Recuperado 18 de abril de 2023, de <http://www.ideam.gov.co/web/siac/suelo>
- Torres, V., Vandenberghe, J., & Hooghiemstra, H. (2005). An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogotá basin (Colombia) during the last 3 million years from abiotic and biotic proxies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 226(1), 127-148. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.05.005>
- UPTL. (2009). *Consolidación Unidimensional de los Suelos*. <https://www.slideshare.net/UCGcertificacionvial/consolidacin-unidimensional-de-los-suelos-1823900>

Zhang, X., Liu, X., Xu, Y., Wang, G., & Wang, F. (2023). Swelling-shrinkage mechanisms of diatomaceous soil and its geohazard implication. *Engineering Geology*, 107009. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107009>