

**EQUIPO DE PERMEABILIDAD DE DOBLE CABEZA CONSTANTE PARA EL LABORATORIO DE LA FACULTAD
INGENIERÍAS DE LA UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA.**

Valentina González López, Laura Valentina Palacios Toquica, Cristian Edison Rodríguez Leandro.



Ingeniería Civil, Facultad de ingenierías.

Universidad La Gran Colombia.

Bogotá D.C

2023

**Equipo de permeabilidad de doble cabeza constante para el laboratorio de la Facultad de Ingenierías
de la Universidad la Gran Colombia.**

Valentina González López, Laura Valentina Palacios Toquica, Cristian Edison Rodríguez Leandro.

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero civil.

Harol León Zambrano Urbano, director.



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Ingeniería Civil, Facultad de ingenierías.

Universidad La Gran Colombia.

Bogotá D.C

2023

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado a nuestros padres, por su apoyo incondicional, amor y sacrificio a lo largo de nuestra formación académica y profesional. Su aliento constante y confianza han sido la fuerza que nos impulsa a seguir adelante.

A docentes, asesores y compañeros quienes con su orientación, conocimientos compartidos y paciencia han hecho de sus enseñanzas pilares fundamentales para nuestro crecimiento profesional.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

A los docentes, por su invaluable guía, conocimientos impartidos y orientación experta a lo largo de esta investigación. Su dedicación y disposición para compartir su experiencia fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional, comprensión y amor durante este exigente proceso. Sus palabras de aliento y paciencia fueron un pilar fundamental en el camino hacia la culminación de este trabajo.

A nuestros amigos y compañeros de carrera, quienes estuvieron junto a nosotros ofreciendo su ayuda, motivación y compañía en los momentos desafiantes.

A la Universidad La Gran Colombia, por brindar los recursos y facilidades necesarios para llevar a cabo esta investigación y desarrollo de este equipo.

Tabla de contenido

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
JUSTIFICACIÓN	13
OBJETIVOS	14
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
MARCO TEÓRICO	15
METODOLOGÍA	17
CAPÍTULO I: MODELO FISICO DEL EQUIPO	19
CAPITULO II: MONTAJE DEL EQUIPO	23
MATERIALES UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DEL EQUIPO:	23
ENSAMBLAJE DEL EQUIPO	26
CAPITULO III: ENSAYOS Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO	28
PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	28
MONTAJE DE LA MUESTRA.....	29
<i>Gravas</i>	29
<i>Arenas</i>	31
<i>Toma de datos</i>	32
CÁLCULOS:	34
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
LISTA DE REFERENCIA O BIBLIOGRAFÍA	39

ANEXOS..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Lista de Figura

<i>Ilustración 1 Modelo físico del equipo</i> _____	19
<i>Ilustración 2 Diámetro mínimo para las cámaras de permeabilidad.</i> _____	21
<i>Ilustración 3 Boceto del permeámetro. Fuente: Propia.</i> _____	22
<i>Ilustración 4 Base en acrílico. Fuente: propia.</i> _____	23
<i>Ilustración 5 Platos en aluminio Fuente: propia.</i> _____	23
<i>Ilustración 6 Acrílico para las cámaras Fuente: propia.</i> _____	23
<i>Ilustración 7 Mini válvulas Fuente: propia.</i> _____	24
<i>Ilustración 8 Racores con recubrimiento de malla pasa 200 Fuente: propia.</i> _____	24
<i>Ilustración 9 Válvulas Fuente: propia.</i> _____	24
<i>Ilustración 10 Accesorios en acero inoxidable Fuente: propia.</i> _____	25
<i>Ilustración 11 Cámara para agregado grueso Fuente: propia.</i> _____	25
<i>Ilustración 12 Cámara para agregado fino Fuente: propia.</i> _____	25
<i>Ilustración 13 Ensamblaje del equipo. Fuente: propia.</i> _____	27
<i>Ilustración 14 Muestra (gravas). Fuente: Propia.</i> _____	28
<i>Ilustración 15 Muestra agregado fino. Fuente: propia.</i> _____	28
<i>Ilustración 16 Peso unitario del suelo. Fuente: Gromecánica. Capítulo 2.</i> _____	29
<i>Ilustración 17 Montaje agregado grueso. Fuente: propia</i> _____	30
<i>Ilustración 18 Carga hidráulica a la muestra (grava). Fuente: propia.</i> _____	30
<i>Ilustración 19 Montaje agregado fino. Fuente: propia</i> _____	31
<i>Ilustración 20 Cámara 3". Fuente: Propia.</i> _____	31
<i>Ilustración 21 Carga hidráulica a la muestra (arena). Fuente: propia</i> _____	32
<i>Ilustración 22 Toma de datos, gravas. Fuente: propia.</i> _____	32
<i>Ilustración 23 Datos (gravas). Fuente: Propia</i> _____	33

EQUIPO DE PERMEABILIDAD DE DOBLE CABEZA CONSTANTE.	7
<i>Ilustración 24 Toma de datos (arenas). Fuente: Propia.</i> _____	33
<i>Ilustración 25 Datos (arenas). Fuente: Propia</i> _____	34
<i>Ilustración 26 Coeficientes de permeabilidad. Fuente: Gómez, K., & Camelo, D. (2014).</i>	
https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/d1bb8e17-098c-4bfd-ae23-ba4ae17b4fad _____	37

Glosario

Deformación: Cambio de la forma de un material o una estructura por la aplicación de un esfuerzo mecánico.

Expansividad: La expansividad se presenta en las arcillas por la absorción de agua en la superficie de las partículas, ya sea por hidratación de los cationes de cambio o expansión intracristalina, u osmótica por la carga interlaminar de las monomorilonitas sódicas y por presión de los bordes de las esmegtitas magnésicas.

Permeámetro: Dispositivo utilizado en geotecnia para medir la permeabilidad de un suelo.

Permeabilidad: capacidad de un material para permitir el flujo de líquidos a través de él.

Suelo: Es la base sobre la cual se construyen estructuras como edificios, carreteras, puentes, entre otros.

Arenas: Compuesta por partículas más grandes que permiten un drenaje más rápido del agua. Suele tener una mejor capacidad de soporte para estructuras.

Gravas: La grava es un material pétreo utilizado comúnmente en ingeniería civil y construcción. Se trata de fragmentos de rocas de tamaño variable, generalmente mayores a 5 milímetros y menores a 75 milímetros de diámetro.

Cabeza constante: Es un término que se utiliza en hidráulica y se refiere a una condición en sistemas de flujo, particularmente donde la presión o altura del agua se mantiene constante en un punto específico del sistema.

Flujo Agua: Describe el movimiento del agua a través de un medio específico, como tuberías, canales, ríos o cualquier estructura diseñada.

Resumen

El presente trabajo de grado contiene el estudio, diseño y conformación de un permeámetro de cabeza constante, equipo utilizado en el área de geotecnia, para poder determinar la permeabilidad de un suelo a partir de la estandarización y evaluación de ciertos parámetros. El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en la norma de ensayo INV E-130-13 Permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante), indica las condiciones técnicas necesarias para el desarrollo de este ensayo, siempre velando por mantener los más altos estándares de calidad entre ellas con unos parámetros mínimos para el equipo de permeabilidad.

En relación con lo anterior, se parte desde la investigación de los permeámetros, su importancia para la ingeniería civil, a nivel internacional y nacional. El papel que juega dentro de la identificación de las propiedades de los suelos, lo que involucra garantizar los estándares de calidad en los diferentes proyectos de ingeniería que se generan en la sociedad.

La construcción de este importante equipo de permeabilidad, parte de la necesidad existente en la Universidad La Gran Colombia, de investigar y afianzar los conocimientos y las necesidades de la comunidad académica, para esto, se generó un estudio para adquirir los materiales más acordes, funcionales y de fácil acceso en el mercado, para la construcción del mencionado equipo. La selección de los materiales y su construcción, se ejecutó de manera autónoma, siempre buscando respetar los parámetros de la norma y poder brindar un equipo funcional y de fácil manipulación para los usuarios, además de brindar un permeámetro de fácil mantenimiento y larga vida útil.

Abstract

This degree work contains the study, design and formation of a constant head permeameter, equipment used in the area of geotechnics, to determine the permeability of a soil based on the standardization and evaluation of certain parameters. The invias offers the E-130-13 standard that indicates the technical conditions necessary for the development of this test, always ensuring that the highest quality standards are maintained.

It starts from the investigation of permeameters, their importance for civil engineering, at an international and national level. The role it plays in the identification of soil properties, which generates guaranteeing quality standards in the different engineering projects that are generated in society.

The construction of this important permeability equipment, part of the existing need at the Universidad La Gran Colombia, sought to standardize the needs of the academic community, research into the most appropriate, functional and easily accessible materials on the market was generated. for the construction of said equipment. This was carried out autonomously, always seeking to respect the parameters of the standard and to be able to provide functional equipment that is easy to manipulate for all students, in addition to providing a permeameter that is easy to maintain and has a long useful life.

Introducción

La Universidad la Gran Colombia identifica la imperiosa necesidad de contar con un equipo de permeabilidad de cabeza constante más robusto como una herramienta fundamental para enriquecer las capacidades investigativas y académicas de su comunidad estudiantil en el campo de la Ingeniería Civil y Geotécnica. Esta necesidad surge ante la relevancia crítica de comprender y evaluar las propiedades de permeabilidad de suelos granulares y cohesivos, aspecto esencial en el diseño, la construcción y el mantenimiento de obras de infraestructura civiles y ambientales.

El propósito principal de esta investigación radica en el desarrollo técnico de un modelo físico que permita determinar de manera precisa el coeficiente de permeabilidad en suelos bajo condiciones de cabeza constante. Esta búsqueda se sustenta en la carencia actual de herramientas especializadas que brinden mediciones confiables y reproducibles en el contexto específico de este tipo de suelos.

Se plantea, por tanto, no solo la construcción técnica del equipo de permeabilidad, sino también la generación de un protocolo exhaustivo de investigación que abarque desde la comprensión teórica hasta la validación práctica, que busca establecer un sólido fundamento científico y técnico que respalde el diseño y la construcción del equipo, así como su correcto funcionamiento.

Una de las prioridades fundamentales radica en clarificar los principios de funcionamiento y establecer los parámetros de diseño esenciales que deben considerarse en la modelación del equipo de permeabilidad. Para ello, se anticipa la realización de una serie de ensayos y pruebas que permitan la calibración precisa del equipo, evaluando su desempeño y su fiabilidad en relación con los datos teóricos y los estándares establecidos.

Este proyecto no solo busca satisfacer una necesidad institucional inmediata, sino también contribuir al avance en la investigación, comprensión y medición de la permeabilidad en los suelos cohesivos y granulares. Se espera que los resultados obtenidos de esta pasantía, no solo beneficien a la Universidad, sino que también aporten al desarrollo de la ingeniería geotécnica y civil en general,

ofreciendo una herramienta precisa y confiable para investigaciones futuras y aplicaciones prácticas en el ámbito de la geotecnia y la construcción civil.

Planteamiento del problema

La comprensión de la permeabilidad en los suelos es un elemento esencial para el análisis de la hidrología, hidrogeología, en la ingeniería civil y ambiental. En este contexto, la Universidad La Gran Colombia busca ampliar sus capacidades investigativas al integrar un equipo de permeabilidad de cabeza constante y variable en su laboratorio. Este equipo no solo responderá a las necesidades actuales de investigación, sino que también proporcionará un espacio idóneo para la realización de ensayos avanzados en muestras de suelo, tanto alteradas como inalteradas.

La necesidad de contar con este equipo especializado es crucial, ya que la caracterización precisa de la permeabilidad del suelo es fundamental para comprender y predecir el comportamiento del agua en diferentes condiciones geológicogeotécnicas. Además, permitirá estudiar fenómenos como la infiltración, el drenaje y la estabilidad de estructuras en presencia de agua subterránea.

En este contexto, se planteó el interrogante: ¿Cuál es el diseño óptimo para un equipo de permeabilidad de cabeza constante y variable que permita caracterizar de manera eficiente y precisa los suelos, superando los desafíos técnicos inherentes a esta tarea?

Este planteamiento de investigación busca no solo identificar el modelo más eficiente de equipo de permeabilidad, sino también abordar los desafíos técnicos que han limitado la precisión y confiabilidad de los métodos convencionales. Entre estos desafíos se incluyen la estandarización de los procesos de medición, la capacidad de adaptación a diferentes tipos de suelo, la precisión en la variación de la cabeza y la capacidad de obtener resultados confiables en muestras inalteradas.

La solución a esta pregunta de investigación no solo impactará positivamente en las capacidades investigativas de la universidad, sino que también contribuirá al avance en el conocimiento de la

permeabilidad del suelo, permitiendo una mejor comprensión de su comportamiento hidráulico y ofreciendo herramientas precisas para el diseño y la ejecución de proyectos de ingeniería civil, geotécnica y ambiental.

Justificación

En el ámbito de la Ingeniería Civil, la comprensión de las propiedades y comportamientos de los suelos es fundamental, ya que estos constituyen el soporte esencial sobre el cual se erigen las infraestructuras que dan forma a nuestras ciudades y entornos. La complejidad inherente de los suelos y su variabilidad requieren un profundo análisis de sus características fisicoquímicas, mecánicas e hidráulicas para garantizar la estabilidad y durabilidad de las estructuras.

El conocimiento detallado de la permeabilidad de los suelos, en particular, es esencial. Esta propiedad determina la capacidad del suelo para permitir o resistir el flujo de agua a través de él, lo que tiene una influencia directa en numerosos aspectos de la ingeniería civil. Desde el diseño de cimentaciones hasta la gestión y uso del agua, la permeabilidad del suelo juega un papel crítico en la planificación, construcción y mantenimiento de infraestructuras.

La Universidad La Gran Colombia reconoce la importancia de profundizar en el estudio de la permeabilidad de suelos, especialmente en suelos granulares y finos. La necesidad de desarrollar un equipo de permeabilidad de última generación surge como una respuesta directa a la demanda creciente de métodos de investigación avanzados en el campo de la geotecnia. Este equipo no solo permitirá a los estudiantes y académicos realizar ensayos precisos y exhaustivos, sino que también impulsará la capacidad de la universidad para fomentar la investigación y la innovación en ingeniería civil.

La creación de este equipo de permeabilidad de vanguardia no solo representa un avance tecnológico para la universidad, sino que también es un paso significativo hacia la formación de profesionales mejor

preparados y más competitivos en el campo de la ingeniería civil. Este equipo no solo brindará una plataforma para la exploración académica, sino que también servirá como un recurso invaluable para la solución de problemas reales en el diseño y la ejecución de proyectos de construcción.

Así, el desarrollo de un equipo de permeabilidad representa un compromiso con la excelencia académica, la investigación de vanguardia y el avance continuo en el campo de la geotecnia. Esta iniciativa no solo fortalecerá la posición de la Universidad La Gran Colombia en el ámbito académico, sino que también contribuirá al desarrollo sostenible de la ingeniería civil en la región y más allá.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar y elaborar un equipo de permeabilidad de cabeza constante que permita caracterizar de forma eficiente el suelo mediante pruebas de laboratorio en la facultad de ingenierías de la Universidad La Gran Colombia.

Objetivos Específicos

- Crear un sistema que permita evaluar la permeabilidad en diferentes tipos de suelos validando con otros métodos existentes y dando cumplimiento a la normativa colombiana.

- Establecer los parámetros de diseño que se deben tomar en cuenta en la modelación del equipo de permeabilidad, para este mismo se considera generar varios ensayos que permitan la calibración del equipo, para poder evaluar la confiabilidad de este frente a los datos teóricos.

- Diseñar un sistema controlado de ingreso de agua, que permita un control completo del equipo y no demande tener controles externos al equipo para el funcionamiento de este.

Marco Teórico

- Permeabilidad de los suelos:

Según Rojas y Mora (2014), la permeabilidad se refiere a la capacidad de un suelo para permitir o restringir el paso del agua a través de sus espacios vacíos. Esta característica permite la clasificación de los suelos en dos categorías: suelos permeables y suelos impermeables, y está determinada por factores como el tamaño de las partículas, la disposición de los poros y la estructura del suelo.

Algunos de los principales factores que influyen son los espacios vacíos en el suelo y el tamaño de las partículas que están directamente relacionados con la naturaleza de este, es decir, a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se incrementa la cantidad de espacios vacíos. De igual forma, Rojas y Mora (2014) afirman que la estructura y estratificación del suelo pueden resultar en diferentes niveles de permeabilidad en su estado natural y cuando ha sido modificado, incluso si la relación de espacios vacíos es la misma en ambos casos.

Según Rojas y Mora (2014), otro factor influyente en la permeabilidad del suelo es la densidad relativa (compacidad del suelo), que es una propiedad principalmente en materiales granulares como gravas y arenas, es decir, en suelos que están compuestos casi exclusivamente por partículas mayores a 0.074 mm (malla #200). Por otro lado, el peso específico es una característica común en suelos donde los minerales de fracciones más finas y coloidales tienden a tener un peso específico mayor que los minerales de la fracción más gruesa. Cuanto mayor sea el peso específico, menor será la permeabilidad del suelo.

- Métodos para medir la saturación en los suelos:

Según Juárez y Rico (2005), la correcta determinación del coeficiente de permeabilidad de un suelo es de suma importancia en la toma de decisiones para resolver ciertos problemas en el campo de la Mecánica de Suelos y es esencial en el proceso de cálculo en muchos casos. Existen diversos procedimientos para evaluar la permeabilidad de los suelos, algunos se consideran "directos" porque se

enfocan en medir con equipos de manera directa este coeficiente, mientras que la medición "indirecta" proporciona esta información de manera secundaria mediante pruebas y técnicas destinadas a otros propósitos. Entre los métodos "directos" se incluyen el uso del Permeámetro de carga constante y el Permeámetro de carga variable.

- **Permeámetro de carga constante:**

Según Juárez y Rico (2005), proporciona el enfoque más básico para calcular el coeficiente de permeabilidad de un suelo. Se toma una muestra de suelo con un área transversal A y longitud L , que se coloca en un tubo y se somete a una carga de agua h . El agua fluye a través de la muestra y se mide la cantidad que pasa en un período de tiempo t . Al aplicar la ley de Darcy, se obtiene la relación $V = kAit$, donde V representa la cantidad de agua mencionada.

-**Permeámetro de carga variable:**

En este dispositivo de permeámetro se cuantifica la cantidad de agua que atraviesa una muestra de suelo mediante la diferencia de niveles en un tubo de alimentación. En el diseño de este se presentan dos dispositivos característicos: el primero (a) se emplea en suelos principalmente compuestos por partículas finas, mientras que el segundo (b) resulta adecuado para materiales más gruesos (Juárez y Rico, 2005).

- **Carga constante:**

Este método es especialmente adecuado para suelos granulares y consiste en medir la cantidad de agua que fluye a través de una muestra de suelo saturada que se coloca en un dispositivo conocido como permeámetro. El volumen de agua se registra manteniendo el nivel de agua constante en un tubo de suministro conectado al dispositivo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas pruebas se realizan en muestras alteradas, lo que puede dificultar la extrapolación de los resultados a suelos en su estado natural (Díaz, Cely & Perdomo, 2019).

-**Grado de saturación:**

El nivel de saturación (la cantidad de agua que llena los espacios porosos) de las partículas ejerce un impacto significativo en la conductividad hidráulica, ya que a medida que aumenta el nivel de saturación, también aumenta la conductividad hidráulica. (Cordero y Grillo, 1974)

Metodología

Esta investigación tiene un alcance exploratorio, ya que, debido al enfoque de esta, según Hernández Roberto, (2014), en su libro, la metodología de la investigación requiere recopilar información para procesarla y así analizar la situación de estudio. Adicionalmente, tiene un alcance descriptivo, puesto que se busca detallar el fenómeno presentado a partir de sus causas y efectos en el equipo de permeabilidad. Para el desarrollo de los objetivos propuestos se seguirán los procedimientos en mención.

Se pretende crear un sistema que permita evaluar la permeabilidad de cabeza constante para caracterizar el suelo, con lo que se establecen los parámetros de diseño que debe tener el equipo de cabeza constante. Se establecen los parámetros técnicos para cada una de las cabezas, debido a que se demanda una de finos y una de granulares.

En primera instancia se realiza una revisión exploratoria y descriptiva, esta etapa se centra en una revisión exhaustiva de literatura, documentos técnicos y normativas relevantes en el campo de la permeabilidad de suelos y diseño de equipos de laboratorio. Se busca comprender a fondo los principios teóricos y prácticos relacionados con la permeabilidad, así como identificar los requisitos y estándares necesarios para la creación del equipo de permeabilidad de cabeza constante.

Basado en los conocimientos adquiridos en la revisión exploratoria, se procede a elaborar un diseño conceptual del permeámetro. Esto incluye la identificación de los componentes necesarios, tales como las cabezas de ensayo para suelos finos y granulares, los sistemas de control de flujo de agua,

dispositivos de medición y cualquier componente específico para la correcta evaluación de la permeabilidad.

Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de selección meticuloso de los materiales a utilizar en la construcción del equipo. Se evalúan las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales para asegurar su idoneidad y compatibilidad con las demandas del ensayo de permeabilidad. Además, se considera la disponibilidad de los materiales en el mercado y su viabilidad económica.

Seguido se inicia con el ensamblaje, lo cual implica la construcción física del equipo según el diseño conceptual previamente elaborado. Se lleva a cabo el ensamblaje de los componentes, siguiendo especificaciones técnicas precisas y aplicando técnicas de ingeniería adecuadas para garantizar la integridad estructural y funcionalidad del permeámetro.

Una vez construido, se realizan pruebas preliminares para evaluar el funcionamiento y la precisión del permeámetro. Se lleva a cabo la calibración del equipo, ajustando los parámetros según estándares establecidos y verificando la coherencia de los resultados obtenidos con los valores teóricos y normativos.

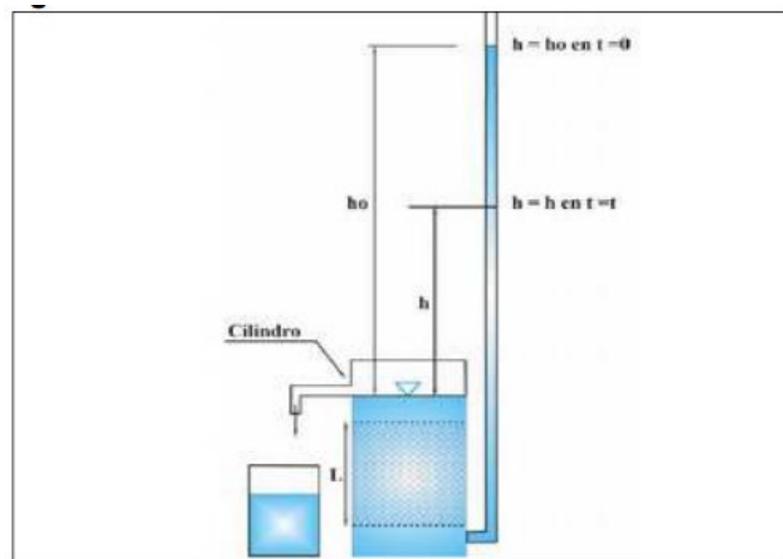
Finalmente, después de identificar y establecer el flujo de trabajo para el equipo de permeabilidad, se pretende establecer y consolidar la guía de uso del equipo de permeabilidad con cabeza constante doble, además consolidar un dossier con todas las especificaciones de desarrollo, del equipo de permeabilidad.

Este equipo será instalado y evaluado en las instalaciones de la facultad de ingenierías de la Universidad La Gran Colombia.

CAPÍTULO I: MODELO FÍSICO DEL EQUIPO

El permeámetro de carga constante Según Juárez y Rico (2005), proporciona una manera sencilla de calcular la permeabilidad de un tipo específico de suelo. Consiste en confinar una muestra de suelo en un tubo con carga hidráulica h , permitiendo que el agua fluya a través de ella. Se mide la cantidad de agua (en cm^3) que atraviesa la muestra en un tiempo t , utilizando la ley de Darcy: $V = kAit$, donde V representa la cantidad de agua mencionada.

Ilustración 1 Modelo físico del equipo



Fuente: Alfaro Rojas, D. C., & Mora Sanabria, F. A. (2014). Modelo Físico para la medición de la permeabilidad en suelos cohesivos (cabeza variable). ACA. Pregrado Civil. P. 25. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10983/1684>.

Siguiendo el modelo físico planteado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) E-130, se establece el diseño preliminar para el equipo que se instalará en la facultad de ingenierías de la Universidad La Gran Colombia en la sede de Bogotá.

De acuerdo con la noma para la elaboración del permeámetro de cabeza constante se implementarán: dos cilindros de permeabilidad (para agregado grueso y fino), caja en acrílico

transparente, platos en aluminio, tubos en acrílico, racores de sello rápido, accesorios en acero inoxidable, manguera para el flujo del agua en polipropileno, una cuadrícula en vinilo, mini válvulas y válvulas.

- La base del dispositivo cumple una doble función: soportar el peso de todas sus partes y garantizar la estabilidad general, lo que asegura una distribución óptima de los componentes y comodidad para el usuario que lo manipula. Fabricada con acrílico transparente de 10 mm de grosor, presenta dimensiones de 50 cm x 50 cm con una altura de 12 cm.

- El tablero sirve como soporte para los tubos de vidrio utilizados como manómetros durante el ensayo, además de servir como soporte para la cuadrícula numerada empleada para medir las alturas del agua. Se optó por un tablero en acrílico. Finalmente, se aseguró al acrílico base mediante un soporte de acero y tornillos.

- Las cámaras tienen la función principal de contener el material granular bajo estudio. En estas se encuentran las válvulas de entrada que permiten que el agua atraviese la muestra, además de las válvulas de salida para el agua que ha pasado a través de ella. El tubo que actúa como contenedor del suelo y conecta con los manómetros es un componente clave del modelo y suele tener una forma cilíndrica en los equipos de cabeza constante.

Cada uno de estos tubos cuenta con tapas de aluminio en sus extremos, equipadas con válvulas para regular el flujo de entrada y salida del agua. Además, cada tubo incluye 6 válvulas adicionales para conectar el suelo con los manómetros del tablero mediante mangueras transparentes.

- La piedra porosa tiene la finalidad de uniformar la distribución del agua que ingresa a la muestra, evitando así la tubificación del suelo. Al igual que en los tubos contenedores, la sección de esta piedra es de forma circular. Es importante destacar que la norma INV E-130-13 (INVIAS, 2013) autoriza el uso tanto de piedras porosas como de mallas reforzadas.

Teniendo en cuenta las condiciones del laboratorio y los espacios determinados para la instalación del equipo, se hacen las respectivas mediciones para el modelo, determinando una altura para la cuadrícula de vinilo de 130 cm, probetas de 6" y 3" fueron fabricadas en acrílico para facilitar la visualización de la disposición de las muestras de suelo y el flujo del agua a través de ellas como se evidencia en la figura 2.

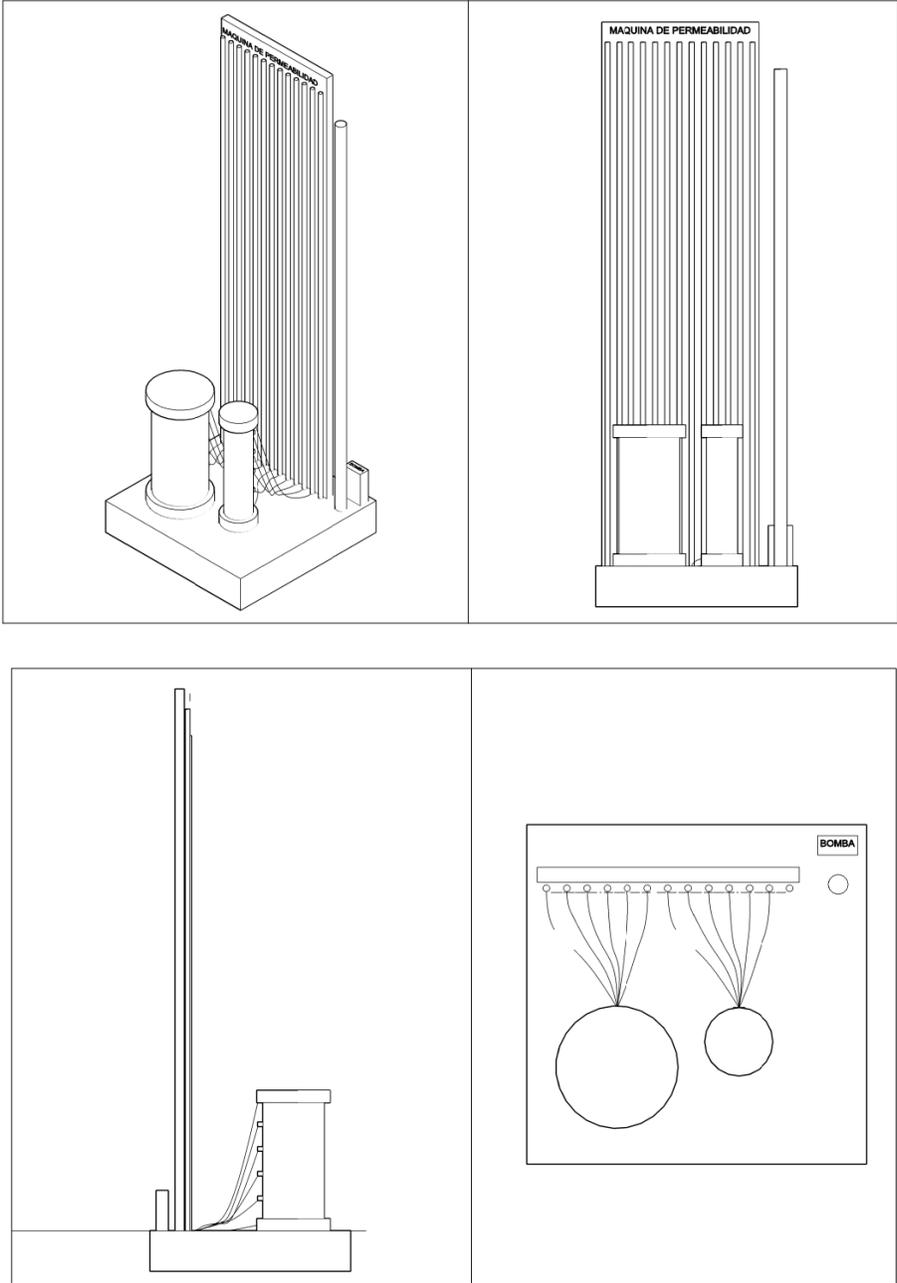
Ilustración 2 Diámetro mínimo para las cámaras de permeabilidad.

EL TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA SE ENCUENTRA ENTRE LOS TAMICES DE ABERTURAS	DIÁMETRO MÍNIMO DEL CILINDRO			
	MENOS DE 35 % RETENIDO EN EL TAMIZ:		MÁS DE 35 % RETENIDO EN EL TAMIZ:	
	2.00 mm (No. 10)	9.5 mm (3/8")	2.00 mm (No. 10)	9.5 mm (3/8")
2.00 mm (No. 10) y 9.5 mm (3/8")	76 mm (3")	-	114 mm (4.5 mm)	-
9.5 mm (3/8") y 19.0 mm (¾")	-	152 mm (6")	-	229 mm (9")

Fuente: INV E – 130 – 13. (2013). Obtenido de <https://www.da-lab.co/wpcontent/uploads/2021/04/INV-130-13.pdf>

El equipo estará conformado por dos cámaras que tendrán una altura de 38 cm, diámetro de 3" para agregado fino y 6" para gravas, estas contarán con 6 salidas las cuales se conectarán a los tubos piezométricos que estarán ubicados en la cuadrícula de vinilo. Adicionalmente, el equipo debe circular constantemente el agua en la muestra hasta que se establezcan los niveles piezométricos, por ende, se adapta una bomba para optimización del agua y reducción de pérdidas en el sistema. A continuación, se realiza un boceto del equipo (figura 3).

Ilustración 3 Boceto del permeámetro. Fuente: Propia.



CAPITULO II: MONTAJE DEL EQUIPO**Materiales utilizados en la elaboración del equipo:**

- Caja en acrílico transparente de 10 mm de espesor y sección 50 cm x 50 cm x 12 cm de alto

Ilustración 4 Base en acrílico. Fuente: propia.



- Platos en aluminio (Usados para la base y tapas de las probetas)

Ilustración 5 Platos en aluminio Fuente: propia.



- Dos tubos en acrílico transparente de espesor 4 mm.
 - 6" de diámetro x 35 cm de alto
 - 3" de diámetro y 35 cm de alto

Ilustración 6 Acrílico para las cámaras Fuente: propia.



- Mini válvulas de $\frac{1}{4}$ "para el control de flujo de agua

Ilustración 7 Mini válvulas Fuente: propia.



- Racores de sello rápido de $\frac{1}{4}$ de rosca x $\frac{3}{8}$ para la manguera de los piezómetros

Ilustración 8 Racores con recubrimiento de malla pasa 200 Fuente: propia.



- Válvulas de $\frac{1}{4}$ con control de flujo para el sistema de purga

Ilustración 9 Válvulas Fuente: propia.



- Accesorios en acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ para la conexión de válvulas

Ilustración 10 Accesorios en acero inoxidable Fuente: propia.



- Se hace el ensamblaje de las cámaras
 - Diámetro 6"

Ilustración 11 Cámara para agregado grueso Fuente: propia.



- Diámetro 3"

Ilustración 12 Cámara para agregado fino Fuente: propia.



Ensamblaje del equipo

ENSAMBLE PERMEÁMETRO





Ilustración 13 Ensamblaje del equipo. Fuente: propia.



CAPITULO III: ENSAYOS Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

Preparación de la muestra

Los ensayos se realizaron siguiendo la normativa INVIAS 130, donde se selecciona el material fino y grueso por medio de granulometría.

Para clasificar las gravas se toma el material que pasa por el tamiz $\frac{3}{4}$ " y queda retenido en el tamiz No 4, el cual es lavado y secado en el horno.

Ilustración 14 Muestra (gravas). Fuente: Propia.



De igual forma se hace la clasificación del material fino, teniendo una selección de arenas (fina, media y gruesa), tomando lo retenido en los tamices No 16, 50 y 200 respectivamente.

Ilustración 15 Muestra agregado fino. Fuente: propia.



La cantidad de material que se necesita para cada una de las cámaras se determina teniendo en cuenta los volúmenes de cada una.

Camara de material grueso

$$V = \pi * r^2 * H \rightarrow \pi * (3 * 2.54 \text{ cm})^2 * 38 \text{ cm} = 6931.76 \text{ cm}^3$$

Camara de material fino

$$V = \pi * r^2 * H \rightarrow \pi * (1.5 * 2.54 \text{ cm})^2 * 38 \text{ cm} = 1732.94 \text{ cm}^3$$

Ilustración 16 Peso unitario del suelo. Fuente: Gromecánica. Capítulo 2.

Descripción	η %	γ_d g/cm³
Arena limpia y uniforme	29 – 50	1,33 – 1,89
Arena limosa	23 – 47	1,39 – 2,03
Arena micácea	29 – 55	1,22 – 1,92
Limo INORGÁNICO	29 – 52	1,28 – 1,89
Arena limosa y grava	12 – 46	1,42 – 2,34
Arena fina a gruesa	17 – 49	1,36 – 2,21

La cantidad de material fino usado en la cámara se determina a partir del λ , teniendo en cuenta que las arenas fueron lavadas se implementa un valor de 1.6 g/cm³ y se toma un valor de 12.67.

$$\gamma_d = \frac{W_S}{V_T} \quad W_S = 1.6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (1.5 * 2.54 \text{ cm})^2 * 12.67 \text{ cm} = 924.5 \text{ gr}$$

Gravas

El material debe ser introducido con precaución a la cámara para evitar daños en el acrílico, principalmente se debe poner la piedra porosa y el caucho sobre el cual será puesta la muestra. Este material se pondrá suelto lo que genera que la relación de vacíos sea mayor.

Ilustración 17 Montaje agregado grueso. Fuente: propia



Se lleva el material a una altura de aproximadamente 3 cm del borde, se coloca el caucho, la piedra porosa, luego el resorte, la otra tapa y se sella con las perillas asegurando que no haya fugas.

Posteriormente la muestra se sumerge a una carga hidráulica hasta saturar por completo el material.

Ilustración 18 Carga hidráulica a la muestra (grava). Fuente: propia.



Arenas

Se realiza el montaje del material granular en el cilindro, esta se debe compactar en tres capas siguiendo lo especificado en la INVIAS 130-13.

Ilustración 19 Montaje agregado fino. Fuente: propia



Una vez se compactaron las 3 capas del material granular y se han puesto las piedras porosas, el caucho y el resorte que no permite un cambio en la compactación del material, se somete la muestra a una carga hidráulica.

Ilustración 20 Cámara 3". Fuente: Propia.



Se carga la base con agua manteniendo la bomba sumergida, para obtener una mejor visión en los picnómetros se agrega un colorante de comidas azul.

Ilustración 21 Carga hidráulica a la muestra (arena). Fuente: propia



El material es sometido a una carga hidráulica hasta que esta sumergida por completo y se estabilice los niveles en el tablero.

Toma de datos

Cuando las muestras estén inundadas en su totalidad se cierran las llaves y se espera a que el nivel de agua se establezca en los piezómetros, posteriormente se abre la válvula y se toma el volumen de agua en un determinado tiempo con ayuda de la probeta y se toman las alturas sin cerrar las válvulas.



Ilustración 23 Datos (gravas). Fuente: Propia

Ensayo de permeabilidad: Gravas					
Integrantes	Valentina González López			Fecha:	7/12/2023
	Laura Valentina Palacios Toquica			Muestra:	Gravas
	Cristian Edisson Rodríguez Leandro				
Laboratorio N°1					
Datos de la muestra			Dimensiones de la cámara		
Peso			Altura Cámara	38	cm
Total	6594	g	L (distancia manómetros)	5	cm
Volumen de agua		Tiempo (s)	Diámetro	15,24	cm
300	ml	28,64	Área	182,41	cm ²
Picnómetro			Volúmen	6931,76	cm ³
1	42,8				
2	42,8				
3	42,8				
4	42,8				
5	42,6				
6	42,6				

Ilustración 24 Toma de datos (arenas). Fuente: Propia.



Picnómetro	
1	82
2	80
3	50
4	49,2
5	49,8
6	49,8

Ilustración 25 Datos (arenas). Fuente: Propia

Ensayo de permeabilidad: Suelos Arenosos						
Integrantes	Valentina González López		Fecha:	7/12/2023		
	Laura Valentina Palacios Toquica		Muestra:	Arenas		
	Cristian Edisson Rodríguez Leandro			Finas, Medias y gruesas		
Laboratorio N°2						
Datos de la muestra			Dimensiones de la cámara			
Peso			Altura Cámara	38	cm	
Finas (gr)	924,5	g	L (distancia manómetros)	5	cm	
Media (gr)	924,5	g	Diámetro	7,62	cm	
Gruesa (gr)	924,5	g	Área	45,60	cm ²	
Total	2773,5	g	Volúmen	1732,94	cm ³	
			Capas	3		
			Volumen de agua		Tiempo	
			220	ml	30,57	s

Cálculos:

Determinación de caudal: Grava.

$$Q = \frac{V}{t} \rightarrow \frac{300 \text{ cm}^3}{28.64 \text{ s}} = 10.47 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Determinación de caudal: Arena.

$$Q = \frac{V}{t} \rightarrow \frac{220 \text{ cm}^3}{30.57 \text{ s}} = 7.2 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Coefficiente de permeabilidad:

$$k = \frac{Q * L}{A * t * h} = \frac{\left(7.2 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} * 5 \text{ cm}\right)}{45.60 \text{ cm}^2 * 30.57 \text{ s} * 7.67 \text{ cm}} = 3.36 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

Análisis y Discusión de Resultados

El análisis de resultados de este equipo de permeabilidad implicó evaluar la velocidad o la tasa de flujo de agua a través de un material poroso, para este caso, gravas y arenas.

A partir de utilización de la ecuación de Darcy se obtuvo el coeficiente de permeabilidad, con lo cual se estandarizó que las gravas presentaron un coeficiente de $2.84 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ y en concordancia con la tabla de coeficientes de permeabilidad se encontró que es un material moderadamente permeable, en contraste con las arenas que presentaron un coeficiente de $3.36 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ con lo que se determinó es un material poco permeable.

Durante el laboratorio se observó visualmente el comportamiento permeable de cada uno de los suelos, el tiempo demandado por cada uno para alcanzar el nivel de la cabeza de agua, marco significativamente la tipología de permeabilidad presente en cada uno. El comportamiento también se enmarcó potencialmente con respecto a la relación de vacíos, la cual se evidenció fuertemente en las gravas donde a simple vista se palpaba dicha relación en un porcentaje mayor al evidenciado en las arenas.

Las gravas tienden a ser más permeables que las arenas. La permeabilidad se refiere a la capacidad de un material para permitir que los fluidos pasen a través de él. Esta propiedad está influenciada por el tamaño de las partículas y la forma en que están dispuestas.

Se aclara pero para los dos laboratorios, se utilizó el mismo fluido con las mismas propiedades, con lo que este parámetro se igualó para ambos casos, el ir compactando cada uno de los suelos también se convierte en una variable importante dentro de este ejercicio, a la arena se le generó una mayor compactación, debido a su condición de ajustarse entre sus partículas, reduciendo la relación de vacíos, por el contrario las gravas, aunque se compactaron este índice de vacíos si tuvo un porcentaje mayor.

Si suponemos que el área A , la diferencia de altura hidráulica Δh y la longitud L son constantes para ambos materiales en el experimento, podemos comparar la tasa de flujo para cada uno, dado que Q es

inversamente proporcional a la viscosidad del fluido se aclaró que se utilizó el mismo fluido para ambos casos, se asume que μ es constante y no influye en la comparación entre gravas y arenas.

Entonces, la diferencia en las tasas de flujo Q entre gravas y arenas se puede atribuir principalmente a la diferencia en los coeficientes de permeabilidad.

Al comparar los valores de k , se observó que las gravas tienen un coeficiente de permeabilidad mucho mayor que las arenas. Esta diferencia en los coeficientes de permeabilidad explica por qué las gravas son más permeables que las arenas, lo que coincide con las observaciones realizadas durante el experimento.

Además, la observación de la relación de vacíos y la compactación también se correlaciona con los resultados de permeabilidad. Las gravas, a pesar de una cierta compactación, mantienen una relación de vacíos mayor en comparación con las arenas, lo que coincide con su mayor permeabilidad.

En resumen, la ecuación de Darcy respalda y cuantifica la diferencia en la permeabilidad entre las gravas y las arenas, mostrando que las gravas permiten un flujo de fluido mucho mayor debido a su mayor coeficiente de permeabilidad. Esta información es crucial para comprender cómo diferentes características del suelo afectan su capacidad para permitir el paso de fluidos.

Los valores teóricos esperados se asemejan en un 99% a los encontrados dentro del laboratorio, esto debido a las inspecciones visuales, conocimientos previos y evidencias del comportamiento del fluido a la hora de circular por cada uno de los suelos.

A partir de esto se determinó que la compactación garantiza una distribución uniforme de partículas en el suelo. Si el suelo no está compactado adecuadamente, puede tener una mayor relación de vacíos que podrían afectar la precisión de los resultados de permeabilidad. La compactación asegura que la muestra de suelo utilizada en el permeámetro sea representativa del suelo en su estado natural. Si la muestra no está compactada correctamente, los resultados de permeabilidad pueden no reflejar con precisión cómo se comportaría el suelo en el entorno real.

*Ilustración 26 Coeficientes de permeabilidad. Fuente: Gómez, K., & Camelo, D. (2014).
<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/d1bb8e17-098c-4bfd-ae23-ba4ae17b4fad>*

PERMEABILIDAD RELATIVA	VALORES DE K (cm/s)	SUELOS TIPICOS
Muy permeable	Mayor que $1 * 10^{-1}$	Grava Gruesa
Moderadamente permeable	$1 * 10^{-1}$ a $1 * 10^{-3}$	Arena, Arena fina
Poco permeable	$1 * 10^{-3}$ a $1 * 10^{-5}$	Arena limosa, Arena
Muy poco permeable	$1 * 10^{-5}$ a $1 * 10^{-7}$	Limo, Arenisca fina
Impermeable	Menor que $1 * 10^{-7}$	Arcilla

Conclusiones y Recomendaciones

Tras la implementación de la metodología propuesta, se logró desarrollar un permeámetro de cabeza constante que cumple con los criterios de diseño y funcionalidad previamente establecidos. Las pruebas y la calibración realizadas demostraron la precisión y fiabilidad del equipo en la medición de la permeabilidad de suelos finos y granulares, con resultados consistentes y reproducibles.

El permeámetro se ajusta a los estándares establecidos por las normativas vigentes, particularmente la normativa INVIAS E 130, asegurando su compatibilidad y utilidad en entornos profesionales.

La evaluación práctica en las instalaciones de la facultad de ingenierías demostró el correcto funcionamiento del permeámetro en condiciones reales, confirmando su viabilidad y utilidad.

Recomendaciones:

- Considerar posibles mejoras técnicas en el diseño del equipo para optimizar su eficiencia y precisión, enfocándose en áreas específicas identificadas durante las pruebas. Mantenerse al día con avances tecnológicos y normativas relacionadas con la permeabilidad de suelos para realizar ajustes o actualizaciones periódicas en el equipo.

- Ofrecer capacitación adecuada sobre el uso del permeámetro, tanto para estudiantes como para personal técnico, con el fin de asegurar su correcta operación y mantenimiento. Así como fomentar la investigación continua en el campo de la permeabilidad de suelos para ampliar el conocimiento y mejorar las capacidades del equipo desarrollado.

- Promover la difusión de los resultados y capacidades del permeámetro a través de colaboraciones académicas y profesionales, impulsando su uso en estudios e investigaciones relevantes.

Lista de Referencia o Bibliografía

Alberto Cordero, J., & Grillo Franco, M. (1974). Construcción de un permeámetro de cabeza constante para la determinación de la conductividad hidráulica en muestras sin disturbar. Acta Agronómica Volumen 24, Número 1-4., 40-64. Obtenido de

https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/48447

Alfaro Rojas, D. C., & Mora Sanabria, F. A. (2014). Modelo Físico para la medición de la permeabilidad en suelos cohesivos (cabeza variable). ACA. Pregrado Civil. Obtenido de

<http://hdl.handle.net/10983/1684>

Díaz, J., Cely, L., & Perdomo, S. (2019). ELABORACIÓN DE UN PROTOTIPO DE PERMEÁMETRO DE CABEZA CONSTANTE PARA LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD COOPERATIVA CAMPUS VILLAVICENCIO.

Dulcey, E., Bulla, L., & Molina, F. (octubre de 2016). ResearchGate. Obtenido de

<file:///C:/Users/david/Downloads/Articulo93XVCCG-IICIERB.pdf>

Escobar, G., & Escobar, C. (2016). GEOMECÁNICA. Obtenido de

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/relacionesgravimetricasyvolumetricasdelsuelo.pdf>

Gómez, K., & Camelo, D. (2014). ESTUDIO DE LA PERMEABILIDAD EN SUELOS ARENOSOS CONTAMINADOS CON AGUAS ACEITOSAS EN UNA ESTRATIFICACIÓN DE MEDIANTE UN MODELO FÍSICO A ESCALA REDUCIDA. Obtenido de: <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/d1bb8e17-098c-4bfd-ae23-ba4ae17b4fad>

JUÁREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelo, México: Limusa, 2005. p.198.

INVIAS. (2013). INV-213 13. Obtenido de <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-213-13.pdf>

INVE – 130 – 13. (2013). Obtenido de <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-130-13.pdf>

PERMEABILIDAD DEL SUELO. (s.f.). Obtenido de

https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm