

**MODELO FÍSICO PARA LA MEDICIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN
SUELOS COHESIVOS (CABEZA VARIABLE)**

**DARÍO CARLOS ALBERTO ALFARO ROJAS
FREDY ANTONIO MORA SANABRIA**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
ALTERNATIVA TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ
2014**

**MODELO FÍSICO PARA LA MEDICIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN
SUELOS COHESIVOS (CABEZA VARIABLE)**

**DARÍO CARLOS ALBERTO ALFARO ROJAS
FREDY ANTONIO MORA SANABRIA**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de
Ingeniera Civil**

**Director
Juan Carlos Ruge
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ
2014**



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (cc BY-NC-ND 2.5 CO)

Este es un resumen legible por humanos (y no un sustituto) de la [licencia](#).

[Advertencia](#)

Usted es libre para:



Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

El licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con fines comerciales .



Sin Derivar — Si usted mezcla, transforma o crea nuevo material a partir de esta obra, usted no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — Usted no puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Aviso:

Usted no tiene que cumplir con la licencia para los materiales en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se entregan garantías. La licencia podría no entregarle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como relativos a publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

Nota de Aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, 18, noviembre, 2014

Con especial cariño para nuestras familias,
por el apoyo moral, académico en los
momentos de aprendizaje de nuestra
formación tanto profesional como personal.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a Dios por brindarnos la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos en nuestra formación académica y personal.

Queremos agradecer especialmente a nuestras madres por su infinita confianza y apoyo. A nuestros amigos y compañeros por todas las experiencias que compartimos en estos últimos 5 años en nuestro proceso de formación durante el transcurso de esta etapa académica.

A la Universidad Católica de Colombia, cuerpo administrativo y docente, por brindarnos los conocimientos necesarios para nuestro desarrollo intelectual, moral y ético para el desarrollo fundamental en la formación académica de nuestra carrera y proporcionarnos docentes de gran calidad humana y pedagógica para formarnos como los futuros profesionales íntegros, esperamos que este proyecto ofrezca un gran apoyo a los próximos estudiantes ya que será un pequeño gesto de agradecimiento ante la Universidad.

Al ingeniero Juan Carlos Ruge, como director y amigo por su interés y ayuda para que el proyecto saliera adelante, al Técnico Eduardo Dulcey, por su invaluable ayuda con la investigación y asesoría.

A todos los amigos que nos han apoyado y ayudado.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. GENERALIDADES	14
1.1 ANTECEDENTES	14
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2.1 Descripción del Problema	14
1.2.2 Formulación del Problema	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo General	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.4 JUSTIFICACIÓN	15
1.5 DELIMITACIÓN	15
1.5.1 Espacio	15
1.5.2 Tiempo	15
1.5.3 Contenido	16
1.5.4 Alcance	16
1.6 MARCO REFERENCIAL	16
1.6.1 Orígenes de los Estudios de Permeabilidad	16
1.6.2 Importancia de los Suelos en la Ingeniería Civil	16
1.6.2.1 Flujo de Agua en los Suelos	16
1.6.2.2 Cohesión y Adhesión	16
1.6.2.3 Permeabilidad en los Suelos	17
1.6.3 Métodos para Medir el Coeficiente de Permeabilidad del Suelo	19
1.6.4 Coeficiente de Permeabilidad	19
1.6.5 Prueba de Carga Variable	20
1.6.6 Equipo de Permeabilidad	21
1.6.6.1 Equipo de Permeabilidad de Pared Rígida	21
1.6.7 Ensayos de Laboratorio	21
1.6.7.1 Determinación de k en el Laboratorio	21
1.6.7.2 Confiabilidad de la Muestra	21
1.6.7.3 Confiabilidad de las Mediciones de Laboratorio	21
1.6.7.4 Reproducción de las Condiciones de Campo	22
1.6.8 Errores Probables.	22
1.7 METODOLOGÍA	23
1.7.1 Tipo de Estudio	23
2. MODELO FÍSICO PARA LA MEDICIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN SUELOS COHESIVOS (CABEZA VARIABLE)	25
2.1 CONSIDERACIONES GENERALES	26
2.2 SELECCIÓN DE MATERIAL	26
2.3 PREPARACIÓN DEL MATERIAL	26

	pág.
2.4 COLOCACIÓN	27
2.5 PROTECCIÓN	27
2.6 EVALUACIÓN DE LA NECESIDAD DE IMPERMEABILIZACIÓN	27
2.7 ESTUDIO TEÓRICO DE LAS INFILTRACIONES	27
2.7.1 Mecanismos de Infiltración	27
2.8 ESTUDIOS GEOTÉCNICOS	28
2.8.1 Exploración y Pruebas de Campo	28
2.8.2 Ensayos de Laboratorio	28
2.9 MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DEL SUELO	28
2.10 FLUJO DE AGUA	29
2.11 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	29
2.11.1 Prueba de Carga Variable	29
2.11.2 Confiabilidad de la Muestra	29
2.12 ARMADO DEL EQUIPO	35
2.15.1 Muestra Alterada Compactada en el Laboratorio	49
2.15.2 Muestra Inalterada (in-situ)	50
2.16 REGISTRO FOTOGRÁFICO	53
2.17 CÁLCULOS EN LABORATORIO	54
2.18 MUESTRA INALTERADA EN SITU	55
2.18.1 Descripción.	55
3. MANTENIMIENTO DEL EQUIPO	58
4. CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Intervalo de Valores de k	20
Figura 2. Permeámetro de Carga Variable	23
Figura 3. Permeámetro de Cabeza Variable	25
Figura 4. Tornillos de 1" de Largo x 3/16" con Arandela y Tuerca en Acero Inoxidable. Para Ajuste de la Cuadrícula a la Base del Equipo y el Perfil de Aluminio	30
Figura 5. Accesorios en Bronce (Válvulas y Uniones de ¼") para el Control de la Entrada y la Salida del Agua	30
Figura 6. Accesorios en Acero Inoxidable (Codos y Válvulas de Sello Rápido) para Conexiones de las Mangueras	31
Figura 7. Manguera en Polipropileno, para el Flujo de Agua	31
Figura 8. Angulo de Aluminio para los Bordes de la Cuadrícula	32
Figura 9. Resorte en Acero Inoxidable, para Fijar las Piedras Porosas a la Muestra	32
Figura 10. Tornillos de 1" x 1/8" en Acero Inoxidable, para el Armado de la "Caja" Base del Equipo	33
Figura 11. Niveladores Colocados en la Base del Equipo	33
Figura 12. Niveladores Colocados en la Base del Equipo	34
Figura 13. Acrílicos Transparentes en 10mm de Espeso (Láminas de 40cmx50cm, 155cmx10cm, 50cmx6cm) que Conforman el Equipo	34
Figura 14. Cuadrícula en Vinilo Autoadhesiva	35
Figura 15. Entrada de Agua.	35
Figura 16. Entrada de Agua	36
Figura 17. Entrada de Agua.	36
Figura 18. Ojo de Pollo para Garantizar que la Base del Equipo este Nivelada	37
Figura 19. Piedras Porosas	37
Figura 20. Molde para Compactar las Muestras	38
Figura 21. Molde con el Anillo de Extensión y Anillo Cortador	38
Figura 22. Base con el Ojo de Pollo para Garantizar la Nivelación de la Muestra	39
Figura 23. Base en Aluminio con Aro Sello (oring), con Válvula, Tornillos en Acero Inoxidable	39
Figura 24. Base en Aluminio, con Válvula, Aro Sello, Tornillos y Molde en Acrílico donde se va a Colocar la Muestra para Ensayo.	40
Figura 25. Base Inferior, Válvula, Tornillos, Oring, Molde y Tapa Superior con sus Válvulas de Entrada de Agua y de Purga.	40
Figura 26. Molde más Válvulas y Perilla Tuerca para el Ajuste del Molde con las Tapas y Garantizar que no Quede Fuga de Agua.	41
Figura 27. Falso Fondo en Aluminio	41
Figura 28. Sistema de Codos	42
Figura 29. Soporte Vertical en acero Inoxidable para Sostener el Tablero	42
Figura 30. Válvula de Entrada del Agua	43

	pág.
Figura 31. Equipo Completo	43
Figura 32. Curva Granulométrica	46
Figura 33. Gráfica para Determinar el Limite Líquido	47
Figura 34. Peso Unitario vs. Humedad	49
Figura 35. Gravedad Específica	53
Figura 36. Hidrómetra	53
Figura 37. Curva del Porcentaje que Pasa Vs el Diámetro de las Partículas	56

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Tabla de Permeabilidad	17
Cuadro 2. Datos para Calibrar el Picnómetro para el Ensayo de Gravedad Específica	44
Cuadro 3. Curva de Calibración del Picnómetro	44
Cuadro 4. Tabla de Datos para el Cálculo de la Gravedad Específica	45
Cuadro 5. Datos Iniciales para del Ensayo de Hidrometría	45
Cuadro 6. Datos para Determinar el Peso Seco del Ensayo de Hidrometría	45
Cuadro 7. Datos para el Cálculo de Hidrometría	46
Cuadro 8. Parámetros para el Cálculo del Ensayo de Hidrometría	46
Cuadro 9. Datos para Determinar el Limite Líquido y el Limite Plástico	47
Cuadro 10. Datos de Limite Líquido e Índice de Plasticidad para la Clasificación del Suelo	47
Cuadro 11. Datos Iniciales del Molde, que va a ser Utilizado en el Ensayo de Proctor Estándar	48
Cuadro 12. Pesos Ensayo de Proctor Vs. la Humedad Óptima.	48
Cuadro 13. Pesos Húmedos y Secos	48
Cuadro 14. Permeabilidad	54
Cuadro 15. Datos Iniciales	54
Cuadro 16. Muestras	54
Cuadro 17. Datos Iniciales para el Ensayo de Granulometría	55
Cuadro 18. Cálculo del Material Lavado Sobre el Tamiz # 200 y Seco al Horno	55
Cuadro 19. Datos Obtenidos para el Cálculo del Contenido de Humedad del Material de Ensayo	56
Cuadro 20. Datos para el Cálculo del Peso Unitario de una Muestra Irregular	56

GLOSARIO

COHESIÓN: “es la atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de una sustancia. La cohesión es diferente de la adhesión; la cohesión es la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo, mientras que la adhesión es la interacción entre las superficies de distintos cuerpos”¹.

PERMEABILIDAD EN CABEZA VARIABLE: “en este tipo de permeámetro se mide la cantidad de agua que atraviesa una muestra de suelo, por diferencia de niveles en un tubo alimentador. Este permeámetro puede ser utilizado en suelos finos y gruesos variando el diámetro del tubo alimentador, pero lo más común es utilizarlo con los suelos finos poco permeables”².

PERMEABILIDAD: “es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire y es una de las cualidades más importantes que han de considerarse para la piscicultura. Un estanque construido en suelo impermeable perderá poca agua por filtración”³.

PERMEÁMETRO DE CABEZA VARIABLE: “el permeámetro de cabeza variable es un aparato usado para medir la permeabilidad en suelos relativamente finos, tales como arenas finas y limos o mezclas de estos materiales no plásticos”⁴.

SATURACIÓN: “se refiere al contenido de agua del suelo cuando prácticamente todos los espacios están llenos de agua. En los suelos bien drenados es un estado temporal ya que el exceso de agua drena de los poros grandes por influencia de la gravedad para ser reemplazada por aire”⁵.

¹ ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA. Significado Cohesión [en línea]. Medellín: La Escuela [citado 4 julio, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/cohesiC3%B3n.htm>>

² MONTAÑEZ, Juan Carlos. Significado de Permeabilidad en cabeza variable [en línea]. Bogotá: Academia [citado 25 julio, 2014]. Disponible en Internet: <URL: http://www.academia.edu/4727189/Permeabilidad_cabeza_variable>

³ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Significado Permeabilidad [en línea]. Bogotá: La FAO [citado 7 julio, 2014]. Disponible en Internet: <URL: http://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm>

⁴ UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA. Significado Permeámetros de Cabeza Variable [en línea]. Bogotá: La Universidad [citado 30 julio, 2014]. Disponible en Internet: <URL: http://www.umng.edu.co/documents/63968/74805/art5_1.pdf>

⁵ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Significado Saturación [en línea]. Bogotá: La FAO [citado 14 julio, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s02.htm>>

INTRODUCCIÓN

En la vida profesional actual es imprescindible que los profesionales de ingeniería civil estén facultados para manejar cualquier tipo de adversidades presentadas en la vida laboral, lo cual incluye que sean integrales para mantenerse en un mercado de alta competitividad y no escaseen de conocimientos hechos in situ como en diferentes áreas de la ingeniería, es por eso que desde la etapa de estudiantes se deben formar con estas cualidades y por tanto que la universidad católica de Colombia ha desempeñado un gran papel para que todos los egresados puedan trasladar estas situaciones, por lo cual intensifica los programas de investigación y criterio de los estudiantes para aportar herramientas en los procesos educativos.

La necesidad de obtener más información con lo que respecta el estudio de suelos y los ensayos que existen en la actualidad y contando los pocos aparatos de medición que se encuentran, se percibió la necesidad de trabajar en un equipo que ayude a determinar la permeabilidad de suelos cohesivos para futuros estudiantes de ingeniería civil en la universidad católica de Colombia y así ayudar a obtener mejores resultados en el estudio de los suelos y que son fundamentales para construcción de innumerables proyectos.

Con la anterior problemática se busca presentar la propuesta del diseño y construcción del equipo de permeabilidad en suelos cohesivos (cabeza variable).

Basados en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), pero al no encontrarse una información profunda se busca ahondar un poco más en la investigación de la permeabilidad en suelos cohesivos.

Con la obtención de resultados en estos equipos se busca obtener valores más cercanos al contexto y así poder perfeccionar el diseño en las diferentes áreas de la ingeniería como las estructuras o estructuras hidráulicas.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Debido a que en el laboratorio de universidad no cuenta con un equipo de permeabilidad de cabeza variable, conlleva a que no se estén supliendo las necesidades investigativas que requiere la comunidad estudiantil y a su vez restringe la realización de ensayos a muestras alteradas e inalteradas en el laboratorio.

Esto nos lleva a especular que tan importante e indispensable es la utilización de equipos innovadores para el desarrollo de ensayos en el laboratorio que ayuden a crecer la formación académica profesional de los ingenieros civiles.

Se evidencia la necesidad de implementar un equipo innovador, con el cual se obtengan datos de veras confiabilidad de forma directa, ayudando a propagar la investigación en la universidad especialmente en la rama de la ingeniería civil y especializaciones del mismo; Ya que por lo general son estos los que necesitan generar estudios de las propiedades físicas y del comportamiento que presenta el suelo a fin de avalar resultados confiables y soluciones que concedan al ingeniero más profundización y juicios.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Descripción del Problema. Debido a la falta de equipos en el laboratorio para la elaboración de ensayos, es una buena oportunidad ofrecer un nuevo componente que ayude a la investigación y crecimiento competitivo a futuras generaciones de estudiantes para que profundicen sus exploraciones y premisas en suelos cohesivos con permeabilidad. Todo esto se realiza con la misión de que a futuro la universidad sea pionera en ensayos de estudio de suelos, buscando llegar a ofrecer resultados más exactos en sus muestras.

1.2.2 Formulación del Problema. Al punto de observar como otros estudiantes han ayudado al crecimiento del laboratorio de geotecnia con equipos referentes a ensayos de suelos, percibimos la necesidad de complementarlo con el equipo de permeabilidad en suelos cohesivos (cabeza variable).

Con este equipo se ayudara a la formación de ingenieros civiles capaces de afrontar casos de suelos con este problema en la vida profesional.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General. Desarrollar un modelo físico que permita la determinación del coeficiente de permeabilidad con cabeza variable en suelos cohesivos, con el cual se obtengan datos confiables y veraces que resulten de gran apoyo a la comunidad estudiantil especialmente a la rama de ingeniería civil.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo físico de permeabilidad con cabeza variable para suelos finos, en base a las bibliografías y manuales de referencia consultados.
- Efectuar un número considerable de ensayos que permitan calibrar el modelo físico principalmente y realizar las modificaciones mecánicas y funcionales.
- Confrontar y examinar los datos obtenidos, con el objetivo de evaluar la confiabilidad del equipo según las normatividad propuesta.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El modelo físico se desarrolla bajo el parámetro de trabajo de grado tecnológico debido a que la principal función es “la medición de la permeabilidad en suelos cohesivos con cabezas variable” con la cual se buscan dar resultados más seguros y factibles, estableciendo los valores representativos del coeficiente de permeabilidad de suelos finos.

Con este modelo se busca ayudar al ingeniero a que se genere la búsqueda para dar solución de obtener datos confiables en los estudios de suelos, surgiendo así la idea de modelar y construir un equipo para el laboratorio (permeámetro de cabeza variable), como instrumento que facilite los ensayos de permeabilidad en suelos cohesivos; de esta manera se busca brindar un apoyo practico que profundice el proceso de aprendizaje teórico-práctico, que permita mejorar la competitividad académica y la calidad del laboratorio en beneficio de la comunidad universitaria.

1.5 DELIMITACIÓN

1.5.1 Espacio. Debido a la falta de espacio y de horarios que maneja el laboratorio de geotecnia recurrimos a desarrollar el equipo en nuestras casas y el trabajo escrito en la biblioteca de la universidad.

1.5.2 Tiempo. Este trabajo se desarrollara en el lapso de tiempo comprendido en el periodo académico, en el cual se llevara a cabo las investigaciones documentales que nos permitan dar una opinión crítica el diseño, montaje, elaboración de ensayos y análisis de resultados.

1.5.3 Contenido. En el desarrollo del trabajo se limita a la elaboración de ensayos de permeabilidad en suelos cohesivos, finos; con el uso de muestras alteradas e inalteradas, además solo se tiene en cuenta el uso del permeámetro de cabeza variable y no el de cabeza constante.

1.5.4 Alcance. El límite a la investigación del tema, está referido al uso exclusivo y la implementación del modelo físico del permeámetro, con el fin de determinar el coeficiente de permeabilidad en suelos cohesivos.

1.6 MARCO REFERENCIAL

1.6.1 Orígenes de los Estudios de Permeabilidad. El flujo de agua a través de medios porosos, es de gran interés en la mecánica de suelos, está gobernado por una ley descubierta en 1865 por Henry Darcy quien investigó las características del flujo del agua a través de filtros, formados precisamente por materiales térreos lo cual es particularmente afortunado para la aplicación de los resultados de la investigación a la mecánica de suelos.

1.6.2 Importancia de los Suelos en la Ingeniería Civil. En el campo de trabajo, el ingeniero civil constantemente se enfrenta a diversos problemas surgidos por el tipo de suelo con el cual tratará, el suelo es lo que soportará el peso de una estructura, y si este no cumple con ese objetivo, la estructura sufrirá problemas de agrietamiento, hundimientos y otros que también dañaran la obra realizada.

Pero el suelo no sólo es utilizado como base para soportar las cargas, sino también en taludes, como material para construcción de viviendas, y como el enunciado de esta investigación lo dice como impermeabilizante para rellenos sanitarios; la diversidad de usos que ahora en día se le da al suelo es el resultado de mucho tiempo de investigación.

1.6.2.1 Flujo de Agua en los Suelos. Al tratar con el tema de permeabilidad de los suelos, es necesario mantener en mente los conceptos más importantes referentes al estado energético del agua. Existen varios fenómenos que tienen relación directa con la permeabilidad de los suelos; ya que la permeabilidad es un valor altamente alterable que depende de la naturaleza del suelo, de sus características mecánicas y de las fuerzas de la superficie cuando el tamaño de partículas principal es el correspondiente a finos.

1.6.2.2 Cohesión y Adhesión. Las fuerzas básicas responsables de la retención y movimiento del agua en el suelo, se define como cohesión y adhesión. La fuerza de cohesión es la atracción entre moléculas de agua, mientras la adhesión es la atracción de las moléculas con la superficie sólidas.

La fuerza de adhesión hace que algunas moléculas de agua estén rígidamente unidas a las partículas de suelo y se llama agua absorbida; en cambio las

moléculas unidas por fuerzas de cohesión sobre superficie de los granos de suelo pueden ser fácilmente removidas. Las fuerzas de cohesión y adhesión juntas regulan el movimiento de agua.

En suelos arcillosos la adhesión y cohesión ejercen sus fuerzas sobre sus propiedades de plasticidad.

1.6.2.3 Permeabilidad en los Suelos. Es la facilidad o dificultad que tiene un suelo de permitir que lo atraviese el agua a través de sus vacíos. Esto permite clasificar los suelos en: suelos permeables y suelos impermeables, la permeabilidad está influenciada por el tamaño de las partículas, espacio de los vanos y la estructura del suelo. El Cuadro 1 muestra los valores tipos de permeabilidad para diferentes tipos de suelos.

Cuadro 1. Tabla de Permeabilidad

Tipos de suelo	Grado relativo de permeabilidad	Coefficiente de permeabilidad K (cm./seg.)	Propiedades de drenajes
Grava limpia	Alto	1×10^{-1}	Buena
Arena limpia	Medio	1×10^{-3}	Buena
Grava arenosa	Medio	1×10^{-3}	Buena
Arena fina	Bajo	1×10^{-3} a 1×10^{-5}	Franca a pobre
Limos	Bajo	1×10^{-3} a 1×10^{-5}	Franca a pobre
Arena limo arcilloso	Muy bajo	1×10^{-4} a 1×10^{-7}	Pobre o prácticamente imperceptible
Arcilla homogénea	Muy bajo a prácticamente impermeable	$< 1 \times 10^{-7}$	Prácticamente imperceptible

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

Los factores más importantes que intervienen en la permeabilidad.

- La relación de vacíos del suelo. El espacio de los vanos es proporcional al tamaño de la partícula. En otras palabras, a mayor tamaño mayor cantidad de vanos.
- La estructura y estratificación del suelo. En un suelo se pueden encontrar diferentes permeabilidades en estado inalterado y remodelado, aun cuando la relación de vacíos sea la misma en ambos casos; esto puede ser debido a los

cambios en la estructura y estratificación del suelo inalterado o una combinación de los factores.

La permeabilización sufre variaciones debido a que en el remoldeo quedan libres algunas partículas del suelo y al fluir el agua, esta las mueve y las reacomoda, tapando los canales o arrastrándolas a la superficie o al exterior de la muestra causando turbidez en el agua.

➤Tamaño de las partículas. La permeabilidad de un suelo será más baja cuando más pequeñas sean sus partículas y por ende menor serán los vacíos que forman los canales de flujo.

La permeabilidad en algunos suelos es provocada por arrastre de sus finos, causando filtración.

➤Grado de saturación. Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos de una muestra de suelo; cuan mayor sea el grado de saturación mayor será la permeabilidad, debido a la reducción en los canales disponibles al flujo del agua.

➤Polaridad. Depende de la movilidad del flujo que rodea a las partículas de suelo y del movimiento del fluido en dirección opuesta al flujo neto debido al potencial eléctrico generado por la filtración.

En el intercambio catiónico se produce procesos reversibles en las cuales las partículas sólidas del suelo se unen a iones de la fase acuosa expulsando al mismo tiempo cantidades iguales de otro catión generando así un equilibrio entre estos dos procesos y, una compensación de cargas positivas por partes de los aniones que están presentes en la masa del suelo.

➤Densidad del suelo. La densidad relativa es una propiedad índice de los suelos y se emplea normalmente en gravas y arenas, es decir, en suelos que contienen casi exclusivamente partículas mayores a 0.074 mm (malla #200).

La densidad relativa es una manera de indicar el grado de compactación (compactación) de un suelo y se puede emplear tanto para suelos en estado natural como para rellenos compactados artificialmente.

➤Peso específico. En un suelo real es normal que los minerales de fracciones muy finas y coloidales tengan su peso específico mayor que los minerales de la fracción más gruesa. A mayor peso específico será menor la permeabilidad⁶.

⁶ UNIVERSIDAD DE ORIENTE. Suelos y sus propiedades [en línea]. Cunaba: La Universidad [citado 10 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/015454/015454_Cap3.pdf>

1.6.3 Métodos para Medir el Coeficiente de Permeabilidad del Suelo. El coeficiente de permeabilidad es un dato cuya determinación correcta es de fundamental importancia para la formación del criterio del proyectista y en algunos problemas de mecánica de suelos como el diseño de base de un relleno sanitario con suelos naturales.

Hay varios procedimientos para la determinación de permeabilidad de los suelos: unos "directos", así llamados porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; otros "indirectos", proporcionados, en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines y los métodos del terreno que permiten identificar la conductividad hidráulica de un suelo en forma directa.

Estos métodos son los siguientes:

Directos

- Permeámetro de carga constante.
- Permeámetro de carga variable.
- Prueba directa de los suelos en el lugar

Indirectos

- Calculo a partir de la curva granulométrica.
- Calculo a partir de la prueba de consolidación.
- Calculo con la prueba horizontal de capilaridad.

Métodos de Terrenos

- Infiltración estándar.
- Prueba de agotamiento y recuperación.

- ✓ Prueba de perforación entubada.
- ✓ Prueba de perforación no entubada.

- Prueba de infiltración.

- ✓ Lagunas de infiltración.
- ✓ Infiltrómetro de doble anillo.
- ✓ Método de Bouwer.
- ✓ Método de Porchet.
- ✓ Pruebas de inyección o extracción de agua (SlugTest)⁷.

1.6.4 Coeficiente de Permeabilidad. Se entiende por permeabilidad a la facilidad de movimiento de flujo a través de un medio poroso. La permeabilidad puede definirse como velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario. El

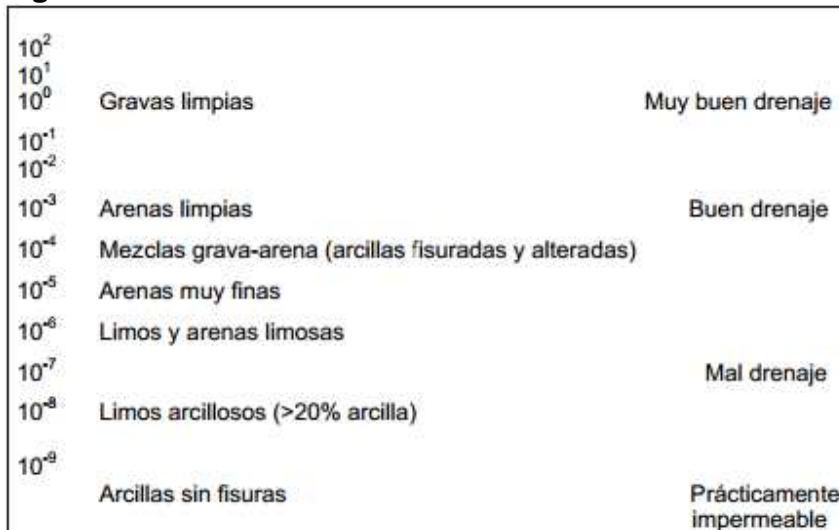
⁷ JUÁREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelo, México: Limusa, 2005. p.197

valor del coeficiente de permeabilidad (k) se unas como una medida de resistencia al flujo medida por el suelo.

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a las características del agua circulante. Los factores principales son:

- La densidad del suelo.
- La relación de vacíos del suelo.
- La estructura y estratificación del suelo.
- La existencia de agujeros, fisuras, etc. en el suelo.
- La viscosidad del agua del suelo, que varía con la temperatura.

Figura 1. Intervalo de Valores de k



Fuente. BRAJA M., Das. Fundamentos de ingeniería geotécnica. 4 ed. Barcelona: Cengage Learning, 2013. p. 78.

1.6.5 Prueba de Carga Variable. La prueba de carga variable se usa para determinar el coeficiente de permeabilidad de suelos finos, tales como arenas finas, limos y arcillas. Para estos suelos el flujo de agua que los atraviesa es demasiado pequeño para permitir mediciones precisas con el permeámetro de carga constante.

En un cilindro de 100mm de diámetro (generalmente) se introduce una muestra del suelo; si la muestra que se va a ensayar es inalterada el cilindro puede ser un tubo U100 de muestreo, o bien el tubo corta núcleos que se usa en los ensayos densidad en campo las muestras también pueden prepararse por compactación en un molde de compactación estándar los extremos superior e inferior de la muestra se protegen con un filtro de malla de alambre y grava. La base del cilindro queda sumergida en un recipiente con agua que cuenta con un vertedor

de nivel constante y el extremo superior se conecta a un tubo piezómetro abierto de diámetro conocido.

La prueba se lleva a cabo llenando la columna con agua y permitiendo que se produzca la infiltración a través de la muestra. Se registra la altura de agua en la columna a diferentes tiempos durante la prueba, y ésta se repite con tubos piezométricos de diferente diámetro.

1.6.6 Equipo de Permeabilidad. El coeficiente de permeabilidad k puede determinarse en el laboratorio entre otros, haciendo uso de los equipos de permeabilidad de pared rígida y de pared flexible, los que se describen a continuación:

1.6.6.1 Equipo de Permeabilidad de Pared Rígida. Este permeámetro se utiliza para suelos relativamente permeables, tales como gravas, arenas y mezclas de arena y grava. Los coeficientes de permeabilidad para esta clase de suelos varían de 10^2 a 10^{-3} cm/seg. El procedimiento consiste en someter la muestra de suelo (previamente compactada), a un flujo de agua bajo una carga constante. Es necesario conocer el área de la sección transversal de la muestra, su longitud, la carga a la que está sometida la muestra (por lo general es 1kg/cm^2) y la temperatura del agua.

1.6.7 Ensayos de Laboratorio

1.6.7.1 Determinación de k en el Laboratorio. El coeficiente de permeabilidad (k), puede medirse mediante ensayos de campo o de laboratorio y los principales problemas relacionados a la confiabilidad de las pruebas de laboratorio:

- La obtención de buenas muestras representativas.
- La reproducción de las mediciones de laboratorio.
- La reproducción de las condiciones de campo.

1.6.7.2 Confiabilidad de la Muestra. La permeabilidad de una masa de suelo depende tanto de su microestructura como de su macroestructura. Para realizar los ensayos de laboratorio las muestras que se obtienen por lo general son de tamaño bastante pequeño, por consiguiente, poco probable de que sean satisfactoriamente representativas en suelos con características macroestructurales importantes. Esta deficiencia puede corregirse hasta cierto punto con grupos selectos de muestras seleccionadas cuidadosamente.

1.6.7.3 Confiabilidad de las Mediciones de Laboratorio. La finalidad de cualquier procedimiento de laboratorio consiste en reproducir resultados similares usando un mismo método, y que estos resultados se comparen favorablemente con los obtenidos mediante otros procedimientos.

1.6.7.4 Reproducción de las Condiciones de Campo. Por lo general es difícil obtener muestras inalteradas, y es más difícil aún simular en el laboratorio las condiciones reales de campo en cuanto al flujo y esfuerzo. Los ensayos de laboratorio deben complementarse, siempre que sea posible y apropiado, con pruebas de campo. Puesto que el intervalo de valores de k es tan amplio, la selección del método.

1.6.8 Errores Probables. El agua debe haber sido desairada antes de ejecutar las pruebas y mantenida en esa condición. Si esto se hace correctamente existe poca posibilidad de que el aire cause un error de consideración: esta posibilidad se reduce mucho usando la acción del vacío después de que el material se satura.

La relación del área del tubo de carga a la del espécimen es muy pequeña (frecuentemente del orden 0.01), requiere una muy cuidadosa del arrea del tubo de carga.

La temperatura debería medirse en el momento en que atraviesa la muestra en lugar de hacerlo en el agua del recipiente inferior.

La estratificación y compactación no uniforme de la muestra puede hacer que la permeabilidad de la misma disminuya.

La estructura de la muestra puede verse afectada por una saturación demasiado rápida, excepto en lo que se refiere al error causado por el aire atrapado. Las restantes fuentes de error no suelen ser de gran influencia en el valor numérico del coeficiente de permeabilidad.

1.6.9 Proceso de Cálculo. El proceso consiste en medir las cargas h_1 y h_2 en los tiempos t_1 y t_2 , siendo la formula aplicar.

$$k = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Dónde:

k =conductividad hidráulica (LT^{-1})

L = Longitud de la muestra (L)

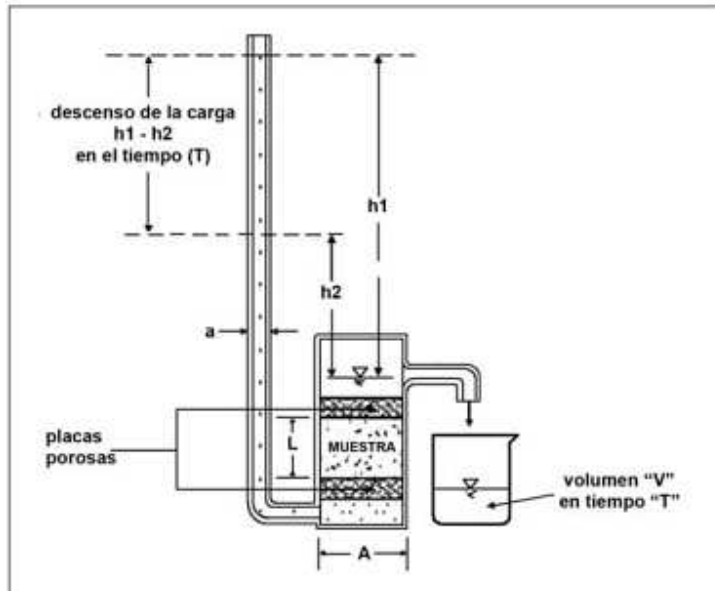
A = Área de la muestra del suelo (L^2)

a = área del tubo de abastecimiento (L^2)

t = intervalo de tiempo entre el descenso de h_1 a h_2 (T)

h_1, h_2 = cargas hidráulicas en os tiempos t_1 y t_2 respectivamente (L)

Figura 2. Permeámetro de Carga Variable



Fuente. VILLON BEJAR, Maximo. Drenaje. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2006. p. 117.

1.7 METODOLOGÍA

1.7.1 Tipo de Estudio. En el desarrollo del proyecto a través de consultas y recopilación de información bibliográfica e Internet, información que puede ser valiosa en cuanto al tipo de permeámetros existentes en Colombia.

Análisis de la información existente teniendo en cuenta que los permeámetros no existen diseños detallados inmodificables y las observaciones que se hacen durante el proceso de construcción del mismo permite introducir modificaciones al diseño inicial proceso que permitió identificar el sistema adecuado para determinarla permeabilidad de un suelo cohesivo.

Con el modelo físico del permeámetro se buscó obtener datos más confiables y eficaces con el fin de obtener el cálculo más aproximado de permeabilidad en un suelo fino.

Este tipo de método de investigación que se usará durante el desarrollo del proyecto será de tipo descriptivo, donde se presentaran diversas etapas de investigación generando un paso a paso en la indagación y recopilación de información que permita ampliar el conocimiento adquirido, a fin, de contribuir adecuadamente con los parámetros y objetivos planteados en el proceso de diseño del equipo. Así mismo se encontrara que los resultados allí obtenidos serán de tipo cuantitativo experimental los cuales contarán con un margen de

error, que lo excluyen del campo de las ciencias exactas.

Las etapas se dividen en:

➤Diseño de Equipo Permeámetro de cabeza variable, siguiendo el diseño propuesto en el Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil de JOSEPH E. BOWLES, cumpliendo las exigencias mencionadas, mejorando su esquema y confiabilidad al momento de la toma de datos a demás contara con una guía paso a paso de la realización de este ensayo ya que no existe una norma específica sobre este.

➤Modelación física de un equipo que se llevará a cabo por medio de la elaboración , fabricación y el montaje de dos láminas de acrílico de 35 cm x 25 cm y 4 láminas de 3 cm x 35 cm con espesor de 10 mm para conformar una caja de 25 cm de largo x 35 cm de ancho x 5 cm de alto se le harán perforaciones para el ajuste de las piezas de acrílico con tornillos de 1/8" Ø x 1" de longitud en acero inoxidable, en la parte inferior se le adecuara 4 niveladores para darle una mayor estabilidad, en la parte superior se harán perforaciones para la colocación de dos niveles de gota, la ubicación de la regla con un tubo de vidrio de 1.55 cm de largo con un Ø interno de 10 mm y sus respectivo soporte, también para el mecanismo de polea para la cámara que va a mostrar los datos del descenso del agua, en la parte lateral derecha se realizara una perforación con rosca para colocar una válvula de bola de 3/8" con un accesorio de sello rápido de 3/8" para controlar la entrada de agua al sistema.

Se fabricara un cilindro en acrílico de Ø interno de 4" con un espesor de 5mm, también la base y la tapa en aluminio de Ø 14" con espesor de 2 cm con sus respectivas perforaciones roscadas para la tapa, el sistema de la base y la tapa poseerán aros de sello para garantizar un cierre hermético para que no se presenten fugas en el cilindro. En la tapa se ubicaran dos válvulas de 3/8" una con el accesorio de sello rápido de 3/8" para la conexión de una manguera de entrada de 3/8" pared interna para la entrada del fluido al cilindro y la otra válvula que permitirá hacer la purga de aire, en la base se encontrara una válvula de 3/8" para la salida del flujo de agua.

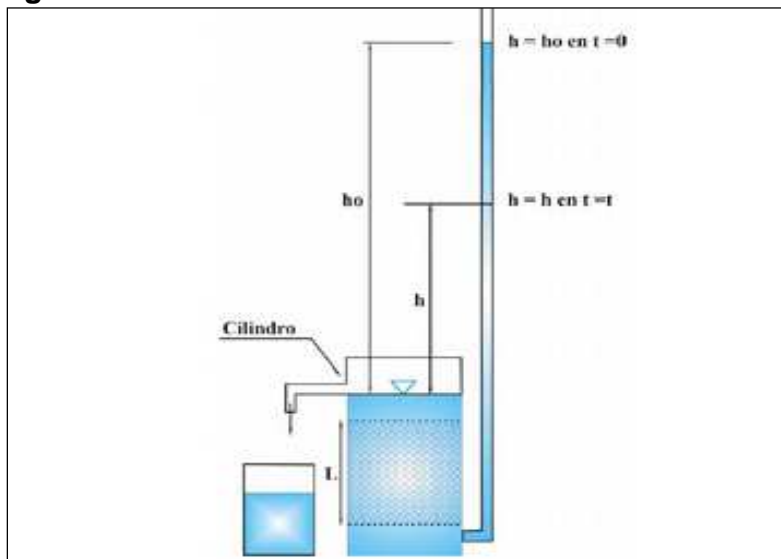
Se ubicarán tres varillas roscadas 1/4" y 20 cm de longitud entre la base y la tapa por medio de perillas tuerca.

➤Funcionalidad y ensayo del equipo, según los parámetros del Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil de JOSEPH E. BOWLES se tendrán en cuenta los pasos y especificaciones requeridos para la toma de la muestra, para ello se desarrollaran una serie de ensayos para determinar si el material a utilizar cumple como un suelo cohesivo de esta forma se garantizará una calibración adecuada, fácil manejo y una recolección de datos confiables.

2. MODELO FÍSICO PARA LA MEDICIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN SUELOS COHESIVOS (CABEZA VARIABLE)

Experimento de permeabilidad de cabeza variable usando como permeámetro el molde patrón de compactación. Debe tenerse mucho cuidado en el montaje del aparato para evitar fugas, usar una regla métrica para medir las cabezas hidráulicas, h_1 y h_2 . Para gradientes muy pequeños se debe tener cuidado que no se drene la muestra.

Figura 3. Permeámetro de Cabeza Variable



Fuente. BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería. México: Mc Graw-Hill, 1980. p. 233.

La ecuación aplicable a este experimento puede deducirse fácilmente pero se deja como parte del ejercicio.

$$k = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Donde a = área de la sección transversal de la bureta o tubería de entrada cm^2 .
 A = área seccional de la muestra de suelo, en cm^2 .
 h_1 = cabeza hidráulica a través de la muestra al comienzo de experimento ($t=0$)
 h_2 = cabeza hidráulica a través de la muestra al final del ensayo ($t=t_{\text{ensayo}}$)
 L = longitud de la muestra en cm
 t = tiempo transcurrido durante el experimento, en segundos
 \ln = logaritmo natural (en base 2.7182818...)

Para determinar el coeficiente de permeabilidad k ha sido desarrollado principalmente por economía pues el experimento para determinar k en un suelo fino puede durar normalmente varios días. El experimento de cabeza constante consume una gran cantidad de agua en el laboratorio y donde la cantidad de flujo

2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Un revestimiento de suelo debe combinar generalmente varias propiedades:

- Baja permeabilidad.
- Estabilidad ante los gradientes fuertes a los que se encuentra sometido.
- Resistencia a la erosión.
- Gran estabilidad volumétrica

2.2 SELECCIÓN DE MATERIAL

Existen dos opciones: emplear un material fino plástico poco permeable y protegerlo con otro material contra la erosión y secado o elegir un material natural (o una mezcla) que combine en la medida de lo posible todas las propiedades deseables.

El espesor del revestimiento debe ser el necesario para garantizar la continuidad del mismo y así evitar que se encuentre sometido a un gradiente hidráulico excesivo: (no es recomendable utilizar un espesor inferior a 30 cm ni un gradiente superior a 10), especialmente en materiales mal graduados. Es importante verificar que las diferentes fracciones granulométricas que componen el material de revestimiento cumplan mutuamente con las condiciones de retención de filtros y que no existe peligro de segregación bajo el efecto del gradiente hidráulico. En la misma forma, el substrato debe poder retener las partículas del revestimiento.

2.3 PREPARACIÓN DEL MATERIAL

Es conveniente compactar el material seleccionado con un contenido de humedad alto para reducir su permeabilidad al mínimo; el contenido de humedad requerido puede ser hasta de 5 o 6% superior al óptimo Proctor. Para evitar que existan zonas locales más permeables en el revestimiento, es necesario que los materiales de los bancos de préstamo sean preparados previamente para su colocación. La preparación consiste en darles el contenido de humedad adecuado, homogenizados por mezclado, y dejarlos curar para que el contenido de humedad se uniformice por difusión. El tiempo de curado debe fijarse para cada material mediante muestreos de control. Un tiempo del orden de tres a seis días resulta generalmente suficiente.

2.4 COLOCACIÓN

Para lograr la mínima permeabilidad, los equipos tradicionales de compactación como rodillos pata de cabra o neumáticos pueden resultar inadecuados al atascarse debido al alto contenido de humedad del material.

Se debe tener en cuenta que no se busca un alto grado de compactación, sino dar al suelo una estructura adecuada, puede ser preferible recurrir a un equipo ligero (por ejemplo tractor agrícola) para la formación de una capa de suelo remodelada de espesor uniforme. Es conveniente que el revestimiento se construya por capas de no más de 20cm de espesor.

2.5 PROTECCIÓN

La protección de los revestimientos de suelos finos, a base de material granular, suelo-cemento o concreto asfáltico, debe instalarse lo más rápido posible. Durante el lapso que separa la colocación del revestimiento de la instalación de la protección, el contenido de humedad del suelo debe mantenerse constante por riego.

2.6 EVALUACIÓN DE LA NECESIDAD DE IMPERMEABILIZACIÓN

Antes de decidir si una laguna se ha de impermeabilizar o no, es muy importante realizar un estudio cuidadoso y básicamente la decisión dependerá de la magnitud de las filtraciones previsibles, del tipo de líquido almacenado y de consideraciones económicas y ecológicas.

2.7 ESTUDIO TEÓRICO DE LAS INFILTRACIONES

Las pérdidas de agua por infiltración hacia el subsuelo en condiciones de flujo establecido para almacenamientos superficiales están regidas por las ecuaciones de flujo en medios porosos.

2.7.1 Mecanismos de Infiltración. Además de presentarse a través de los mecanismos descritos anteriormente, las filtraciones pueden ocurrir debido a diversas condiciones peculiares del sitio o a defectos de los bordos o de su cimentación.

- Oquedades o grietas en el suelo de desplante.
- Agrietamiento por secado de materiales arcillosos superficiales.
- Contacto defectuosos entre los bordos y suelo de desplante.
- Contacto defectuoso entre capas compactadas de los bordos.

2.8 ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Antes de decidir respecto a la conveniencia de impermeabilizar una laguna artificial, es necesario realizar un estudio geotécnico detallado del sitio:

- Identificar los mecanismos más probables de filtración
- Verificar si la permeabilidad del terreno conduce a filtraciones aceptables o no
- Evaluar si los suelos locales pueden ser empleados para impermeabilizar, o definir los problemas de estabilidad que estos suelos plantearán para la aplicación de un método de impermeabilización dado.

La investigación geotécnica debe, además, proporcionar los elementos para el diseño del bordo, características mecánicas de la cimentación y de los materiales de construcción.

2.8.1 Exploración y Pruebas de Campo

- Exploración superficial y recopilación de datos
- Sondeos
- Pruebas de permeabilidad de campo

2.8.2 Ensayos de Laboratorio

- Pruebas de identificación
- Pruebas de permeabilidad
- Pruebas de consolidación
- Pruebas de Resistencia al Corte
- Prueba de Erosionabilidad

2.9 MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DEL SUELO

Existen varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos, unos directos cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; otros indirectos, porcionados en forma secundaria, por pruebas técnicas que primeramente persiguen otros fines.

2.10 FLUJO DE AGUA

Puesto que los suelos constan de partículas discretas, los poros entre las partículas están interconectados, por lo que el agua puede fluir libremente en el interior de la masa del suelo. En medios porosos como este, el agua fluye de las zonas de alta a las de baja presión. Al estudiar los problemas del flujo de agua, es común expresar la presión como carga de presión o carga, medida en metros de agua.

2.11 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

Se entiende por permeabilidad a la facilidad de movimiento de flujo a través de un medio poroso. La permeabilidad puede definirse como velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario. El valor del coeficiente de permeabilidad (k) se usa como una medida de resistencia al flujo ofrecida por el suelo.

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a las características del agua circulante. Los factores principales son:

- La densidad del suelo.
- La relación de vacíos del suelo.
- La estructura de estratificación del suelo.
- La existencia de agujeros, fisuras, etc., en el suelo.
- La viscosidad del agua del suelo, que varía con la temperatura.

2.11.1 Prueba de Carga Variable. Se usa para determinar el coeficiente de permeabilidad de suelos finos, tales como arenas finas, limos y arcillas. Para estos suelos, el flujo de agua que los atraviesa es demasiado pequeño para permitir mediciones precisas con el permeámetro de carga constante.

En un cilindro de 100mm de diámetro se introduce una muestra del suelo; si la muestra que se va a ensayar es inalterada el cilindro puede ser un tubo U100 de muestreo.

2.11.2 Confiabilidad de la Muestra. La permeabilidad de una masa de suelo depende tanto de su microestructura como de su macroestructura. Para realizar los ensayos de laboratorio las muestras que se obtienen por lo general son de tamaño bastante pequeño, por consiguiente, poco probable de que sean satisfactoriamente representativas en suelos con características macroestructurales importantes. Esta deficiencia puede corregirse hasta cierto punto con grupos selectos de muestras seleccionadas cuidadosamente (véase las Figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12,13).

Figura 4. Tornillos de 1" de Largo x 3/16" con Arandela y Tuerca en Acero Inoxidable. Para Ajuste de la Cuadrícula a la Base del Equipo y el Perfil de Aluminio



Fuente. Los Autores.

Figura 5. Accesorios en Bronce (Válvulas y Uniones de 1/4") para el Control de la Entrada y la Salida del Agua



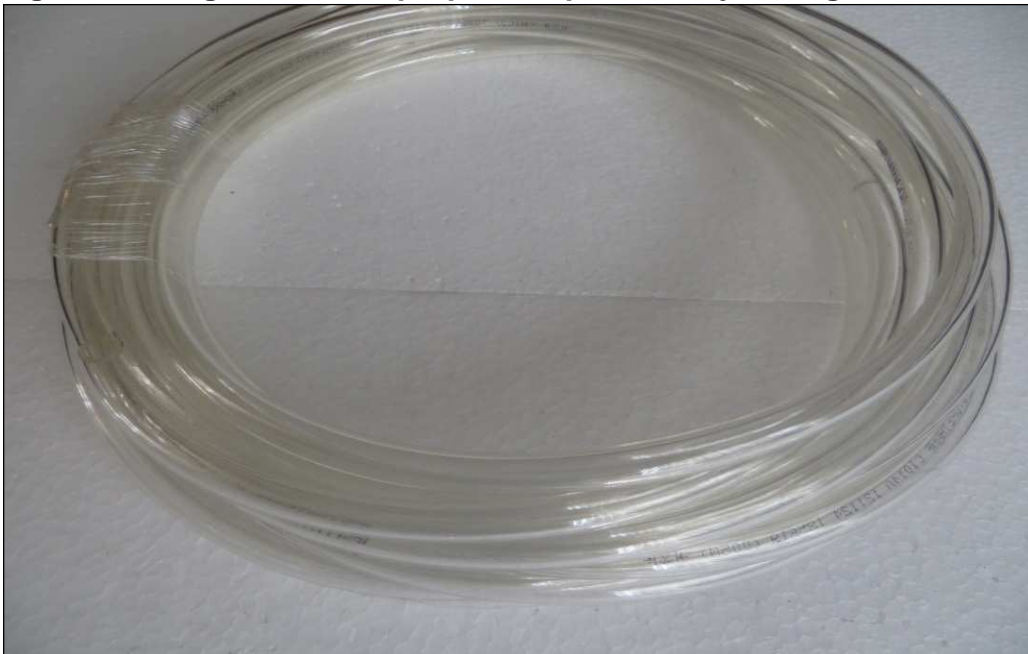
Fuente. Los Autores.

Figura 6. Accesorios en Acero Inoxidable (Codos y Válvulas de Sello Rápido) para Conexiones de las Mangueras



Fuente. Los Autores.

Figura 7. Manguera en Polipropileno, para el Flujo de Agua



Fuente. Los Autores.

Figura 8. Angulo de Aluminio para los Bordes de la Cuadrícula



Fuente. Los Autores.

Figura 9. Resorte en Acero Inoxidable, para Fijar las Piedras Porosas a la Muestra



Fuente. Los Autores.

Figura 10. Tornillos de 1" x 1/8" en Acero Inoxidable, para el Armado de la "Caja" Base del Equipo



Fuente. Los Autores.

Figura 11. Niveladores Colocados en la Base del Equipo



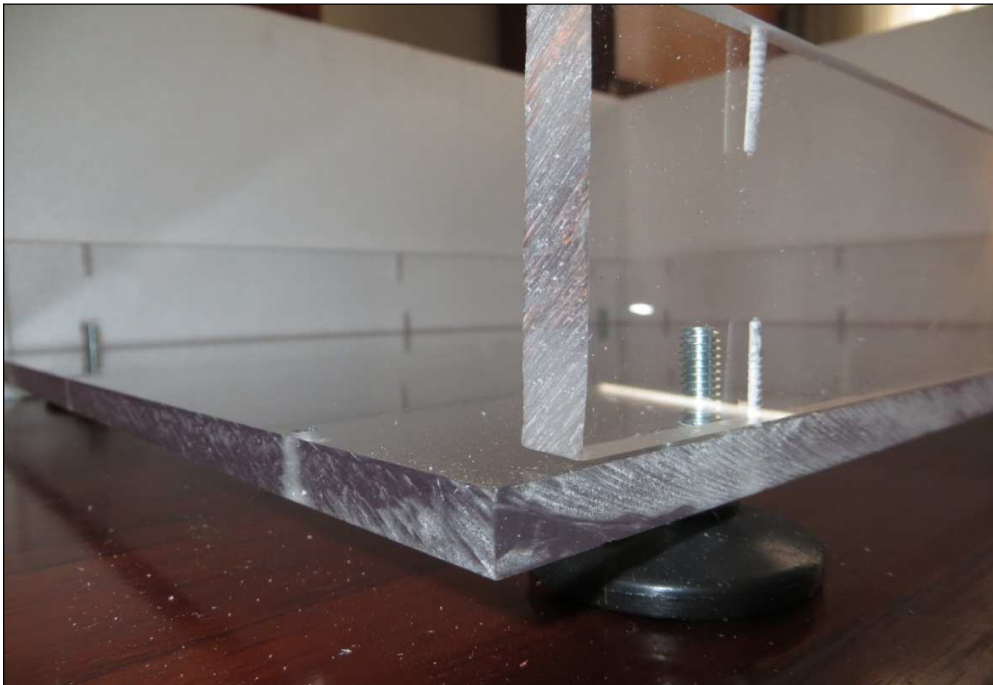
Fuente. Los Autores.

Figura 12. Niveladores Colocados en la Base del Equipo



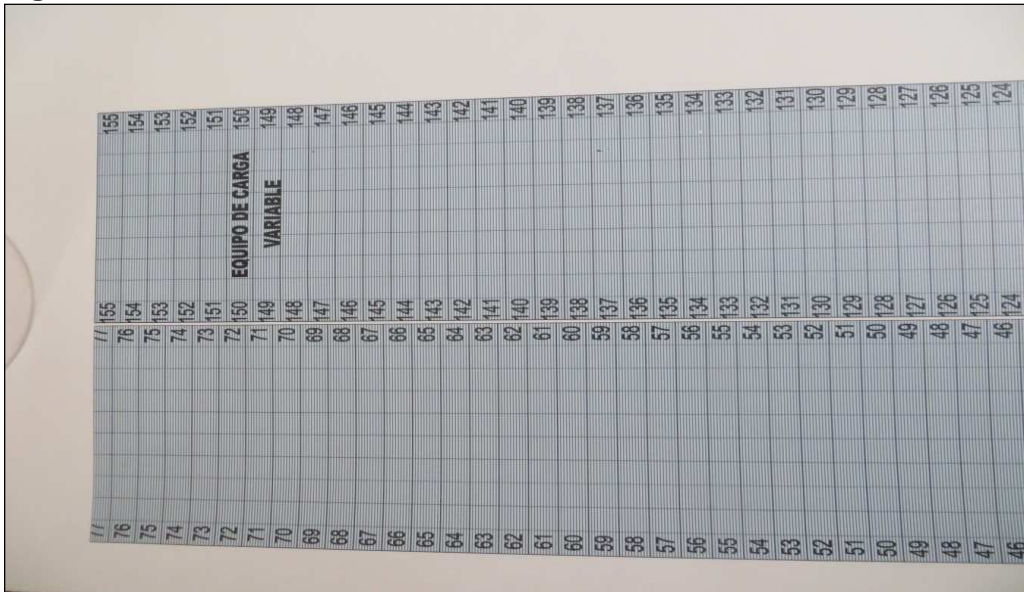
Fuente. Los Autores.

Figura 13. Acrílicos Transparentes en 10mm de Espeso (Láminas de 40cmx50cm, 155cmx10cm, 50cmx6cm) que Conforman el Equipo



Fuente. Los Autores.

Figura 141. Cuadrícula en Vinilo Autoadhesiva



Fuente. Los Autores.

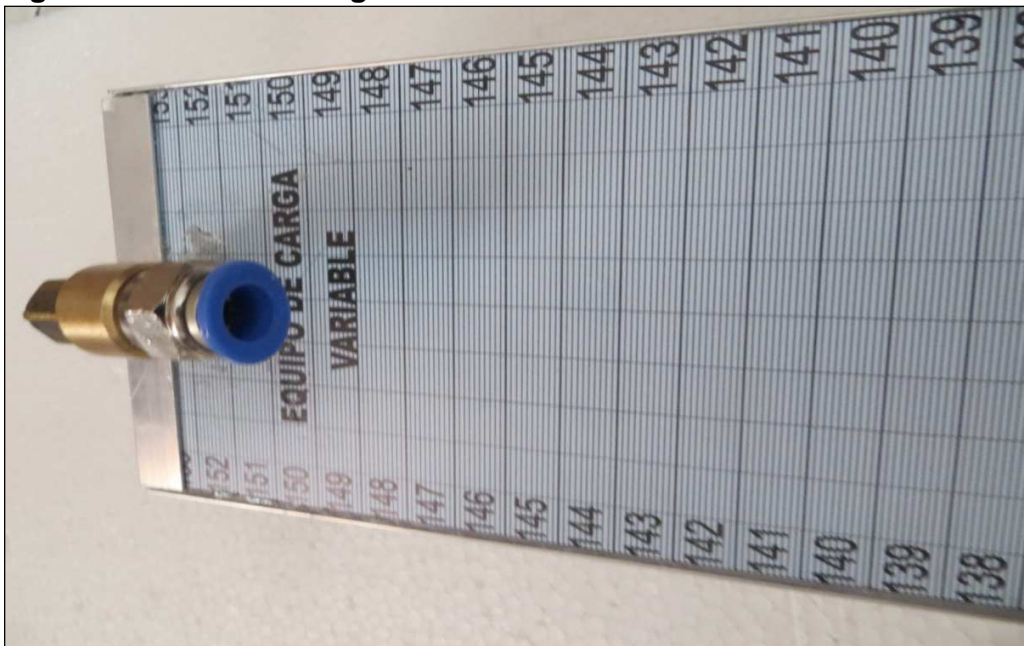
2.12 ARMADO DEL EQUIPO

Figura 15. Entrada de Agua.



Fuente. Los Autores.

Figura 16. Entrada de Agua



Fuente. Los Autores.

Figura 17. Entrada de Agua.



Fuente. Los Autores.

Figura 182. Ojo de Pollo para Garantizar que la Base del Equipo este Nivelada



Fuente. Los Autores.

En la Figura 19 se muestran piedras Porosas, para Garantizar el Flujo del Agua, se Coloca una en la Parte Superior de la Muestra y otra en la Parte Inferior de la Muestra

Figura 19. Piedras Porosas



Fuente. Los Autores.

En la Figura 20 se muestra el molde para Compactar las Muestras en el Laboratorio (Alteradas), Base en Acero, Anillo de Extensión, y Molde en Acrílico de Diámetro de 4" y Altura de 5"

Figura 20. Molde para Compactar las Muestras



Fuente. Los Autores.

En la Figura 21 se observa el molde con el anillo de extensión y con el anillo cortador para sacar muestras inalteradas (in-situ), el costo va incluido, con todo el molde.

Figura 21. Molde con el Anillo de Extensión y Anillo Cortador



Fuente. Los Autores.

Figura 22. Base con el Ojo de Pollo para Garantizar la Nivelación de la Misma



Fuente. Los Autores.

Figura 23. Base en Aluminio con Aro Sello (oring), con Válvula, Tornillos en Acero Inoxidable



Fuente. Los Autores.

Figura 24. Base en Aluminio, con Válvula, Aro Sello, Tornillos y Molde en Acrílico donde se va a Colocar la Muestra para Ensayo.



Fuente. Los Autores.

Figura 25. Base Inferior, Válvula, Tornillos, Oring, Molde y Tapa Superior con sus Válvulas de Entrada de Agua y de Purga.



Fuente. Los Autores.

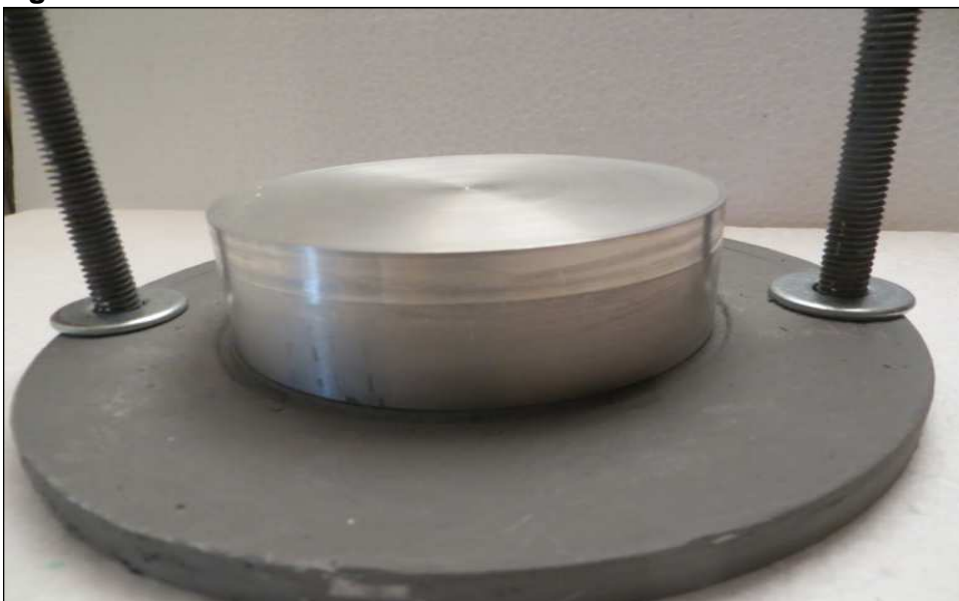
Figura 263. Molde más Válvulas y Perilla Tuerca para el Ajuste del Molde con las Tapas y Garantizar que no Quede Fuga de Agua.



Fuente. Los Autores.

En la Figura 27 se observa el falso fondo en aluminio colocado en la base del molde antes de colocar la muestra para dejar un espacio de 3cm, donde van a quedar las piedras porosas y el resorte.

Figura 27. Falso Fondo en Aluminio



Fuente. Los Autores.

En la Figura 28 se muestra el sistema de codos que permite que el caudal de agua entre a la muestra, el agua es alimentada por una manguera en acrílico (vista) y se conecta a la muestra por medio de un tubo de vidrio de 10mm de diámetro.

Figura 28. Sistema de Codos



Fuente. Los Autores.

En la Figura 29 se observa el soporte vertical en acero inoxidable para sostener el tablero con la cuadrícula, este va ayudado con un pie de amigo en aluminio fijo de la base del acrílico y del soporte por medio de tornillos en acero de diámetro de 3/16" y tuerca, también se observa la válvula de entrada de agua.

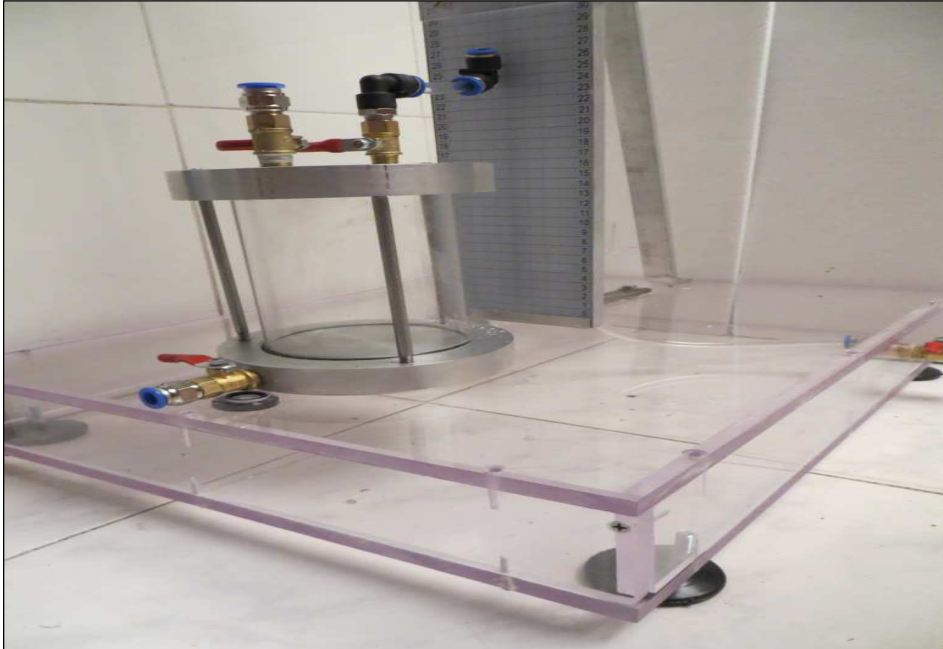
Figura 29. Soporte Vertical en acero Inoxidable para Sostener el Tablero



Fuente. Los Autores.

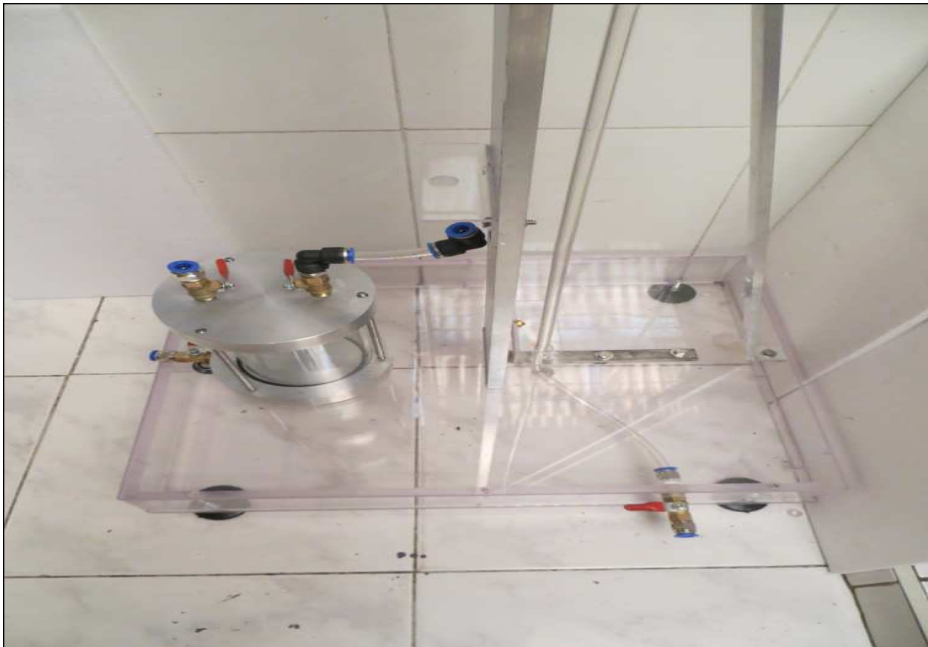
Se puede observar el equipo como va a quedar, base, molde, tablero con cuadrícula, válvula de entrada del agua (véase la Figura 30).

Figura 30. Válvula de Entrada del Agua



Fuente. Los Autores.

Figura 31. Equipo Completo



Fuente. Los Autores.

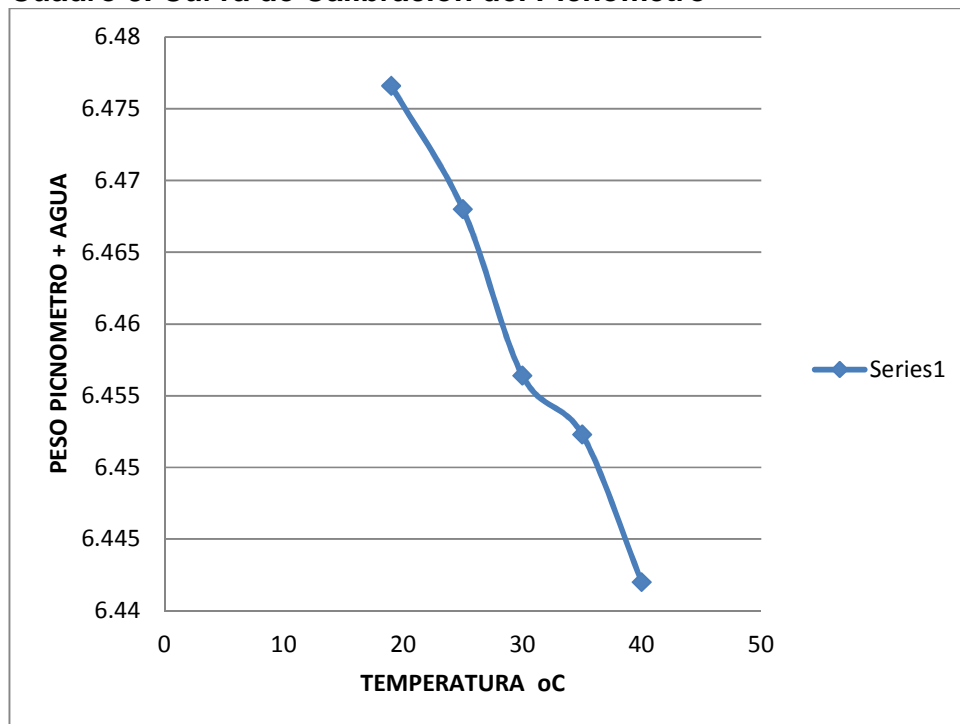
2.13 CÁLCULOS

Cuadro 2. Datos para Calibrar el Picnómetro para el Ensayo de Gravedad Específica

TEMPERATURA	PESO PICNÓMETRO +AGUA
°C	g
19	647,86
25	645,8
30	645,64
35	645,53
40	644,2

Fuente. Los Autores.

Cuadro 3. Curva de Calibración del Picnómetro



Fuente. Los Autores.

Cuadro 4. Tabla de Datos para el Cálculo de la Gravedad Específica

PICNÓMETRO #	2
TEMPERATURA °C	28
PESO PICNÓMETRO + AGUA + SOLIDOS (W1) g	721,56
PESO PICNÓMETRO + AGUA (W2) g	645,7
RECIPIENTE #	8
PESO RECIPIENTE (g)	196,32
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	314,42
PESO SUELO SECO (g)	118,6
FACTOR DE CORRECCIÓN, K	0,99803

Fuente. Los Autores.

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_2 - W_1} K = G_s = \frac{118,6}{118,6 + 645,7 - 721,56} = 2,77$$

2.14 MATERIAL ALTERADO (LIMO DE BAJA PLASTICIDAD)

Cuadro 5. Datos Iniciales para del Ensayo de Hidrometría

HIDRÓMETRO	152 H
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOSFATO DE SODIO
TAMAÑO MÁXIMO	PASA 10
CILINDRO	1000ml

Fuente. Los Autores.

Cuadro 6. Datos para Determinar el Peso Seco del Ensayo de Hidrometría

RECIPIENTE #	10
PESO RECIPIENTE (g)	115,2
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO (g)	214,5
PESO SUELO SECO + SOLUCIÓN	104,3
PESO SUELO SECO W0	99,3

Fuente. Los Autores.

Cuadro 7. Datos para el Cálculo de Hidrometría

FECHA	HORA	TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	R-Cd+Ct	L	K	D	PASA
dd/mm/aa	hh:mm	min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
20/09/2014	10:00	0											100
		1	20	36	9	0	10	37	27	8,30	0,013	0,038	37,261
		2	20	33	9	0	10	34	24	8,90	0,013	0,028	34,240
		5	20	30	9	0	10	31	21	9,70	0,013	0,019	31,219
		15	20	28	9	0	10	29	19	10,60	0,013	0,011	29,204
		30	20	26	9	0	10	27	17	10,70	0,013	0,008	27,190
		60	20	24	9	0	10	25	15	11,10	0,013	0,006	25,176
		120	20	23	9	0	10	24	14	11,40	0,013	0,004	24,169
		240	20	22	9	0	10	23	13	11,50	0,013	0,003	23,162
		1440	20	20	9	0	10	21	11	12,50	0,013	0,001	21,148

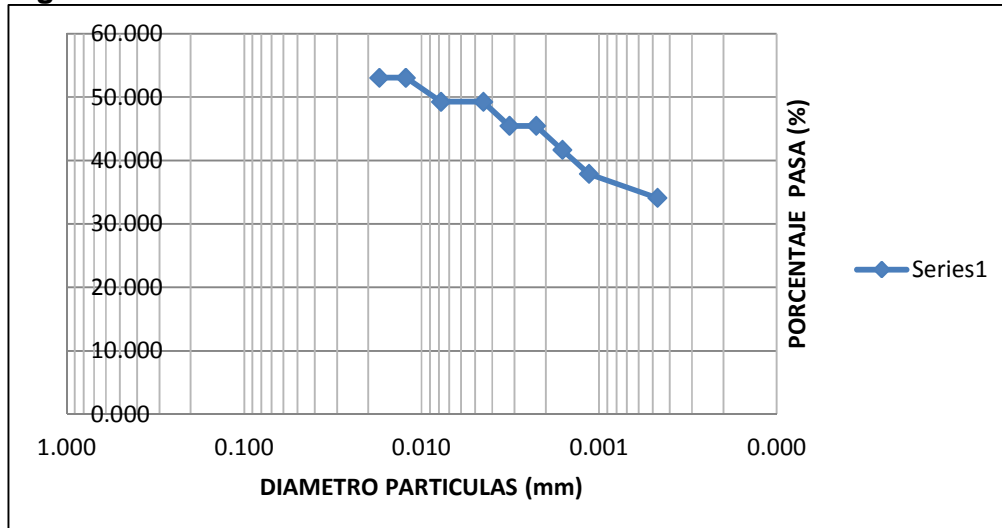
Fuente. Los Autores.

Cuadro 8. Parámetros para el Cálculo del Ensayo de Hidrometría

Cm	1
Gs	2,7
ALFA	1,000
W0	99,3

Fuente. Los Autores.

Figura 32. Curva Granulométrica



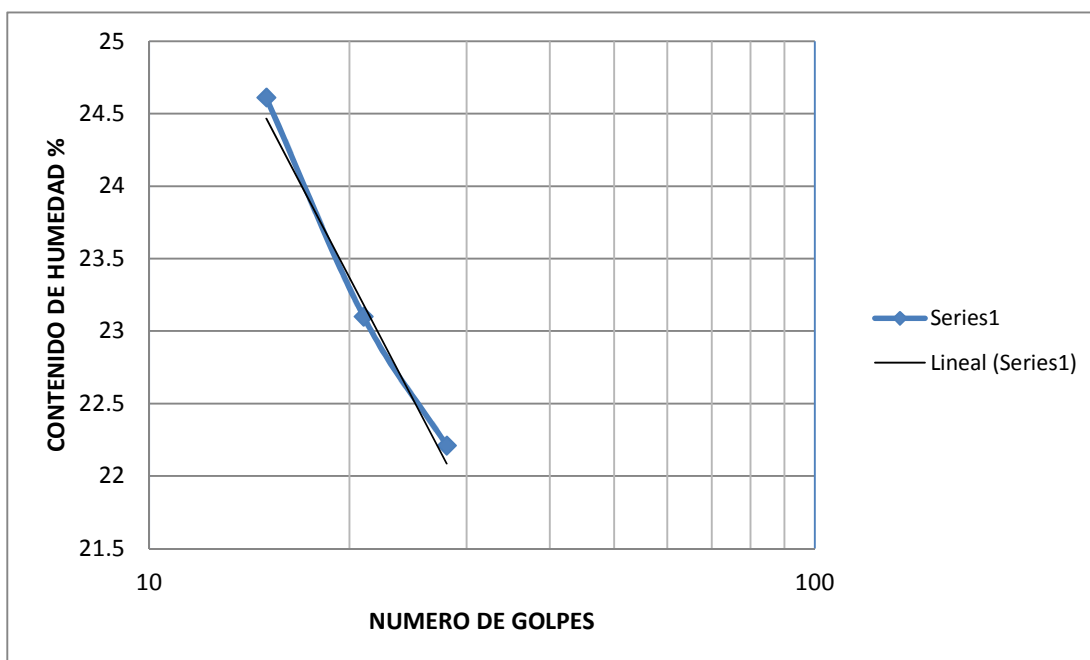
Fuente. Los Autores.

Cuadro 9. Datos para Determinar el Limite Líquido y el Limite Plástico

LIMITES DE ATTERBERG					
LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLÁSTICO		
NUMERO DE GOLPES	28	21	15	PRUEBA 1	PRUEBA 2
RECIPIENTE	8	9	10	11	12
PESO RECIPIENTE	10,42	14,05	16	10,69	11,01
PESO RECIPIENTE + SUELO HÚMEDO	27,2	29,13	27,9	18,9	19,8
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	24,15	26,3	25,55	17,7	18,5
CONTENIDO DE HUMEDAD	22,21	23,10	24,61	17,12	17,36

Fuente. Los Autores.

Figura 33. Gráfica para Determinar el Limite Líquido



Fuente. Los Autores.

Cuadro 10. Datos de Límite Líquido e Índice de Plasticidad para la Clasificación del Suelo

LIMITE LIQUIDO	22,9	CLASIFICACIÓN	
LIMITE PLÁSTICO	17,2	U.S.C.S	A.A.S.H.T. O
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	5,7	ML	
DE ACUERDO A LA CARTA DE PLASTICIDAD ES (ML) limo de baja plasticidad			

Fuente. Los Autores.

2.14 ENSAYO PROCTOR ESTÁNDAR

2.14.1 Material Alterado de Cantera

Cuadro 11. Datos Iniciales del Molde, que va a ser Utilizado en el Ensayo de Proctor Estándar

PESO MOLDE	1578,6	g
DIÁMETRO MOLDE	10,2	cm
ALTURA MOLDE	11,6	cm
VOLUMEN MOLDE	940	cm ³

Fuente. Los Autores.

El Cuadro 12 muestra el peso unitario húmedo y peso unitario seco, obtenidos después de cada ensayo de Proctor, para trazar la curva de compactación y así, determinar el paso unitario máximo, versus la humedad óptima.

Cuadro 12. Pesos Ensayo de Proctor Vs. la Humedad Óptima.

ensayo #	humedad %	peso molde g	volumen cm ³	Wmolde+suelo G	W suelo g	w unitario húmedo g / cm ³	w unitario seco g / cm ³
1	7	1578,6	940	3383,4	1804,8	1,920	1,794
2	9	1578,6	940	3439,0	1860,4	1,979	1,815
3	11	1578,6	940	3646,6	2068	2,200	1,982
4	13	1578,6	940	3524,4	1945,8	2,070	1,832

Fuente. Los Autores.

En el Cuadro 13 se muestran los pesos húmedos y secos obtenidos de una porción de material de cada punto de Proctor, para determinar la humedad y calcular el peso unitario seco.

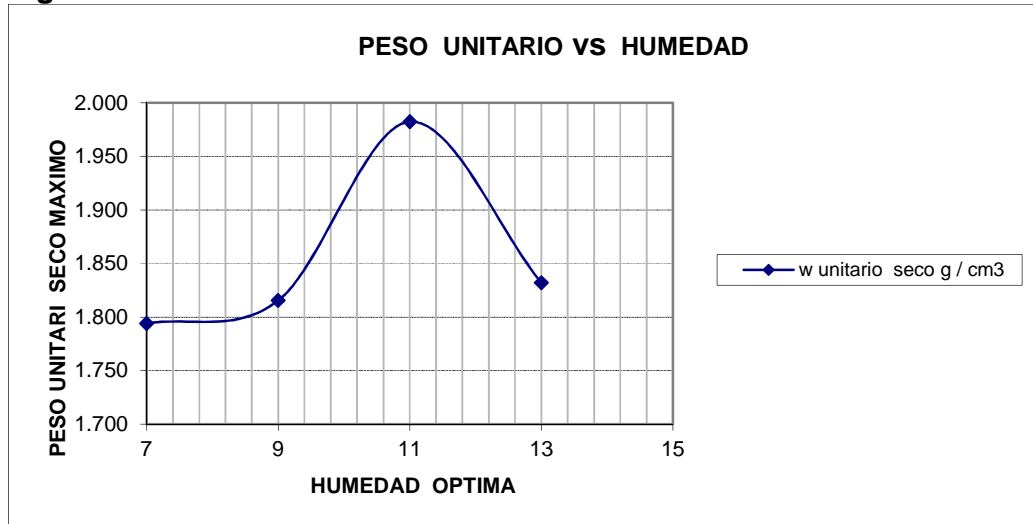
Cuadro 13. Pesos Húmedos y Secos

RECIPIENTE	#	3	25	9	5
PESO RECIPIENTE	g	40,2	39,8	41,5	45,8
PESO RECIPIENTE + MATERIAL HÚMEDO	g	189,4	175,2	188,1	195,4
PESO RECIPIENTE + MATERIAL SECO	g	179,6	164	173,6	178,2
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	7,0	9,0	11,0	13,0

Fuente. Los Autores.

Curva obtenida de la relación peso unitario seco, versus humedad de los datos de los Cuadros 12 y 13 para determinar el peso unitario seco máximo y la humedad óptima.

Figura 34. Peso Unitario vs. Humedad



Fuente. Los Autores.

PESO UNITARIO SECO MÁXIMO = 1,982 g/cm³
 HUMEDAD OPTIMA = 11%

2.15 PROCEDIMIENTO

2.15.1 Muestra Alterada Compactada en el Laboratorio.

- Se tamiza el material por el tamiz #10.
- Se caracteriza el material que pasa el tamiz # 10, realizándole los ensayos de: gravedad específica, granulometría por hidrómetro y límites de Atteberg.
- Al molde se le determina el peso, el diámetro y la altura.
- Para colocar la muestra en el molde de acrílico y realizar el ensayo de permeabilidad, es recomendable llevar la muestra a una humedad óptima y un peso unitario máximo seco, esto se consigue realizando el ensayo de proctor estándar a la muestra.

- En un recipiente se colocan 1000g de la muestra tamizada y se le agrega la cantidad de agua determinada, se realiza un buen mezclado para colocar la muestra en el molde.
- Para colocar la muestra de suelo en el molde de acrílico, es importante primero colocar el falso fondo y luego la muestra se coloca en tres capas y cada capa se le aplican 25 golpes con el martillo de compactación disponible.
- Se retira el falso fondo, se pesa el molde con el suelo compactado, y se mide la altura del material para determinar el peso unitario de la muestra.
- Para montar la muestra y realizar el ensayo, se coloca un papel de filtro en la parte superior de la muestra y una piedra porosa, otro papel de filtro y una piedra porosa en la parte inferior de la muestra. Se monta este en la base del molde, y se coloca el resorte, luego se sella con la tapa superior, ajustando esta con las tres tuercas.
- Se conecta la manguera del equipo a la válvula de la entrada del agua para la saturación de la muestra, se le va colocando agua hasta garantizar una completa saturación (mínimo 8 días).
- Después de la etapa de saturación se realiza el primer ensayo.
- Para el ensayo, se purga el sistema, abriendo y cerrando la válvula anterior (la más próxima al operario) hasta garantizar que se eliminan todas las burbujas.
- Se lleva la columna de agua hasta una altura determinada, (medida en la cuadrícula máximo 140cm (h_1)) para un tiempo cero.
- Se abre la válvula inferior y a medida que desciende la columna de agua se van tomando tiempos a intervalos de altura (h_2) hasta una altura mínima 35cm.
- Es importante realizar tres ensayos y tomamos los datos del tercer ensayo para realizar los cálculos de constante (K) de permeabilidad de la muestra.
- Después del ensayo, se desarma el equipo, la muestra se desecha y los accesorios (piedras, resorte, base y tapa) se lavan y se guardan en el compartimiento del equipo. Este último paso es muy importante para garantizar que el equipo tenga un buen funcionamiento y que perdure para el beneficio del laboratorio de la universidad.

2.15.2 Muestra Inalterada (in-situ)

- Se escoge el sitio donde se va a tomar la muestra, y con las herramientas necesarias, se cava y se conforma un hueco, con un área de 30cmx30cm aproximadamente, y se retira la capa vegetal.

- Con la ayuda de una espátula, se va tallando un apique de diámetro de 10cm aproximadamente, hasta una profundidad de 10cm.
- Se coloca el anillo cortador y sobre este el molde de acrílico y el anillo superior, se coloca el conjunto sobre el apique conformado y estos se hincan hasta llegar a la profundidad cavada, y se corta el material en la parte inferior.
- Con la ayuda de una espátula se corta el material sobrante de los extremos del molde de acrílico, se envuelve este en papel vinnilpel y papel de aluminio para conservar la humedad natural y posteriormente llevarlo al laboratorio.
- En el laboratorio, sacamos la muestra, le retiramos el papel que nos sirvió para protegerla, luego en uno de los extremos del molde, colocamos el falso fondo e hincamos la muestra, el falso fondo nos garantiza una altura de 3cm que es la altura que va ser ocupada por las piedras porosas y el resorte. Por el otro extremo del molde nos va a sobrar una cierta cantidad de material, la cual retiramos con la ayuda de una espátula y a este material le realizamos los ensayos de caracterización (humedad, peso unitario, límites, granulometría)
- Se retira el falso fondo y se coloca un papel de filtro y una piedra porosa a cada extremo de la muestra.
- Se coloca el molde de acrílico con la muestra en la base del equipo, inmediatamente se coloca el resorte, se arma, y se ajusta con las tres tuercas.
- Se conecta al tubo y a la válvula de entrada de agua para empezar la etapa de saturación. (Mínimo 8 días)
- Después de la etapa de saturación se realiza el primer ensayo.
- Para el ensayo, se purga el sistema, abriendo y cerrando la válvula anterior (la más próxima al operario) hasta garantizar que se eliminan todas las burbujas.
- Se lleva la columna de agua hasta una altura determinada, (medida en la cuadrícula máximo 140cm (h1)) para un tiempo cero.
- Se abre la válvula inferior y a medida que descende la columna de agua se van tomando tiempos a intervalos de altura (h2) hasta una altura mínima 35cm.
- Es importante realizar tres ensayos y tomamos los datos del tercer ensayo para realizar los cálculos de constante (K) de permeabilidad de la muestra.
- Después del ensayo, se desarma el equipo, la muestra se desecha y los accesorios (piedras, resorte, base y tapa) se lavan y se guardan en el compartimiento del equipo. Este último paso es muy importante para garantizar

que el equipo tenga un buen funcionamiento y que perdure para el beneficio del laboratorio de la universidad.

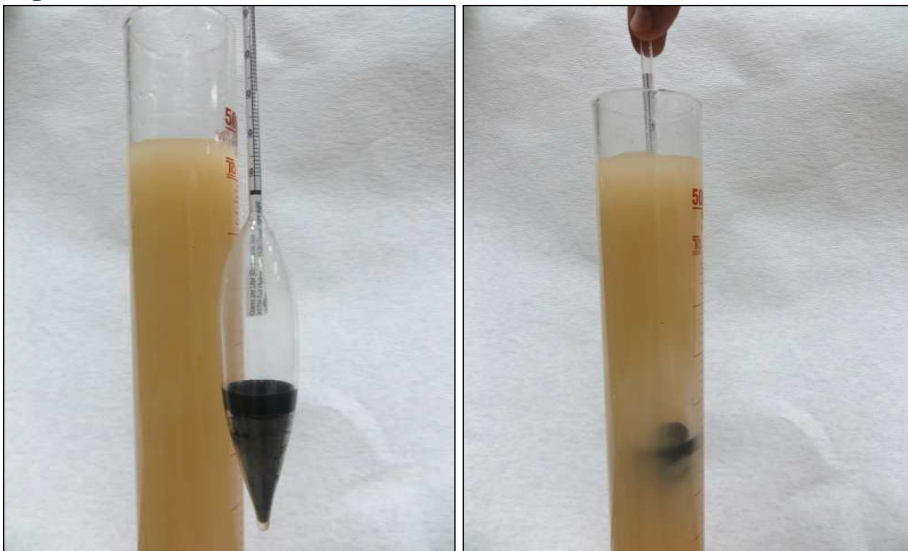
2.16 REGISTRO FOTOGRÁFICO

Figura 35. Gravedad Específica



Fuente. Los Autores.

Figura 36. Hidrómetra



Fuente. Los Autores.

2.17 CÁLCULOS EN LABORATORIO

PERMEABILIDAD CABEZA VARIABLE

$$K = \frac{aL}{At} \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) = \frac{(0.636) * (11.6)}{(81.07)(318.25)} \log \left(\frac{149}{39} \right) = 0.000941 \text{ cm/s}$$

Cuadro 14. Permeabilidad

TABLA DE CALCULO								
MUESTRA	sacada del parque							
PRUEBA	TIEMPO	h1	h2	Δh	AREA MENOR (a)	ALTURA (L)	AREA MAYOR (A)	PERMEABILIDAD
#	S	cm	cm	cm	cm ²	cm	cm ²	cm/s
1	129,45	140	40	100	0,385	10	81,07	2.02x10 ⁻⁴
2	134,53	140	40	100	0,385	10	81,07	1.94x10 ⁻⁴

Fuente. Los Autores.

a = area del tubo capilar
L= altura de la muestra
A= area de la muestra
t =tiempo.
h1 = altura inicial
h2= altura final

Cuadro 15. Datos Iniciales

DATOS INICIALES PARA EL CALCULO	
DIÁMETRO DEL TUBO	7 mm
DIÁMETRO DE MUESTRA	4 pulgadas
ALTURA DE LA MUESTRA	10 cm

Fuente. Los Autores.

2.17.1 Muestra Sacada del Parque

Cuadro 16. Muestras

PRUEBA 1	
ALTURA CADA 20 cm	TIEMPO
140	0
120	13'05"
100	30'72"
80	54'00"
60	1:24'20"
40	2:09'45"

Cuadro 16. (Continuación)

PRUEBA 2	
ALTURA CADA 10 cm	TIEMPO
140	0
130	6'75"
120	14'25"
110	22'49"
100	32'95"
90	42'89"
80	56'72"
70	1:10'80"
60	1:28'09"
50	1:48'26"
40	2:14'53"

Fuente. Los Autores.

2.18 MUESTRA INALTERADA EN SITU

2.18.1 Descripción. Limo orgánico de color negro, consistencia suelta, plasticidad media, húmeda, contiene raíces.

Cuadro 17. Datos Iniciales para el Ensayo de Granulometría

GRANULOMETRÍA	
PESO SECO INICIAL	1000
PESO SECO LAVADO SOBRE TAMIZ #200	780
PESO PASA TAMIZ # 200	220

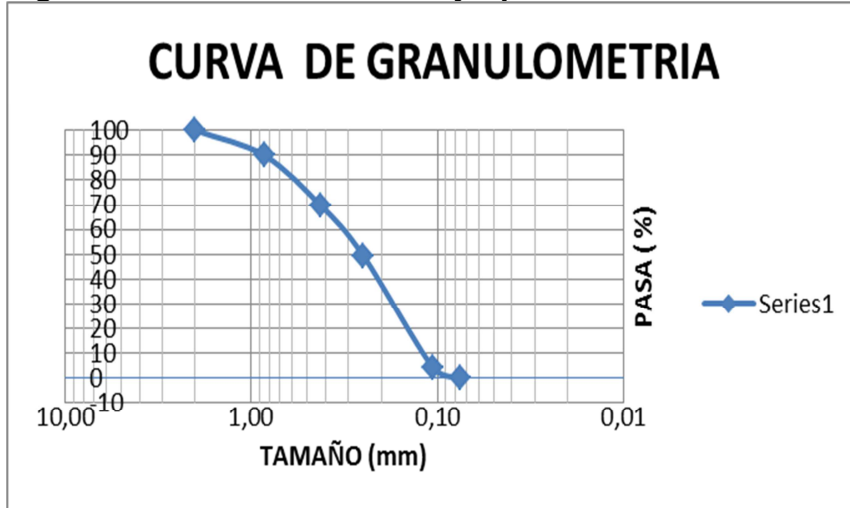
Fuente. Los Autores.

Cuadro 18. Cálculo del Material Lavado Sobre el Tamiz # 200 y Seco al Horno

TAMIZ	DIAMETRO	P- RETENIDO	RET- CORREG	RET	RET - ACUMUL	PASA
unidad	mm	g	G	%	%	%
10	2,00	0	0	0	0	100
20	0,85	78,32	78,51	10,07	10,07	89,93
40	0,425	156,21	156,59	20,08	30,14	69,86
60	0,25	159,11	159,50	20,45	50,59	49,41
140	0,106	349,62	350,48	44,93	95,52	4,48
200	0,075	31,58	31,66	4,06	99,58	0,42
fondo		3,25	3,26	0,42	100,00	0,00
lavado						100
total		778,09	780			

Fuente. Los Autores.

Figura 37. Curva del Porcentaje que Pasa Vs el Diámetro de las Partículas



Fuente: Propia de los autores.

Cuadro 19. Datos Obtenidos para el Cálculo del Contenido de Humedad del Material de Ensayo

CONTENIDO DE HUMEDAD	
RECIPIENTE No	7
PESO DE RECIPIENTE	45.58 g
PESO RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA	158.05 g
PESO RECIPIENTE + MUESTRA SECA	128.70 g
CONTENIDO DE HUMEDAD	35.3

Fuente. Los Autores.

Cuadro 20. Datos para el Cálculo del Peso Unitario de una Muestra Irregular

PESO UNITARIO		
PESO MUESTRA SIN PARAFINA	G	20,36
PESO MUESTRA+ PARAFINA	G	26,75
VOLUMEN INICIAL	MI	345,00
VOLUMEN FINAL	MI	370,00
VOLUMEN DESPLAZADO	cm ³	25,00
PESO UNITARIO PARAFINA	g/cm ³	0,92
PESO PARAFINA	G	6,39
VOLUMEN MUESTRA	cm ³	18,08
VOLUMEN PARAFINA	cm ³	6,92
PESO UNITARIO	g/cm ³	1,13

Fuente. Los Autores.

3. MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

Es importante realizar mantenimiento al tanque, para que el agua no se contamine y evitar la suciedad de las mangueras y el tubo capilar.

Al momento de terminar un ensayo, se debe hacer una buena limpieza de las piedras porosas y accesorios del equipo de permeabilidad, la válvula de salida y el cilindro acrílico para prolongar su vida útil y no alterar el resultado de cada ensayo. No se debe dejar material de muestras durante varios días, y a que con el pasar del tiempo el material y el agua dentro del cilindro cambia de color y comienza a generar un grado de deterioro tanto en la muestra como en el equipo.

4. CONCLUSIONES

- Se determinó la permeabilidad en 2 tipos de suelos diferentes, muestra alterada y una muestra inalterada con el fin de probar el equipo y las diferencias que hay entre los suelos a ensayar, dando como resultado que en las muestras inalteradas es más complejo hallar la permeabilidad del suelo, ya que por no ser tratada en el laboratorio, su proceso de saturación es más demorado y por omitir procesos de caracterización del material, este ensayo lleva más tiempo para su ejecución.
- El ensayo con una muestra alterada, caracterizada en el laboratorio es más fácil de trabajar y por ende sus resultados en el ensayo se pueden evaluar con más rapidez, en su proceso de saturación los resultados se pueden comparar con la tabla de Braja Das.
- A pesar de que el equipo se diseñó de cabeza variable el cual es el método para hallar el coeficiente de permeabilidad (k) en suelos finos, adicionalmente se realizaron ensayos con suelos de grano gruesos con los cuales se obtuvieron resultados óptimos.
- El modelo físico quedó instalado, probado y funcionando en el laboratorio de suelos para su adecuada utilización por la comunidad universitaria.

BIBLIOGRAFÍA

ALVA HURTADO, J.E. Un aparato para Realizar Ensayos de permeabilidad y de fractura hidráulica en el campo. En: Congreso Nacional de Ingeniería Civil. (5: 3-6 octubre: Chiclayo - Perú). Memorias del IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Colegio de Ingenieros del Perú, 1982. 125 p.

ALVA HURTADO. J. E. y CANCHAN F. Factores de Forma en Piezómetros. En: Congreso Nacional de Ingeniería Civil. (5: 3-6 octubre: Chiclayo - Perú). Memorias del IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Colegio de Ingenieros del Perú, 1986. 125 p.

AUVINET, Gabriel y ESQUIVEL, Raúl. Impermeabilización de lagunas artificiales. México: Limusa, 1986. 77 p.

BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería. México: Mc Graw-Hill, 1980. 816 p.

BRAJA M., Das. Fundamentos de ingeniería geotécnica. 4 ed. Barcelona: Cengage Learning, 2013. 325 p.

DAS, B. M. Advanced Soil Mechanics. New York: Mc Graw Hill, 1985. 385 p.

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA. Significado Cohesión [en línea]. Medellín: La Escuela [citado 4 julio, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/cohesiC3%B3n.htm>>

FOUNDATIONS ON EXPANSIVE SOILS. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. 2 ed. Amsterdam: Elsevier, 1975. 280 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio tesis y otros trabajos de grado. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: ICONTEC, 2008. 36 p.

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. Mecánica de Suelos, Instructivo para Ensayos de suelos, colección Brevarios del agua. México: El Instituto, 1990. 394 p.

JUÁREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelo, México: Limusa, 2005. 644 p.

MONTAÑEZ, Juan Carlos. Significado de Permeabilidad en cabeza variable [en línea]. Bogotá: Academia [citado 25 julio, 2014]. Disponible en Internet: <URL: http://www.academia.edu/4727189/Permeabilidad_cabeza_variable>

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Significado Permeabilidad [en línea]. Bogotá: La FAO [citado 7 julio, 2014]. Disponible en Internet: <URL: [//ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm](http://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm)>

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Significado Saturación [en línea]. Bogotá: La FAO [citado 14 julio, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s02.htm>>

ORTIGOSA. P. La Ingeniería Geotécnica en el control Ambiental. En: Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. (10: 29 octubre - 3 noviembre: Guadalajara – México). Memorias X Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1995. 110 p.

TERZAGHI, Karl y PECK, Ralph B. Mecánica de suelos. 2 ed. Barcelona: Ateneo, 1973. 174 p.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE. Suelos y sus propiedades [en línea]. Cunaba: La Universidad [citado 10 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/015454/015454_Cap3.pdf>

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA. Significado Permeámetros de Cabeza Variable [en línea]. Bogotá: La Universidad [citado 30 julio, 2014]. Disponible en Internet: <URL: http://www.umng.edu.co/documents/63968/74805/art5_1.pdf>

VILLON BEJAR, Maximo. Drenaje. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2006. 544 p.

WHITLOW, R. Fundamentos de Mecánica de Suelos. 3 ed. México: CECSA, 2000. 589 p.