

**ESTUDIO DE LA PERMEABILIDAD EN SUELOS ARENOSOS
CONTAMINADOS CON AGUAS ACEITOSAS EN UNA ESTRATIFICACIÓN DE
MEDIANTE UN MODELO FÍSICO A ESCALA REDUCIDA**

**KARINA YESENIA GÓMEZ CASTRO
DIEGO MAURICIO CAMELO ROMERO**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2014**

**ESTUDIO DE LA PERMEABILIDAD EN SUELOS ARENOSOS
CONTAMINADOS CON AGUAS ACEITOSAS EN UNA ESTRATIFICACIÓN DE
MEDIANTE UN MODELO FÍSICO A ESCALA REDUCIDA**

**KARINA YESENIA GÓMEZ CASTRO
DIEGO MAURICIO CAMELO ROMERO**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2014**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Director de Investigación
Ing. Álvaro Enrique Rodríguez Páez

Asesor Metodológico
Ing. Saieth Cháves Pabón

Jurado

Bogotá D.C., diciembre de 2014

*A mi familia: su apoyo fue incondicional
para poder llegar a culminar esta meta.
Dios los bendiga a todos.*

Karina Yesenia

A todos mis seres amados, pilares y baluartes de este logro: se los dedico con todo el corazón acompañado de un profundo sentimiento de gratitud.

Diego Mauricio

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Dios, Padre misericordioso, por haberles dado la sabiduría, acompañamiento a lo largo de toda la existencia.

Todos los docentes del programa de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia: por sus valiosas enseñanzas y continuo ejemplo.

Juan Carlos Ruge Cárdenas, Ingeniero Civil, y director de este trabajo de grado por su permanente acompañamiento, orientaciones y valioso consejos.

Sus compañeros de travesía: fue un gran honor compartir con ustedes este maravilloso periodo de formación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. GENERALIDADES	17
1.1 ANTECEDENTES	17
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2.1 Descripción del problema	17
1.2.2 Formulación del problema	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4 JUSTIFICACIÓN	18
1.5 LIMITACIÓN	19
1.5.1 Espacio	19
1.5.2 Tiempo	19
1.6 ALCANCE	19
1.6.1 Contenido	19
2. MARCO REFERENCIAL	20
2.1 MARCO HISTÓRICO	20
2.2 MARCO CONCEPTUAL	21
2.2.1 Características del flujo en los suelos	23
2.2.2 Carga hidráulica en un material permeable	24
2.2.3 Principales factores que influyen en la determinación de la permeabilidad	28
2.2.4 Métodos para la determinación del coeficiente de permeabilidad	31
2.3 MARCO TEÓRICO	32
3. ÁREA DE ESTUDIO	34
3.1 COMPORTAMIENTO DE MATERIALES GRANULARES	34
4. METODOLOGÍA	35
4.1 DISEÑO METODOLÓGICO	35
4.2 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	36
4.3 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	36
5. REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS UTILIZANDO EL PERMEÁMETRO DE CARGA CONSTANTE	37
5.1 ESQUEMA BÁSICO DE LA MUESTRA DE MATERIAL GRANULAR PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS	37
5.2 ESPECIFICACIONES GENERALES DEL LABORATORIO	38
5.3 PROCEDIMIENTO DEL LABORATORIO	38

	pág.
5.4 PRIMERA ETAPA DE ANÁLISIS	43
5.5 SEGUNDA ETAPA DE ANÁLISIS	43
6. RESULTADOS	44
6.1 DATOS GENERALIDADES	44
6.2 CÁLCULOS DE LA MUESTRA	44
6.3 RESULTADOS DE LABORATORIO	45
6.4 CONCLUSIÓN DEL ENSAYO DE LABORATORIO	48
7. CONCLUSIONES	50
8. RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXOS	54

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Lista de materiales	38
Tabla 2. Resultados de laboratorio	45
Tabla 3. Coeficientes relativos de permeabilidad	48

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Relaciones entre las Fases de un Suelo	21
Figura 2. Constitución de los Suelos-Porosidad	22
Figura 3. Flujo Laminar	23
Figura 4. Flujo Turbulento	24
Figura 5. Pérdidas de Carga Hidráulica	25
Figura 6. Estructura de los Suelos	29
Figura 7. Suelo saturado	29
Figura 8. Distancia del recorrido del flujo	30
Figura 9. Permeámetro de Carga Constante	31
Figura 10. Permeámetro de Cabeza Constante	33
Figura 11. Ciclo de Proceso de Investigación	35
Figura 12. Arena fina	37
Figura 13. Arena media	37
Figura 14. Arena gruesa de río	38
Figura 15. Lavado del material para eliminar los finos	39
Figura 16. Material granular Fino, medio y Grueso de río	39
Figura 17. Longitud y Área conocida	40
Figura 18. Material confinado	41
Figura 19. Cara Hidráulica	41
Figura 20. Volumen y Tiempo	42
Figura 21. Cabeza Hidráulica y Diferencia de Nivel	42

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Características de los contaminantes utilizados en las pruebas del laboratorio	54

GLOSARIO

ACPM (Aceite Combustible Para Motores): es el gasóleo extraído del petróleo. Se diferencia del biodiesel, que es el gasóleo extraído del aceite vegetal. Es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene por destilación fraccionada del petróleo entre 250 °C y 350 °C a presión atmosférica. El gasóleo es más sencillo de refinar que la gasolina y suele costar menos. Por el contrario, tiene mayores cantidades de compuestos minerales y de azufre.

ACEITE DE MOTOR: es todo aceite que se utiliza para lubricar los motores de combustión interna. Su propósito principal es lubricar las partes móviles reduciendo la fricción. Además de lubricar el aceite también limpia, inhibe la corrosión y reduce la temperatura del motor transmitiendo el calor lejos de las partes móviles para disiparlo. Los primeros aceites utilizados fueron los extraídos de grasas animales y vegetales. A medida que avanzó la técnica, y las exigencias de los motores, se empezaron a usar los compuestos químicos derivados del petróleo de mayor calidad y acorde con las necesidades industriales en ese momento. Estos aceites, que consisten principalmente en hidrocarburos y compuestos orgánicos de carbono e hidrógeno, son mezclados con diferentes compuestos químicos para mejorar sus cualidades. La tecnología actual, no obstante, los está dejando obsoletos y están siendo desplazados progresivamente por los aceites sintéticos formulados enteramente en laboratorio y con prestaciones muy superiores a los derivados del petróleo.

PERMEABILIDAD: es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

- La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos: la porosidad del material, la densidad del fluido considerado, afectada por su temperatura, la presión a que está sometido el fluido.

PERMEAMETRO: es un aparato que sirve para medir la permeabilidad de los materiales ante el paso de fluidos a través de ellos. Es un método directo de medir el coeficiente de permeabilidad.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD: es una característica de los suelos, específicamente está ligado a la Ley de Darcy que se refiere al flujo de fluidos a través de los suelos. El coeficiente de permeabilidad, generalmente representado por la letra k , es extremadamente variable, según el tipo de suelo.

\vec{v} (cm/seg) = K.i y la ecuación de continuidad $Q = \vec{v} \cdot A$

$\Rightarrow \frac{V}{t} = k.A.i$ reemplazando $i = \frac{h}{L}$ despejando k

$$k = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot h}$$

CARGA CONSTANTE: método, aplicable principalmente para suelos granulares, se mide el caudal de agua que atraviesa una muestra de suelo saturada colocada en un dispositivo llamado permeámetro. El volumen de agua se mide manteniendo el nivel de agua constante en un tubo alimentador conectado al aparato. Las pruebas se hacen sobre una muestra alterada, lo que puede ser un inconveniente para transportar los resultados a suelos naturales.

CONTAMINACIÓN: es la introducción de sustancias en un medio que provocan que este sea inseguro o no apto para su uso. El medio puede ser un ecosistema, un medio físico o un ser vivo. El contaminante puede ser una sustancia química, energía (como sonido, calor, luz o radiactividad).

- Es siempre una alteración negativa del estado natural del medio, y por lo general, se genera como consecuencia de la actividad humana considerándose una forma de impacto ambiental.
- La contaminación puede clasificarse según el tipo de fuente de donde proviene, o por la forma de contaminante que emite o medio que contamina. Existen muchos agentes contaminantes entre ellos las sustancias químicas (como plaguicidas, cianuro, herbicidas y otros.), los residuos urbanos, el petróleo, o las radiaciones ionizantes. Todos estos pueden producir enfermedades, daños en los ecosistemas o el medioambiente. Además existen muchos contaminantes gaseosos que juegan un papel importante en diferentes fenómenos atmosféricos, como la generación de lluvia ácida, el debilitamiento de la capa de ozono, y el cambio climático.

LEY DE DARCY: describe, con base en experimentos de laboratorio, las características del movimiento del agua a través de un medio poroso.

FLUIDO: se entiende por fluido todo cuerpo cuyas moléculas tienen entre sí poca coherencia y toma siempre la forma del recipiente donde está contenido.

GRADIENTE HIDRÁULICO: se define como la pérdida de energía experimentada por una unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o

cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua.

GASOLINA: es una mezcla de hidrocarburos alifáticos obtenida del petróleo por destilación fraccionada, que se utiliza como combustible en motores de combustión interna con encendido por chispa convencional o por compresión (DiesOtto), así como en estufas, lámparas, limpieza con solventes y otras aplicaciones.

- Tiene una densidad de 760 g/L. un litro de gasolina proporciona, al arder, una energía de 34,78 megajulios, aproximadamente un 10 % menos que el gasoil, que proporciona 38,65 megajulios.

POROSIDAD: la porosidad o fracción de huecos es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total, entre 0-1, o como un porcentaje entre 0-100%. El término se utiliza en varios campos, incluyendo farmacia, cerámica, metalurgia, materiales, fabricación, ciencias de la tierra, mecánica de suelos e ingeniería.

PRESIÓN: la presión es una magnitud física que mide como la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, y sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una línea. En el Sistema Internacional la presión se mide en una unidad derivada que se denomina pascal (Pa) que es equivalente a una fuerza total de un newton actuando uniformemente en un metro cuadrado. En el Sistema Inglés la presión se mide en libra por pulgada cuadrada (pound per square inch o psi) que es equivalente a una fuerza total de una libra actuando en una pulgada cuadrada.

INTRODUCCIÓN

La estructura natural del suelo y su composición es fundamental en el estudio de la mecánica de suelos que hace parte de una de las ramas Ingeniería Civil, que se ve reflejado en la importancia del conocimiento, brindando grandes aportes a los problemas estructurales, fallas constructivas y contaminación del mismo suelo, que atribuyen al juicio insipiente de las condiciones del terreno; la construcción de obras civiles, requiere de diferentes herramientas que permitan acercar al ingeniero a un propiedad más real y exacto del suelo, por eso la necesidad de la búsqueda de la información precisa por medio de la investigación del comportamiento del suelo, y en base a las indagaciones encontramos que el problema como lo es la permeabilidad de los suelos, identificando su peripecia e impacto para estudios de erosión, mineralogía entre otras muchas aplicaciones.

En el campo de la ingeniería, hay una evolución de las ciencias ocasionada por los avances tecnológicos que contribuyen a la formación de profesionales competitivos que aporten de manera confiable y significativa su conocimiento a esta disciplina.

Este proyecto brinda una herramienta académica e investigativa para la Universidad Católica de Colombia, con el estudio de permeabilidad en suelos granulares contaminados con diferentes aguas aceitosas, para ello se hizo indispensable profundizar en criterios y lineamientos dados por el director de proyecto generando como resultado la obtención numérica del coeficiente de permeabilidad en suelos granulares contaminados con diferentes aguas aceitosas.

Con base en los conocimientos adquiridos durante la formación académica, a la investigación propia y a los valiosos aportes de profesionales versados en el tema, que contribuyeron a que este proyecto fuera una realidad.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La conductividad hidráulica saturada en campo, es una propiedad determinante en la descripción de los procesos de filtración y redistribución de agua en el suelo, motivo por el cual la utilización del permeámetro es esencial para el conocimiento, análisis y establecer el grado de permeabilidad y resistencia en laboratorio para los materiales granulares. En la actualidad el ensayo de permeabilidad de cabeza constante se desarrolla a través del permeámetro carga constante, que permitan dar valores de las propiedades del suelo y definir el coeficiente de permeabilidad, por lo que es importante disponer de un instrumento que nos ayuda a analizar el grado de permeabilidad en los suelos, es decir la fluidez del agua través de los poros, de los diferentes materiales granulares.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Descripción del problema. Teniendo en cuenta la poca bibliografía encontrada acerca de la permeabilidad en suelos granulares contaminados, se hace necesario para los futuros laboratorios de suelos tener estadísticas y resultados con los cuales se puedan comparar los diferentes ensayos, para estos se busca dejar resultados confiables de permeabilidad en suelos contaminados con diferentes aguas aceitosas como son: gasolina, ACPM y aceite de motor de carro cuyas características se conocen.

El laboratorio de suelos de la universidad Católica de Colombia actualmente cuenta con un permeámetro de carga constante utilizado para estudios de permeabilidad, el cual será utilizado para el estudio de permeabilidad en suelos granulares contaminados.

1.2.2 Formulación del problema. ¿Por qué es importante determinar la permeabilidad del suelo?

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 ingeniería civil.

Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. Algunos suelos son tan permeables y la filtración tan intensa que para construir en ellos cualquier tipo de estructura es preciso aplicar técnicas de construcción especiales.

¿Qué aplicación tienen los ensayos de permeabilidad para los profesionales de ingeniería civil?

Las principales estructuras como la vías, las estructuras hidráulicas de captación y las estructuras de fundación, tiene relación directa con la permeabilidad del suelo, dando importancia al análisis de las propiedades físicas del suelo, por medio de ensayos que nos permiten obtener resultados confiables para tomar decisiones en el diseño, evaluación y construcción de un proyectos

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Obtener resultados numéricos del coeficiente de permeabilidad en suelos arenosos contaminados con diferentes aguas aceitosas, mediante experimentos del laboratorio en el permeámetro de carga constante existente en la Universidad Católica de Colombia.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Satisfacer la necesidad de resultados de coeficiente de permeabilidad de un suelo granular contaminado según normatividad vigente **INV E — 130 — 07**.¹
- Contribuir con el desarrollo de la ciencia aplicada en beneficio de la universidad y de los estudiantes faculta de ingenierías del programa de ingeniería civil.
- Aplicar los conocimientos adquiridos durante el programa de ingeniería civil.
- Fomentar el espíritu investigativo en los estudiantes de la faculta de ingenierías del programa de ingeniería civil.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El trabajo de investigación está enfocado en el estudio de la permeabilidad en suelos contaminados con aguas aceitosas, mediante un modelo a escala utilizando el permeámetro de carga constante, los resultados ayudaran a los futuros ingenieros, a tener puntos de comparación para la realización de diferentes ensayos de permeabilidad en diferentes suelos y contaminantes; de esta manera brindar un apoyo académico mediante las prácticas, para dar una profundización en el proceso del aprendizaje teórico y práctico.

Teniendo en cuenta la escasa bibliografía encontrada acerca de la permeabilidad de suelos granulares contaminados, se decidió realizar ensayos con diferentes

¹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante): I.N.V. E — 130 — 07. [En línea]. Disponible en Internet: ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-130-07.pdf>. [Citado: 29, mar., 2014].

contaminantes en suelos granulares, aplicando la teoría obtenida durante el transcurso de la carrera.

La importancia que tienen el estudio de suelos en las diferentes ramas de la ingeniería civil como la mecánica de suelos; la permeabilidad cumple un factor importante y trascendental en dichos estudios, por eso la idea de realizar laboratorios los cuales nos den una idea clara de cuál es la variación de la permeabilidad con diferentes contaminantes, buscado profundizar la teoría con lo práctico en el proceso de aprendizaje, brindado a los futuros ingenieros datos base de comparación.

1.5 LIMITACIÓN

1.5.1 Espacio. Los ensayo de laboratorio de permeabilidad de cabeza constante de suelos granulares se realizaron en el laboratorio de suelo de la universidad católica de Colombia

1.5.2 Tiempo. La actividad se realizó durante el periodo académico.

1.6 Alcance. Este proyecto representa para la universidad, resultados confiables de la permeabilidad en suelos granulares contaminados con aguas aceitosas.

1.6.1 Contenido. El estudio comprenderá las actividades indicadas a continuación:

- Realización de ensayos de laboratorio.
- Análisis de resultados.
- Informe final, conclusiones y recomendaciones.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO HISTÓRICO

En la historia, para el hombre, el suelo es el material de construcción más antiguo y uno de los más complejos objetos de estudio de la ingeniería. A través del tiempo, se ha considerado al suelo como el elemento más importante de construcción fundamentándose en dos razones: la primera refiere al suelo como principal componente en la extracción de materia prima para la elaboración de los materiales y herramientas de construcción; la segunda habla del suelo como la base de toda edificación, el cual contiene una variedad enorme de características y propiedades físicas, variables en el tiempo y en el espacio que deben ser analizadas para garantizar la estabilidad del mismo y de su estructura.

Alva Hurtado afirma: “en la antigüedad las construcciones se realizaban con base en la experiencia del constructor sin ser conscientes que las condiciones del terreno debían ser consideradas para que sus edificaciones no se asentaran”.² En las construcciones antiguas, se originaba gran número de accidentes, ocasionados por los deslizamientos de la tierra y las fallas en las fundaciones; sin embargo, no fue sino hasta comienzos del siglo XX que se iniciaron los estudios que permitieron investigar más a fondo sus propiedades, variedades y características de los suelos.

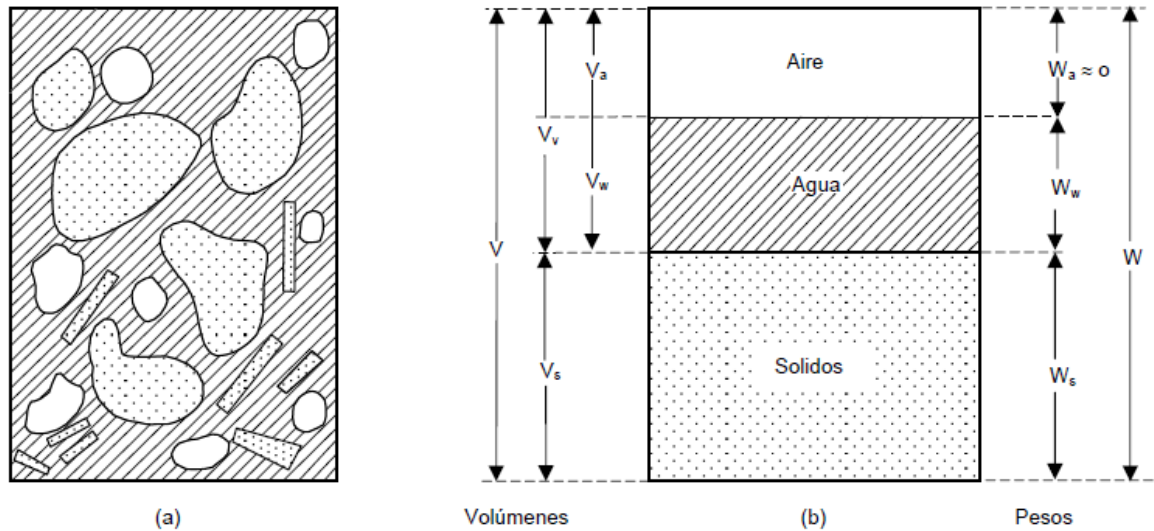
La necesidad de entender, analizar e investigar su comportamiento, se generó la dogmatismo de la mecánica de suelos y la geología aplicada a las estructuras, las cuales fueron introducidas como disciplinas esenciales en la ingeniería civil gracias a los aportes de Karl Terzaghi, quien dedico todos sus esfuerzos a la investigación en temas de suelos y cimentaciones dejando como legado numerosas contribuciones que aún permanecen como base de muchos elementos en la ingeniería civil. También debemos reconocer la participación de grandes figuras que con sus teorías formaron bases para el crecimiento de la ingeniería de suelos, pues bien, Terzaghi es el padre de la mecánica de suelos pero muchas de sus investigaciones se basaron en la de personajes como Henry Darcy (1856) Ingeniero que estuvo a cargo del estudio de la red de abastecimiento de la ciudad francesa de Dijon, donde realizo una investigación con filtros de arena para purificación de aguas subterráneas y presento un informe sobre el comportamiento del fluido a través de los materiales arenosos, el cual se ha tomado como base de todos los estudios realizados posteriormente para tratar el tema de la permeabilidad en los suelos, incluyendo los del presente trabajo.

² ALVA HURTADO, Jorge E. Terzaghi y la mecánica de suelos. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo31_a.pdf>. [Citado: 20, marzo de 2014].

2.2 MARCO CONCEPTUAL

Los suelos pueden ser definidos técnicamente como la capa superficial de la corteza terrestre, que resulta de la descomposición de las rocas por los cambios bruscos de temperatura, por la acción del agua y del viento; los suelos pueden ser objeto de estudio dependiendo del campo de acción al que se esté enfrentando, en la ingeniería se hace uso de esta palabra para referirse a la parte del suelo compuesta por material mineral, inorgánico, las cuales son empleadas en todo tipo de construcción que a su vez son la base de cualquier estructura.

Figura 1. Relaciones entre las fases de un suelo.

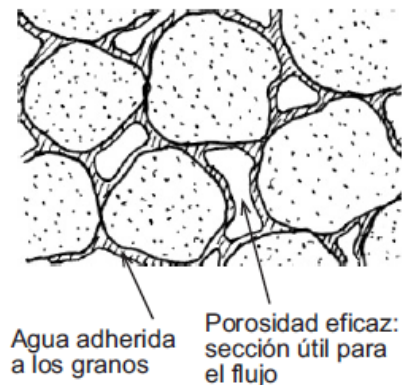


a) Suelo natural, b) División en fases.

Fuente: ALVA HURTADO, Jorge E. Diseño de cimentaciones. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.jorgealvahurtado.com/files/DisenoCimentacionesAlva.pdf>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

El suelo y las rocas son cuerpos naturales no consolidados, es decir, no son sólidos ideales, su constitución es fundamentada por la existencia de partículas sólidas de diferente naturaleza con presencia de vacíos o medios porosos que se distribuye de forma continua y tortuosa, y lo componen tres fases bien diferenciadas: sólida, líquida y gaseosa, estos medios porosos son ocupados por gases que se manifiestan como aire o vapor de agua y fluidos (agua), que se describe como la capacidad de un suelo para retener y dejar pasar el agua, y el aire, esta relación se conoce como porosidad: valor que indica el porcentaje de vacíos que presenta un material en una sección definida, característica que a su vez condiciona la permeabilidad de los suelos.

Figura 2. Constitución de los suelos-porosidad.



Fuente: SÁNCHEZ SAN ROMÁN, Javier. Ley de Darcy: conductividad hidráulica. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://web.usal.es/javisa/hidr>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

En la Figura 2 se muestra claramente cómo se acomodan las partículas en un material y a su vez la formación de vacíos que se generan entre los mismos; la capa delgada de agua adherida a las partículas constituye cierta cantidad de agua inmóvil que no va a circular por los poros, así que la parte de la sección usada por el flujo es lo que llamamos porosidad eficaz.

El diseño de cimientos sobre suelos granulares estará gobernado por un criterio de asentamiento, es decir, no por la resistencia al cortante a la alta permeabilidad de las arenas y gravas, la mayor parte del asentamiento se efectuará durante el proceso de construcción y estará casi completo al final de éste. Es probable que los efectos de deformación plástica sean despreciables, excepto en el caso de cimientos muy anchos sobre suelos variables, o donde se tengan mezclas de arena o grava con limo. Otros problemas de asentamientos pos construcción pueden relacionarse con compactación inducida por vibración, cambios rápidos en el nivel freático o efectos de sismos. También es virtualmente imposible obtener muestras no alteradas de suelos granulares y las muestras recompactadas en general no repiten, con confiabilidad alguna, las condiciones y propiedades en el campo. Para determinar las características de compresibilidad de los suelos granulares se realizan las siguientes pruebas de campo: a) Prueba de placa con carga. b) Prueba normal de penetración. c) Prueba del cono de penetración. d) Prueba del medidor de presión. En suelos de alta permeabilidad se pueden presentar rápidos cambios en el nivel del agua subterránea con los efectos consecuentes sobre la densidad del suelo y las presiones de poro. Los cálculos de capacidad de carga se deben efectuar en términos del esfuerzo efectivo, donde se elimina el término de cohesión y donde el ángulo de resistencia al corte en términos de esfuerzo efectivo (ϕ') con valores entre moderados y altos, la capacidad de carga se reduce en forma sustancial, cuando el nivel freático está situado entre la zona que se extiende desde su superficie hasta una profundidad "B" por debajo de la cimentación. Se define a la resistencia al corte, o resistencia

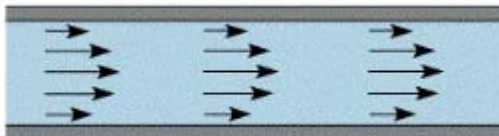
al esfuerzo cortante de un suelo como el valor máximo, o límite de la resistencia al corte que se puede inducir dentro de su masa antes de que ceda bajo ciertas condiciones, la flexibilidad conducirá a la formación de una superficie de deslizamiento por corte, sobre la cual puede tener lugar una cantidad apreciable de movimiento de deslizamiento, por ejemplo, avalanchas, rotación de taludes o fallas en excavaciones, la evaluación de los parámetros de la resistencia al corte es parte necesaria de los procedimientos analíticos y de diseño relacionados con cimientos, muros de retención y pendientes de terreno. En esencia, la resistencia al corte en el seno de una masa sólida se debe al desarrollo de la resistencia a la fricción entre partículas adyacentes, de modo que los análisis se basan principalmente en el modelo de fricción. La palabra cohesión puede dar una idea errónea y con frecuencia se entiende mal, la opinión anterior acerca de la naturaleza de esta fuerza aparente que sujeta a los granos de suelo entre sí, se basaba en la adhesión entre las partículas como consecuencia de las condiciones electrostáticas de las superficies de los minerales arcillosos.

2.2.1 Características del flujo en los suelos.

- Flujo laminar y turbulento. El movimiento del agua se presenta en dos estados característicos, principalmente por su velocidad, presión, temperatura y viscosidad entre otros, estos se puede describir como régimen flujo laminar y flujo turbulento.

Se denomina flujo laminar cuando las partículas de agua se mueven en direcciones paralelas formando líneas rectas, sin que el fluido se mezcle, es decir que permanezca con movimiento continuo formando una lámina de agua

Figura 3. Flujo laminar.

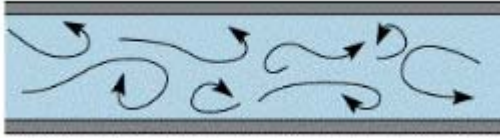


Fuente: INGESPOTS. Flujo laminar. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://ingesports.files.wordpress.com/2012/12/flujo-laminar-y-turbulento.gif?w=462&h=351>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

En la Figura 3 se describe como es el flujo laminar, con movimiento uniforme.

Se denomina movimiento turbulento cuando las partículas se mueven en todas las direcciones, es decir cuando el vector de agua no es lineal sino presenta movimiento discontinuos y el fluido se mezcla.

Figura 4. Flujo turbulento.



Fuente: INGESPORTS. Flujo turbulento. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://ingesports.files.wordpress.com/2012/12/flujo-laminar-y-turbulento.gif?w=462&h=351>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

En la Figura 4 se muestra cuando flujo turbulento, con movimiento discontinuos.

Los diferentes regímenes de flujo (Laminar y turbulento) y la asignación de valores numéricos de cada uno, fueron reportados por primera vez por OSBORNE REYNOLDS en 1883. Reynolds observó que a velocidades bajas en el flujo es laminar y mientras esta condición va aumentando llega a un límite donde se vuelve turbulento, el número de Reynolds es un número adimensional que relaciona las propiedades físicas del fluido, su velocidad y la geometría. Cuando se trata del comportamiento natural del flujo a través de materiales porosos se dice que este es de tipo laminar aun cuando su recorrido no es totalmente lineal debido a que la velocidad real no supera el límite como para convertirse en turbulento.

$$R = \frac{0,6 \cdot v \cdot D_s \cdot \rho}{\eta(1-n)}$$

Donde:

v = velocidad de flujo

DS = diámetro de la partícula cuya superficie específica es igual a la del conjunto

ρ = densidad del fluido

η = coeficiente de viscosidad del fluido.

2.2.2 Carga hidráulica en un material permeable. La carga hidráulica o altura piezométrica es la medida de presión expresada en unidades de longitud con la que se eleva un líquido a partir de la altura que alcanza un fluido en un tubo piezométrico ocasionado por la presión y la velocidad del mismo.

- Ecuación de Bernoulli. La denominada ecuación o teorema de Bernoulli representa el principio de conservación de la energía mecánica aplicado al caso

de una corriente fluida ideal, es decir, con un fluido sin viscosidad (y sin conductividad térmica).

La ecuación de Bernoulli en la mecánica de fluido se describe como la carga total en un punto en agua en movimiento y se da como la suma de las cargas de presión, velocidad y elevación, es decir, en cualquier punto del flujo la altura piezométrica equivale a la elevación z del punto respecto a un nivel de referencia, más la carga hidráulica por velocidad y por presión.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z$$

↑ ↑ ↑
Carga de Carga de Carga de
presión velocidad elevación

(1)

Donde:

h = Carga hidráulica

Z = Elevación en el punto respecto a un nivel de referencia (m)

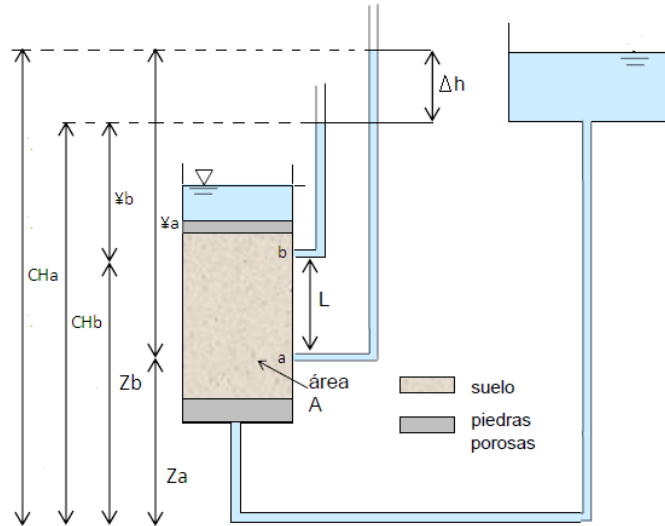
$V^2/2g$ = carga hidráulica por velocidad (m)

u / γ = carga hidráulica por presión (m)

u = presión del agua (KN/m²)

γ = Peso específico del agua (KN/m³)

Figura 5. Pérdidas de carga hidráulica.



Fuente: ANGELONE, S., GARIBAY, T. y CAHUAPÉ, M. Geología y geotecnia: permeabilidad en suelos. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad20enSuelos.pdf>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

Cuando el flujo pasa a través del suelo tiene una pérdida de energía por fricción, una caída en la altura de la línea piezométrica tal como se muestra en la Figura 5. Los puntos a y b representan dos diferentes alturas dentro de una muestra de suelo y en cada uno de ellos se ha colocado un tubo piezométrico para medir la carga hidráulica en dichos puntos.

La diferencia de alturas en los puntos representa la pérdida de energía que manifiesta el flujo a través del suelo en una distancia L.

- Gradiente de energía. Representan la variación de la energía hidráulica por unidad de peso con relación a la longitud real del conducto.
- Gradiente hidráulico o gradiente de energía o de alturas totales ($I = S_f$), que es la variación de la energía total respecto a la longitud real del conducto, o sea, la pérdida por fricción por unidad de longitud real del conducto en un tramo recto.

$$S_f = I = \frac{h_f}{L} \quad (2)$$

Donde

h_f = pérdidas por fricción
 L = longitud real del tramo

El gradiente hidráulico siempre será positivo en sentido del flujo porque $H_1 > H_2$ al existir siempre una pérdida de energía.

➤ Gradiente piezométrico (GP), representa la variación de la línea piezométrica con respecto a la longitud real del conducto en un tramo recto.

$$GP = \frac{Z_1 + p_1/\gamma - Z_2 + p_2/\gamma}{L} \quad (3)$$

Los gradientes hidráulicos y piezométricos son iguales cuando el flujo es uniforme. Pueden ser positivos o negativos en el sentido del flujo considerando que el término $Z + P/\gamma$, puede aumentar o disminuir en el sentido del flujo.

Usualmente el gradiente piezométrico es positivo porque la presión va disminuyendo en el sentido del flujo, pero como se dijo anteriormente, en una ampliación del conducto la presión aumenta y en consecuencia el gradiente piezométrico será negativo.

- Ley de Darcy. En 1856 Henri Philibert Gaspard Darcy publicó la ecuación para la velocidad de descarga del agua a través de suelos saturados, y se basa principalmente, en el flujo de agua a través de arenas limpias, también definió que la velocidad V de un flujo laminar dentro de un medio poroso es proporcional al gradiente hidráulico i y al coeficiente de permeabilidad k , expresados por la siguiente ecuación:

$$V = k * i \quad (4)$$

Donde

v = Velocidad de descarga, que es la cantidad de agua que fluyen a través de una sección transversal total unitaria de suelo perpendicular a la dirección del flujo

k = coeficiente de permeabilidad

Considerando la ecuación de continuidad

$$Q = V * A \quad (5)$$

Donde:

Q= Caudal (cm³/s)
V= Velocidad (cm/s)
A= Área de la sección (cm²)

Si reemplazamos la velocidad de Darcy, definimos el gasto como:

$$Q = K * i * A \quad Q = K * \frac{\Delta h}{\Delta L} * A \quad (6)$$

Como el caudal esta dado en L³/t, el área en L² y el gradiente hidráulico es adimensional, se comprueba que las unidades del coeficiente de permeabilidad K son correspondientes a las de una velocidad (L/t), esto nos da razón para definir el coeficiente de permeabilidad de un suelo como la velocidad que tiene un fluido al pasar a través del mismo cuando está sujeto a un gradiente hidráulico; esta constante, a su vez depende de diversas propiedades físicas de los suelos y algunos factores determinantes como la relación de vacíos y temperatura, entre otros.

K el coeficiente de permeabilidad de Darcy.

Q=Volumen/tiempo

$$K = \frac{Q * \Delta L}{\Delta h * A} \quad (7)$$

2.2.3 Principales factores que influyen en la determinación de la permeabilidad.

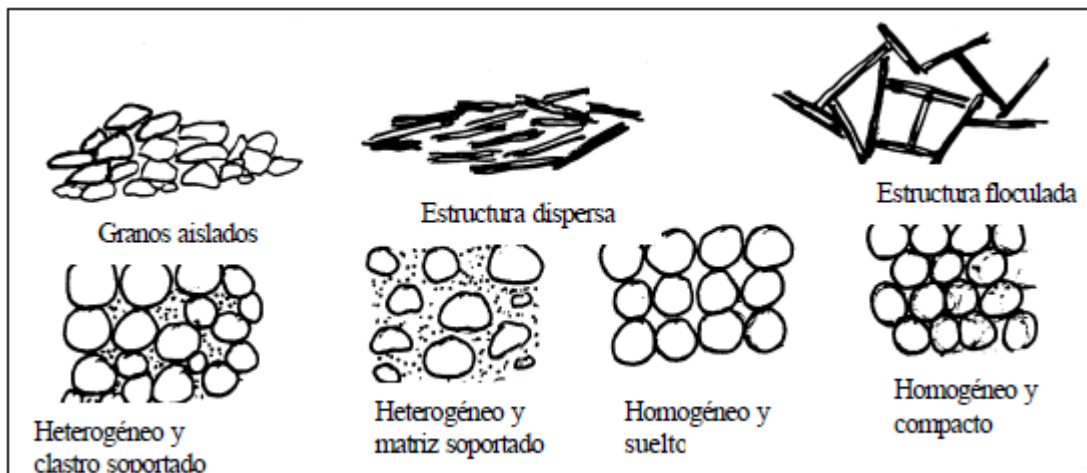
- Relación de vacíos. El suelo es un material constituido por partículas sólidas rodeado por espacios libres (vacíos), en general ocupados por agua y aire, la muestra del suelo compactado, el volumen que ocupan las partículas sólidas permanece prácticamente sin ningún tipo de variación, por el contrario el volumen de vacíos se reduce haciendo más difícil el paso del agua a través del material. El porcentaje de vacíos en una sección definida con relación al porcentaje de sólidos, equivale a la sección real por donde pasaría el fluido. Teniendo en cuenta la ecuación de continuidad a mayor área, mayor será el volumen de agua que pasa por una unidad de tiempo.
- Temperatura. La viscosidad del fluido está directamente relacionada con Temperatura, dado que a mayor temperatura la viscosidad disminuye y este se mueve con más facilidad, esta propiedad a su vez condiciona la velocidad del mismo al momento de hacer contacto con las partículas. Para ensayos de

permeabilidad en aguas subterráneas esta propiedad es despreciable ya que las variaciones de viscosidad en el agua con respecto a la temperatura son mínimas.

- Estructura y estratificación. Un suelo inalterado presenta permeabilidad diferente al de un suelo que ha sido alterado aun cuando su relación de vacíos es la misma, esto puede ser debido a los cambios de su estructura y estratificación, pues no es lo mismo determinar la permeabilidad de una muestra de suelo inalterada que presenta diferentes tipos de rocas y tamaños de sus partículas a tener una arena lavada con una granulometría definida.

Como la mayoría de los suelos en su estado natural se encuentran estratificados como se muestra en la Figura No. 6 (Estructura de los suelos), se hace obvio que una masa de suelo con estas características presente una permeabilidad diferente debido a la composición de sus estratos; por lo tanto se hace necesario determinar la permeabilidad de cada uno de sus estratos y con ellos medir la permeabilidad equivalente de toda la muestra.

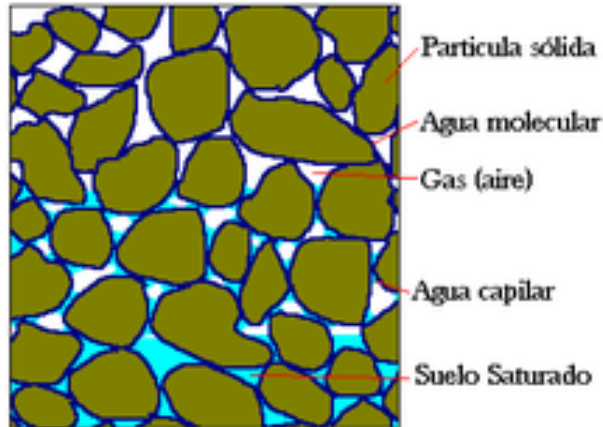
Figura 6. Estructura de los suelos.



ALVA HURTADO, Jorge E. Diseño de cimentaciones. [En línea]. Disponible en Internet: <http://www.jorgealvahurtado.com/files/DisenoCimentacionesAlva.pdf>. [Citado: 20, marzo de 2014].

- Grado de saturación. El grado de saturación de los suelos es directamente proporcional a la permeabilidad del mismo, cuando este aumenta, el coeficiente K también aumenta. Es difícil determinar la conductividad hidráulica si no se considera la continuidad del flujo a través del medio, para garantizar esto los ensayos de laboratorio se hacen sobre una muestra saturada, esto a su vez demuestra que dichas pruebas se hacen en las condiciones más desfavorables que puede presentar un suelo permeable.

Figura 7. Suelo saturado.



Fuente: WIKIMEDIA. Suelo saturado. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agua_en_el_suelo.PNG>. [Citado: 20, marzo de 2014].

- Velocidad de Darcy y velocidad real. En cualquier conducto donde circula un fluido se cumple que el caudal es igual a la velocidad por la sección del conducto, si aplicamos esta consideración a un cilindro de muestra para ensayos de laboratorio como los de Darcy y despejamos la velocidad obtenemos lo que se llama la velocidad de Darcy.

$$Q = A * V \quad \rightarrow \quad V_{darcy} = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

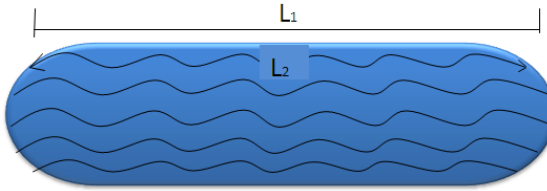
Esta velocidad no es real dado que el área por donde circula el flujo no es la totalidad de la sección del conducto sino un porcentaje de esta la cual se define como porosidad eficaz. Si una sección tiene una porosidad del 10 % quiere decir que el agua circula por el 10 % del total de la sección y para que el mismo caudal circule por una sección 10 veces menor, se necesita una velocidad 10 veces mayor, en razón a esto se define una nueva velocidad expresada de la siguiente manera:

$$Velocidad\ lineal\ media = \frac{V_{darcy}}{Pe} \quad (9)$$

Donde: Pe = es la porosidad eficaz.

Se denomina velocidad lineal medida porque su valor se toma como si el fluido pasara por el material de forma continua, es decir, si su recorrido fuera totalmente lineal.

Figura 8. Distancia del recorrido del flujo.



Fuente: Autores.

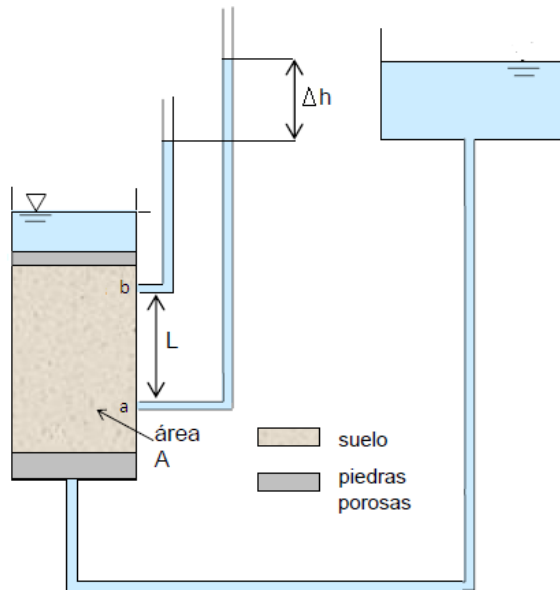
El recorrido del flujo por un medio poroso, no lineal donde se presenta una serie de desviaciones. Si se recorre la muestra a través de la sección porosa, es notable que el tiempo de recorrido va a ser mayor sobre la longitud L2 desconocida que sobre la longitud lineal L1, por lo tanto la velocidad real sería mayor dado que esta depende directamente de la longitud y el tiempo, por lo que se debe calcular una velocidad Real multiplicando la velocidad lineal medida por un factor que varía entre 1,0 y 1,2 en materiales granulares como se muestra en la a (Figura – 7)

$$\mathbf{Vel\ Real = Velocidad\ lineal\ medida * factor} \quad (10)$$

2.2.4 Métodos para la determinación del coeficiente de permeabilidad. Existen varios procedimientos para determinar el coeficiente de permeabilidad del suelo, métodos directos que se basan en pruebas con utilización de instrumentos de laboratorio (Permeámetros) y otros indirectos, proporcionados por pruebas técnicas como la de la curva granulométrica.

- Método de carga constante. El ensayo de carga constante, se usa para determinar coeficientes de permeabilidad de los suelos granulares, tales como arenas finas, medias y gruesas; constituyendo uno de los métodos más usados por los laboratorios actuales, donde se utiliza un equipo con características muy similares al que uso Darcy en sus experimentos con filtros de arena, el cual recibe el nombre de permeámetro de carga constante.

Figura 9. Permeámetro de carga constante.



Fuente: ANGELONE, S., GARIBAY, T. y CAHUAPÉ, M. Geología y geotecnia: permeabilidad en suelos. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad20enSuelos.pdf>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

La muestra de suelo se introduce en un cilindro de acrílico de sección conocida con piedras porosas por encima y por debajo. En la pared lateral existen varios puntos de conexión de manómetros para tomar diferentes lecturas de la carga de presión, circular agua conectando a uno de sus extremos un tanque diseñado para mantener una carga constante; en el otro extremo se mide el volumen de agua de salida en un recipiente, como se muestra en la Figura 8.

La presencia de aire en el sistema puede afectar mucho los resultados, por lo que se recomienda desairar el sistema en la medida posible. El ensayo se hace sobre una muestra saturada previamente durante 48 horas; se deja que el agua circule hasta que el sistema se estabilice, esto, hasta que los niveles de los tubos piezométricos sean constantes. Una vez que se ha alcanzado el estado estable, se mide la cantidad de agua que fluye en un tiempo determinado, se registran las lecturas de las alturas piezométricas y se determina la diferencia de alturas. Se debe efectuar varias pruebas a diferentes tiempos para hallar un K promedio mediante las ecuaciones de Darcy.

2.3 MARCO TEÓRICO

La Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil está encaminada a implementar el espíritu investigativo y de la ciencia en una sociedad; donde la producción de conocimiento se generan,

especialmente, en las instituciones de educación superior; con el ánimo de formar profesionales altamente calificados que den respuesta a los desafíos; para lograr esto es necesario enfrentarse a las barreras más comunes que presentan las instituciones latinoamericanas: las insuficiencias tecnológicas y la falta de ganas para investigar.

Se ha llegado a la conclusión de realizar los laboratorios necesarios con el objetivo de dejar resultados confiables y de obtener conclusiones acerca de la permeabilidad en suelos granulares en presencia de diferentes contaminantes como los son: gasolina, ACPM y aceite de carro, los resultados obtenidos quedaran como punto de comparación para realizar otros ensayos del laboratorio aumentando el conocimiento de los estudiantes que optan por el título de Ingenieros Civiles.

Los ensayos del laboratorio tuvieron lugar dentro de los laboratorios de suelos de la Universidad Católica de Colombia, donde se encontró el permeámetro de carga constante, que puede medir el coeficiente de permeabilidad.

Figura 10. Permeámetro de cabeza constante.



Fuente: Autores.

Este método de ensayo de permeabilidad, describe el procedimiento para determinar el coeficiente de permeabilidad mediante carga constante para flujo laminar de agua a través de suelos granulares finos (pasa tamiz No 40, retenida en tamiz No 200), suelos granulares medios (pasa tamiz No 10, retenida en tamiz No 40), suelos granulares gruesos (pasa tamiz No 4, retenida en tamiz No 10).

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1 COMPORTAMIENTO DE MATERIALES GRANULARES

La elaboración de un modelo físico a escala reducida para la medición en el laboratorio de la permeabilidad en suelos granulares, se realiza de acuerdo a la norma INV E-130-07, y tiene como finalidad realizar ensayos de para determinar el coeficiente de permeabilidad (k) en suelos granulares contaminados, atreves de un flujo laminar de agua. El procedimiento está destinado a establecer valores representativos del coeficiente de permeabilidad de suelos a estudiar.

4. METODOLOGÍA

El tipo de investigación se elaboró mediante la recolección de información y el análisis, con el propósito de que contribuyan al conocimiento y permitan el adecuado cumplimiento de los objetivos, utilizando la siguiente metodología.

- Recopilación de información de los laboratorios existentes en la universidad Católica de Colombia, mediante el Equipo de Permeabilidad de carga constante, el laboratorio cumplirá las exigencias de las normas INV E — 130 — 07.

4.1 DISEÑO METODOLÓGICO

El proyecto se elaboró mediante la investigación, que se desarrolló por medio de una serie de etapas y procesos, que describe paso a paso las actividades por medio de recolección de información que contribuyeron con el conocimiento, permitieron el cumplimiento de los objetivos expuestos, como parte fundamental para el desarrollo del proyecto como lo indica la (Figura 16). Así mismo, es de tipo cualitativo³, la estructuración del proyecto se inició con la definición del problema, se elaboró un diseño de trabajo mediante una metodología, basado en una selección de muestra y obtención de datos, constituido principalmente por el análisis y validación de la información aplicando técnicas investigativas como la observación y la lectura de textos, llegando a la conclusión materializada con un informe de resultados que pone en relación el problema ya definido con un producto obtenido.

Figura 11. Ciclo de proceso de investigación.



Fuente: HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Metodología de la investigación. 5 ed. México: McGraw-Hill, 2010. p. 63.

³ HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Metodología de la investigación. 5 ed. México: McGraw-Hill, 2010. p. 63.

4.2 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

Conforme con las diferentes temáticas propuestas por el director de grado y en la búsqueda del trabajo de grado, se concluyó en la idea de realizar un estudio de permeabilidad en suelos granulares contaminados con diferentes aguas aceitosas, los cuales arrojaran resultados confiables que sirvan de punto de partida a los futuros laboratorios de suelos que se realicen en la universidad Católica de Colombia, permitiendo afianzar los conocimientos teóricos de los estudiantes.

4.3 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En la recopilación de información se realizó una serie de pasos sucesivos, basado en el planteamiento del problema, que oriento búsqueda en la investigación, teniendo como objetivo, obtener el coeficiente de permeabilidad total y por estratos de un suelo granular contaminado con aguas aceitosas.

- Observación de los participantes. Por sugerencia del director del proyecto quien basado en la poca información documental acerca de la permeabilidad en suelos granulares contaminados con aguas aceitosas, nos propuso realizar 4 ensayos en los cuales se mediara el coeficiente de permeabilidad, para las muestra de suelo granular, los laboratorios se desarrollaran primero en un suelos sin contaminar, después se realizaran ensayos contaminando diferentes muestras con gasolina, ACPM y aceite de carro.
- Lectura de texto. En el proceso de investigación, la lectura es una parte fundamental, para la cual nos ayuda fortalecer los conocimientos adquiridos permitiendo profundizar en el tema de interés u objeto de estudio, de esta forma poder identificar la información adecuada que apoye los laboratorios requeridos en el proyecto, para dichos laboratorios recopiló de información teórica sobre permeabilidad en suelos granulares y efecto de contaminantes en dichos suelos.

Para la realización de los laboratorios se realizó diferentes consultas en libros especializados de suelos, geotecnia, mecánica de fluidos y la norma INVIAS, para cumplir los requisitos exigidos para este tipo de ensayos.

En la información recopilada, se tuvo en cuenta los diferentes puntos de vista de los autores, que nos brindó una aplicabilidad de manera significativa dándonos herramienta útiles e innovadoras para la obtención de resultados confiables de la permeabilidad de suelos granulares, realizando un análisis para plasmarlo y materializarlo.

5. REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS UTILIZANDO EL PERMEÁMETRO DE CARGA CONSTANTE

De acuerdo con las especificaciones de las normas INV E – 130 – 07, se realizaron los diferentes ensayos, teniendo en cuenta la granulometría del material y los tipos de contaminantes, tamaño de los cilindros y desarrollo del ensayo.

5.1 ESQUEMA BÁSICO DE LA MUESTRA DE MATERIAL GRANULAR PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.

- **Arena fina de peña:** pasa tamiz No 40, retenida en tamiz No 200.

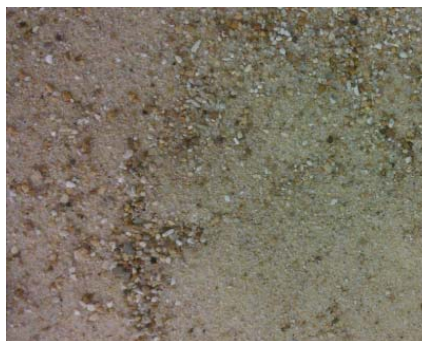
Figura 12. Arena fina.



Fuente: Autores.

- **Arena media de peña:** pasa tamiz No 10, retenida en tamiz No 40.

Figura 13. Arena media.



Fuente: Autores.

- **Arena gruesa de río:** pasa tamiz No 4, retenida en tamiz No 10.

Esta arena se utilizó de río para simular las condiciones cerca a fuentes de agua.

Figura 14. Arena gruesa de río.



Fuente: Autores.

5.2 ESPECIFICACIONES GENERALES DEL LABORATORIO

Los ensayos se realizan en el permeámetro de carga constante existente en la universidad Católica de Colombia, el cual cuenta para realizar este tipo de ensayos en suelos granulares un cilindro de 3", y 0.90 metros de altura.

Tabla 1. Lista de materiales.

LISTA DE MATERIALES		
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
Material granular fino (pasa tamiz 40 retiene en tamiz No 200)	gramos	4500
Material granular medio (pasa tamiz 20 retiene en tamiz No 40)	gramos	3000
Material granular grueso de río (pasa tamiz 40 retiene en tamiz No 100)	gramos	3500
Gasolina corriente	ml	300
ACPM	ml	300
Aceite de carro Terpel Oiltec 50 Monogrado	ml	300
Permeámetro de carga constante	und	1

Fuente: Autores.

5.3 PROCEDIMIENTO DEL LABORATORIO

- Se prepararon las muestras de material granular como lo menciona la INVIAS E 130 – 07.
- Material granular fino (pasa tamiz 40 retiene en tamiz No 200)
- Material granular medio (pasa tamiz 20 retiene en tamiz No 40)
- Material granular grueso de río (pasa tamiz 40 retiene en tamiz No 100).

Figura 15. Lavado del material para eliminar los finos.



Fuente: Autores.

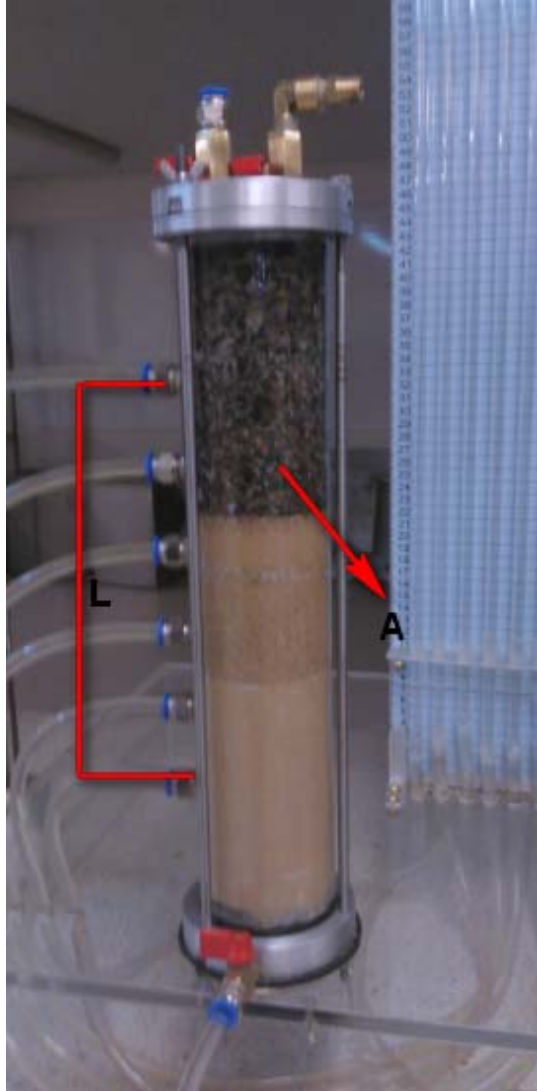
Figura 16. Material granular fino, medio y grueso de río.



Fuente: Autores.

- Se debe medir la longitud y el área del permeámetro de carga constante para suelos granulares finos.

Figura 17. Longitud y área conocida.



Fuente: Autores.

- Se confino el material granular en el cilindro, cada material se coloca en 3 capas y cada capa se compacta según Norma INVIAS E 130 – 07.

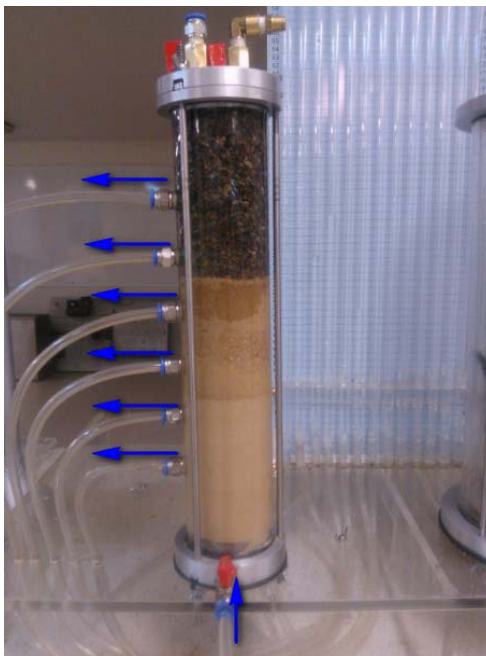
Figura 18. Material confinado.



Fuente: Autores.

- El material se somete a una carga hidráulica, el agua fluye a través de la muestra.

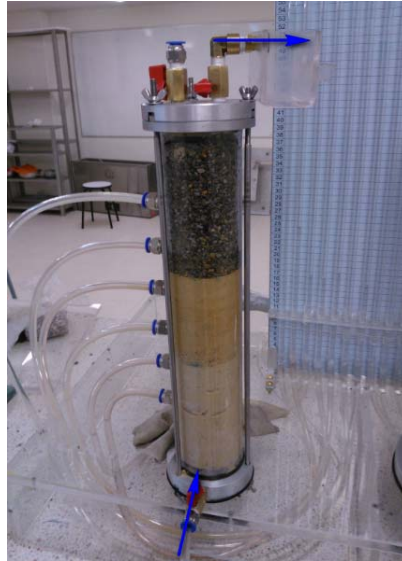
Figura 19. Cara hidráulica.



Fuente: Autores.

- Se toma el tiempo que tarda el caudal en llenar un volumen predeterminado de 100ML, se repite el procedimiento 3 veces para obtener en el promedio más fidelidad en los datos.

Figura 20. Volumen y tiempo.



Fuente: Autores.

- Se toman las lecturas de la cabeza hidráulica para los posteriores cálculos.

Figura 21. Cabeza hidráulica y diferencia de nivel.



Fuente: Autores.

5.4 PRIMERA ETAPA DE ANÁLISIS

Después de una investigación de contaminantes del suelo como pesticidas, productos industriales o radioactivos, petróleo, solventes, pesticidas y otros metales pesados después de analizadas cada una de las variables y características se escogen como contaminantes a utilizar en estos ensayos gasolina corriente, ACPM y aceite de carro (Terpel Oiltec 50 Monogrado) teniendo en cuenta estos contaminantes cumplen las necesidades del proyecto.

Se tamizó el material a utilizar lavándolo directamente en los tamices con el fin de quitar el material fino, se dejó secando el material en el horno existente en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia por 72 horas, se pesa el material y se introduce al cilindro correspondiente del permeámetro de carga constante por capas (3 niveles de capa por cada material), cada capa se compacta con el martillo de compactación o pisón de impacto de peso deslizante, cumpliendo la especificaciones técnicas obtenidas en la norma INV E – 130 – 07 teniendo en cuenta el diámetro del pisón, el peso del martillo y la altura de caída, a fin de garantizar la adecuada compactación de la muestra. Una vez la muestra se encuentra compactada se le empieza a suministrar agua constantemente a través del tanque de cabeza constante.

Se realiza un primer ensayo patrón en el cual no se contamina, la muestra se confina por 24 horas con agua, después se leen las presiones en el equipo de permeabilidad de carga constante y con un volumen determinado (100ml) se toma el tiempo que dura en fluir el volumen a través de la muestra.

5.5 SEGUNDA ETAPA DE ANÁLISIS

La segunda etapa de análisis consto de colocar la muestra en el permeámetro de carga constante, compactación y luego se procedía a contaminarla con gasolina, ACPM y aceite de carro independientemente, se realiza el ensayo midiendo cuanto tardaba en llenar una probeta de 100 MI, y se tomaron las presiones correspondientes para cada caso, para efectividad de los laboratorios para cada contaminante se tomó una muestra nueva y seca pesándola para que todos los suelos tuvieran el mismo volumen. Se realiza el proceso 3 veces para efectividad de los resultados.

6. RESULTADOS

6.1 DATOS GENERALIDADES

Para la realización de los cálculos de permeabilidad se tuvieron en cuenta las siguientes constantes:

Densidad del agua	998.0 kg/m ³
Diámetro del cilindro	7.52 cm
Área del cilindro	45.6 cm ²
Volumen del cilindro	866.4 cm ³
Distancia entre manómetros	10 cm
Carga constante	108

Peso específico de las arenas

Arena gruesa seca	1008.5 gr
Arena media seca	667.8 gr
arena fina seca	807.2 gr

Las características de los contaminantes utilizados se muestran en el anexo A

Para la realización de los cálculos de permeabilidad se tuvieron en cuenta las siguientes variables

- Tiempo (Seg)
- Descarga Q (cm³)
- Diferencias Piezométrica
- Gradiente Hidráulico (h/L).

6.2 CÁLCULOS DE LA MUESTRA

Para el ensayo de cabeza constante se debe calcular el coeficiente de permeabilidad (K) teniendo en cuenta:

$$K = \frac{Q}{A} \frac{X}{X} \frac{L}{t} \frac{X}{X} \frac{1}{h}$$

Donde:

k = coeficiente de permeabilidad

Q = caudal, es decir cantidad de agua descargada.

L = distancia entre manómetros.

A = área de la sección transversal.

t = tiempo total de desagüe.

h = diferencia de cabeza (altura) sobre los manómetros

6.3 RESULTADOS DE LABORATORIO

Tabla 2. Resultados de laboratorio.

ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA CONSTANTE (SUELOS ARENOSOS)		ENSAYO N° 1 DE 4				
INTEGRANTES: <u> DIEGO CAMELO </u> <u> KARINA GOMEZ </u>		FECHA: <u> 29/03/2014 </u>				
		MUESTRA: <u> ARENA FINA, MEDIA, GRUESA </u>				
LABORATORIO N° 1: MUESTRA SIN CONTAMINANTE						
DATOS DE LA MUESTRA						
Peso M. Fina (g):	<u> 1008.5 </u>	Peso M. Total (g):	<u> 2483.5 </u>			
Peso M. Media (g):	<u> 667.8 </u>	Peso Unit. muestra (g):	<u> 2.2 </u>			
Peso M. Gruesa (g):	<u> 807.2 </u>	Peso recipiente (g):	<u> 148 </u>			
Diámetro Cilindro (cm):	<u> 7.52 </u>	Altura Cilindro (cm):	<u> 14 </u>			
Área Cilindro (cm²):	<u> 45.60 </u>	L= Distancia entre				
Volúmen del cilindro (cm³):	<u> 866.40 </u>	Manómetros (cm):	<u> 10 </u>			
Peso Martillo (g):	<u> 500 </u>	G. de Compactación:	<u> 25 </u>			
Número de capas:	<u> 3 </u>	Altura caída (cm):	<u> 20.32 </u>			
		Constante de agua, kw:	<u> 998 </u>			
Volúmen agua (ml)	Tiempo (S)	Δh (mm)	DIF. Δh (mm)	K (cm/s)	Ec (kgf*cm/cc)	
100	1.53	G. FINA	82.13	38.03	3.80E-01	879.50
			76.37			
100	1.52	G. MEDIA	57.93			
			53.3			
100	1.50	G. GRUESA	48.97			
			44.1			

		ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA CONSTANTE (SUELOS ARENOSOS)				ENSAYO N° 3 DE 4					
INTEGRANTES:		DIEGO CAMELO		FECHA:		29/03/2014					
		KARINA GOMEZ		MUESTRA:		ARENA FINA, MEDIA, GRUESA					
LABORATORIO N° 3: CONTAMINANTE: ACPM											
DATOS DE LA MUESTRA											
Peso M. Fina (g):		3913.5		Peso M. Total (g):		8743.5					
Peso M. Media (g):		2416.5		Peso Unit. muestra (g):		2.2					
Peso M. Gruesa (g):		2413.5		Peso recipiente (g):		195.5					
Diámetro Cilindro (cm):		15.24		Altura Cilindro (cm):		14					
Área Cilindro (cm²):		182.42		L= Distancia entre							
Volúmen del cilindro (cm³):		2553.81		Manómetros (cm):		5					
Peso Martillo (g):		500		G. de Compactación:		25					
Número de capas:		3		Altura caída (cm):		20.32					
				Constante de agua, kw:		1					
		Δh (mm)		DIF. Δh (mm)		K (cm/s)		Ec (kgf*cm/cc)			
Volúmen agua (ml)		Tiempo (S)		G. FINA		32.2		3.04E-01		298.38	
100		2.32		81.57							
100		2.2		72.67							
100		2.19		54.67							
				51.93							
				49.70							
				49.37							

6.4 CONCLUSIÓN DEL ENSAYO DE LABORATORIO

- El suelo que se utiliza en el aparato de permeabilidad nunca es igual al suelo que se tiene en el terreno, siempre está algo alterado.
- Al comparar los resultados del coeficiente de permeabilidad K , hemos concluido que este sufre una variación significativa cuando se ve en presencia de contaminantes como la gasolina, ACPM y aceite de carro, siendo este último el que más afecta la permeabilidad del suelo.
- Durante la etapa del laboratorio y una vez se empezó a realizar las pruebas hemos analizado que cuando se le empieza a suministrar agua de abajo hacia arriba de la muestra, lo primero que sale es el contaminante, esto en un suelo natural supondría que el contaminante queda encima del suelo, lo que podría llegar a afectar las plantas y demás organismos.
- Para analizar la permeabilidad de la muestra, ésta debe quedar completamente saturada.
- Cálculo el coeficiente de permeabilidad (K).

7. CONCLUSIONES

En el trabajo de grado se planteó la obtención de resultados numéricos del coeficiente de permeabilidad K en suelos arenosos contaminados con diferentes agua aceitosas como gasolina, ACPM y aceite de carro, durante la ejecución diferentes ensayos, se buscó obtener datos precisos y confiables.

Los integrantes del proyecto, mediante la obtención de resultados de permeabilidad, pudo constatar que el ensayo de permeabilidad de cabeza constante, es plenamente funcional y que se ajusta a las necesidades de la comunidad estudiantil de la facultad de Ingenierías del programa de ingeniería civil de la Universidad Católica de Colombia, de manera práctica e innovadora, teniendo la certeza que es una herramienta útil y de fácil manejo.

Por lo anterior mediante los ensayos realizados en el equipo de permeabilidad de cabeza se dejan resultados numéricos confiables que pueden ser tomados como base para futuros ensayos.

8. RECOMENDACIONES

- Se debe hacer uso del gradiente hidráulico de acuerdo a la muestra a ensayar.
- Se debe usar el equipo adecuadamente.
- Se debe preparar la muestra de acuerdo a las especificaciones de la norma INVIAS E 130 – 07.
- Verificar antes de realizar el ensayo que las válvulas estén cerradas y el tanque este lleno de agua a un nivel adecuado.
- Eliminar las burbujas de aire del cilindro y de la mangueras antes de hacer el ensayo de permeabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

ALARCÓN BÁRCENA, Yngrid y ALVA HURTADO, Jorge E. Ensayos de permeabilidad en materiales de baja de permeabilidad compactados. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo15_a.pdf>. [Citado: 20, marzo de 2014].

ALVA HURTADO, Jorge E. Diseño de cimentaciones. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.jorgealvahurtado.com/files/DisenoCimentacionesAlva.pdf>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

----- Terzaghi y la mecánica de suelos. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo31_a.pdf>. [Citado: 20, marzo de 2014].

ANGELONE, S., GARIBAY, T. y CAHUAPÉ, M. Geología y geotecnia: permeabilidad en suelos. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad20enSuelos.pdf>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

ARQHYS ARQUITECTURA. Suelos granulares. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.arqhys.com/construccion/granulares-suelos.html>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

ECOPETROL. Diesel corriente. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=216&conID=37368>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

----- Especificaciones técnicas gasolina corriente o mogas. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=129&conID=36288&pagID=127462>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

----- Gasolina corriente. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?conID=37366&catID=216>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

FAO. Permeabilidad del suelo. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm>. [Citado: 20, marzo de 2014].

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Metodología de la investigación. 5 ed. México: McGraw-Hill, 2010. 613 p.

INGESPORTS. Flujo laminar. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://ingesports.files.wordpress.com/2012/12/flujo-laminar-y-turbulento.gif?w=462&h=351>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante): I.N.V. E – 130 – 07. [En línea]. Disponible en Internet: ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-130-07.pdf>. [Citado: 29, mar., 2014].

JUÁREZ BADILLO, Eulalio. Mecánica de suelos. 3 ed. México: Limusa, 1975. 3v.

MOBIL. Productos automotrices. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: http://www.mobil.com.co/Colombia-Spanish-LCW/carengineoils_products_mobil-super_1000-20w50.aspx#>. [Citado: 20, marzo de 2014].

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO. Terzaghi & Peck. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/permeabilidad.pdf>. [Citado: 20, marzo de 2014].

SÁNCHEZ SAN ROMÁN, Javier. Ley de Darcy: conductividad hidráulica. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://web.usal.es/javisa/hidr>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

WIKIMEDIA. Suelo saturado. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agua_en_el_suelo.PNG>. [Citado: 20, marzo de 2014].

WIKIPEDIA. Contaminación. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/Contaminaci%C3%B3n>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

----- Gasolina. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/Gasolina>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

----- Petrodiésel. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/Petrodi%C3%A9sel>>. [Citado: 20, marzo de 2014].

Anexo A. Características de los contaminantes utilizados en las pruebas del laboratorio.

CARACTERÍSTICAS DE LA GASOLINA CORRIENTE O MOGAS

Especificaciones técnicas gasolina corriente o mogas

Especificación	Método	Mínimo	Máximo
Número de octano RON	D2699		91,5
Contenido de plomo (gr/l)	D3237/D5059		0,02
Destilación (°C) - 10% Volumen evaporado	D86		75
Destilación (°C) - 50% Volumen evaporado	D86		120
Destilación (°C) - 90% Volumen evaporado	D86		180
Destilación (°C) - Punto final de ebullición (PFE)	D86		221
Residuo			2
Presión de vapor RVP a 37,8 °C (100 °F) - psi	D323/D5191		9,0
Contenido de gomas	D381		4
Estabilidad a la oxidación	D525	240	
Contenido total de azufre (% peso)	D4294/D2622		0,15
Corrosión lámina de cobre	D130		1
Contenido de azufre mercaptano	D3227		0,0015
Color - Visual			Sin color
Olor			Comercial
Gravedad API a 60 °F			Reportar
Número de octano MON	D2700		Reportar
Benceno	D5580/D3605/PIANO		Reportar
Olefinas	D5580/D1319/PIANO		Reportar
Aromáticos (% Vol)	D5580/D1319/PIANO		Reportar
Oxigenados			10

Producto : Gasolina Corriente				
Grado	Regular - Indice Octano 81, Sin Plomo (Unleaded)			
Referencia	Resolución 1180 de 21 de Junio de 2006 / NTC 1380 (Norma Técnica Colombiana) / ASTM D 4814			
Actualización	Abril 12 de 2011			
Características	Unidades	Métodos	Mínimo	Máximo
Azufre	ppm	ASTM D-4294 ó ASTM D-2622		300
Corrosión al Cobre, 3 h a 50 °C	Clasificación	ASTM D-130		1 (1)
Destilación :	°C	ASTM D-86		
10% volumen evaporado				70
50% volumen evaporado			77	121
90% volumen evaporado				190
Punto Final de Ebullición				225
Estabilidad a la oxidación	minutos	ASTM D-525	240	
Contenido de Gomas	mg/100 mL	ASTM D-381		5
Indice de Cierre de Vapor, ICV	kPa	(2)		98
Gravedad API @ 15.6 °C	°API	ASTM D-4052	Reportar	
Indice antidetonante (3)	octanos	ASTM D-2699 y ASTM D-2700 ó IR (4)	81	
RVP (5)	kPa (psia)	ASTM D-4953 ó ASTM D-5191 ó ASTM D-323		55 (8.0)
Plomo	g/L	ASTM D-3237 ó ASTM D-5059		0,013

Producto : Gasolina Corriente				
Benceno	ml/100 mL	ASTM D-5580 ó ASTM D-3606 ó ASTM D-6729		1,0
Aromáticos	mL/100 mL	ASTM D-5580 ó ASTM D-1319 ó Método PIANO (ASTM D-6729)		28
Aditivos dispersantes y detergentes (6)	mg/l			
(1) El valor 1 se refiere a valores 1a o 1B				
(2) Calculado : $ICV = P + 1,13A$; A : % Evap a 70 °C, P: RVP (kilopascales, kPa)				
(3) Índice Antidetonante: $IAD = (RON+MON)/2$				
(4) Método Alterno: Infrarrojo				
(5) RVP: Presión de Vapor Reid a 37.8 °C				
(6) Resolución 1180 de 2006: El paquete de aditivos deberá cumplir como mínimo las funciones de detergente dispersante-controlador de formación de depósitos en el sistema de admisión de combustibles de los motores, incluyendo acción de limpieza como mínimo hasta los asientos de las válvulas de admisión, estabilizador del combustible e inhibidor de oxidación. El Ministerio de Minas y Energía determinará la dosis y calidad de los aditivos, al igual que el método de prueba, de acuerdo con lo establecido en la Resolución No. 81055 de septiembre 20 de 1999 o la que lo modifique o sustituya.				

CARACTERISTICAS DEL DIESEL CORRIENTE (ACPM)

Producto: Diesel Corriente (1)				
Grado	Combustible automotor e industrial			
Referencia	Resolución 18 2087 de 17 de Diciembre de 2007 / ASTM D-975 / NTC 1438 (Norma Técnica Colombiana) / Ley 1205 de 2008/Resolución 1499 de 2011			
Actualización	Agosto 5 de 2011			
Características	Unidades	Métodos	Mínimo	Máximo
Agua y Sedimento	mL/100 mL	ASTM D-2709 ó ASTM D-1796		0,05
Azufre	ppm	ASTM D-2622 ó ASTM D-4294 ó ASTM D-1266 ó ASTM D-5453		500
Aromáticos****	mL/100 mL	ASTM D-1319 ó ASTM D-5186		33
Cenizas	g / 100 g	ASTM D 482		0,01
Color ASTM		ASTM D 1500		3,0
Corrosión al Cobre, 3 h a 50 °C	Clasificación	ASTM D 130		2 (2)
Destilación :	°C	ASTM D 86		
Punto Inicial de Ebullición			Reportar	
Temp. 50% vol. Recobrado			Reportar	
Temp. 95% vol. Recobrado				370
Punto final de Ebullición				390
Gravedad API	° API	ASTM D-4052 ó ASTM D-1298, ASTM D-287	Reportar	

Producto: Diesel Corriente (1)				
Indice de Cetano (3)		ASTM D-4737 ó ASTM D-976	45	
Numero de Cetano (4)		ASTM D-613 ó ASTM D-6890	43	
Punto de Fluidez	°C	ASTM D 97 ó ASTM D 5949		3
Punto de Inflamación	°C	ASTM D 93	52	
Residuos Carbón Micro, (10 % fondos)	g / 100 g	ASTM D 4530		0,20
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	ASTM D 445	1,9	5,0
Lubricidad***	micrómetros	ASTM D 6079		450
<p>(1) Diésel corriente y sus mezclas con biocombustible hasta el 5% vol.(Aplica para el producto de la Refinería de Barrancabermeja y de la Refinería de Cartagena)</p> <p>(2) El valor 2 se refiere a valores 2a, 2b o 2c</p> <p>(3) Aplica a diésel producido en destilación atmosférica y productos craqueados y a mezclas de ellos. El método ASTM D-4737 no aplica al diésel mezclado con biodiésel.</p> <p>(4) Para diésel que contenga componentes provenientes de procesos de ruptura catalítica y/o térmica, y/o aditivos mejoradores de cetano y/o biocombustibles.</p> <p>* Residuos Carbón micro, la norma ASTM D-4530 no está mencionada en la norma internacional. La norma que se utiliza internacionalmente es la ASTM D 524, con valor máximo de 0.35 % masa</p> <p>** Viscosidad: La norma internacional, el límite máximo es 4.1 mm² / s</p> <p>*** Norma Europea: 460, norma americana 520</p> <p>**** Es aceptable que el diesel tenga como especificación alterna un contenido de aromáticos de 35 ml/100ml siempre y cuando la T95 no sea superior a 360°C.</p>				

CARACTERISTICAS DEL ACEITE PARA MOTOR (Terpel Oiltec 50 Monogrado)

CARACTERISTICAS	SAE 40	SAE 50
Viscosidad, cSt a 100 °C	14.7	17.15
Indice de viscosidad ASTM D 2270	93	93
T.B.N. ASTM D - 2896	6	6
Punto de inflamacion, °C minimo	230	235
Punto de fluidez, °C Minimo	-10	-10

Fuente: Terpel.