

**ENSAYOS DE PERMEABILIDAD Y CONSOLIDACIÓN PARA SUELOS
ARENO-ARCILLOSOS Y ARENO-LIMOSOS CONTAMINADOS CON
HIDROCARBUROS CON CONCENTRACIONES DEL 20%, 30%, 40% Y 50%
DE LA POROSIDAD**

ANDRES FELIPE VILLACRECES MARTÍNEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2014**

**ENSAYOS DE PERMEABILIDAD Y CONSOLIDACIÓN PARA SUELOS ARENO-
ARCILLOSOS Y ARENO-LIMOSOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS
CON CONCENTRACIONES DEL 20%, 30%, 40% Y 50% DE LA POROSIDAD**

ANDRES FELIPE VILLACRECES MARTÍNEZ

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Directora del Proyecto
PhD. MARÍA FERNANDA SERRANO GUZMÁN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2014**

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Agradecimientos

Cerca ya de alcanzar esta gran meta me siento satisfecho, pues sé que con la perseverancia, actitud y dedicación que me impuse para lograrla, soy capaz de alcanzar cualquier objetivo que me proponga.

Quiero agradecer a mis padres Elsa Beatriz Martínez Rueda y Armando Villacreces Sanmiguel, quienes confiaron en mí y estuvieron siempre para darme su incondicional apoyo, confiando en mis capacidades y perseverancia para conseguir las meta que me he propuesto.

También quiero agradecer muy especialmente a la doctora María Fernanda Serrano quien con su conocimiento y valiosos consejos me oriento y me apoyo en esta importante etapa de mi desarrollo para sacar adelante esta investigación

Al personal del laboratorio, Heli Rueda y Edwin Rangel gracias por para estar ahí para instruirme en los procedimientos y técnicas en el desarrollo de mi investigación.

Por ultimo quiero agradecer a mis amigos y compañeros de clase Jhon Pérez, Marlon Rodríguez, Sergio Sánchez, Orlando Iguaran y Jhon Galvis quienes me acompañaron mi periodo de formación académica.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	15
1.2 JUSTIFICACIÓN	16
1.3 ALCANCE	17
1.4 OBJETIVOS	17
1.4.1 Objetivo General	17
1.4.2 Objetivos Específicos	17
1.5 RELEVANCIA DEL ESTUDIO	18
1.6 ORGANIZACIÓN	19
2. CONTEXTO TEÓRICO	21
2.1 SUELO	21
2.1.1 Definición de Suelo	21
2.1.2 Estructura del Suelo	21
2.1.3 Origen del Suelo	22
2.1.4 Agentes Generadores de Suelo	23
2.1.5 Factores formadores del suelo	25
2.1.6 Horizontes del suelo	25
2.1.7 Tipos de suelo	27
2.1.8 Propiedades físicas de los suelos	29
2.1.9 Fases del suelo	31
2.1.10 Contaminantes Orgánicos	31
2.1.11 Importancia del estudio de suelos	32
2.1.12 Los suelos de Colombia	33
2.2 PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS	34
2.2.1 Importancia de la permeabilidad en los suelos	35
2.2.2 Generalidades	36
2.2.3 Ley de Darcy	36
2.2.4 Clases de permeabilidad del suelo	37
2.2.5 Factores que determinan la permeabilidad	39
2.2.6 Antecedentes del estudio de la permeabilidad	42

2.3	CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS	43
2.3.1	Generalidades	43
2.3.2	Generalidades de la compresibilidad	43
2.3.3	Causas de los asentamientos	45
2.3.4	Fenómeno de la consolidación en los suelos	46
2.3.5	Etapas de la consolidación	46
2.4	LÍMITES DE ATTERBERG O LÍMITES DE CONSISTENCIA	48
2.4.1	Generalidades	48
2.4.2	Plasticidad y límites de consistencia	48
2.5	HIDROCARBUROS	49
2.5.1	Definición	49
2.5.2	Generalidades	49
2.5.3	Tipos de hidrocarburos	50
2.5.4	Glicerina	51
2.5.5	Antecedentes: derramamiento de hidrocarburos e impactos	52
3.	METODOLOGÍA	54
3.1	ORIGEN DEL SUELO	54
3.2	RECOLECCIÓN DEL HIDROCARBURO	54
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS	55
3.4	CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	56
3.4.1	Ensayo de Granulometría	56
3.4.2	Ensayo de Límite Líquido	57
3.4.2	Ensayo de límite Plástico	58
3.5	CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS	59
3.6	ENSAYO PRÓCTOR MODIFICADO	59
3.6.1	Equipo	59
3.6.2	Procedimiento	60
3.7	DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD NATURAL DE UN SUELO MEDIANTE EL USO DE LA ESTUFA ELÉCTRICA	63
3.8	OBTENCIÓN DE MUESTRAS	64
3.8.1	Hincado de los tubos tomamuestras	64
3.8.2	Expulsión de la muestra dentro la probeta	68

3.8.3	Incubación de los especímenes	70
3.9	ENSAYO DE PERMEABILIDAD DE SUELOS POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE	72
3.9.1	Equipo	72
3.9.2	Procedimiento	72
3.10	ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN	76
3.10.1	Introducción	76
3.10.2	Equipo	77
3.10.3	Ejecución del ensayo	77
4.	DATOS OBTENIDOS	83
4.1	SUELO ARENO ARCILLOSO	83
4.1.1	Especímenes no contaminados	83
4.1.2	Especímenes contaminados	87
4.2	SUELOS ARENO LIMOSO	95
4.2.1	Especímenes no contaminados	95
4.2.2	Especímenes contaminados	99
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	107
5.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN	107
5.1.1	Suelos arenos arcillosos y areno limosos	107
5.2	DE PERMEABILIDAD POR EL METODO DE CABZA VARIABLE	110
5.2.1	Análisis de los coeficientes de permeabilidad para muestras de suelo areno arcillosas y arenos limosas	110
5.3	RESULTADOS SUELO ARENO ARCILLOSO VS. SUELO ARENO LIMOSO	113
5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL	115
5.4.1	Análisis de los coeficientes de consolidación para muestras de suelo areno arcillosas	115
5.4.2	Análisis de los coeficientes de consolidación para muestras de suelo areno limosas	117
6.	CONCLUSIONES	120
6.1	CON RELACIÓN AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS CON RESPECTO AL ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN	120
6.2	CON RELACIÓN AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS CON RESPECTO A LA PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE	121

6.3	CON RELACIÓN AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS CON RESPECTO A LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL	122
7.	RECOMENDACIONES	126
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Perfil de meteorización según diversas fuentes	24
Tabla 2. Clases de permeabilidad del suelo	38
Tabla 3. Tabla de valores relativos del coeficiente de permeabilidad en diferentes tipos de suelos, según Terzaghi y Peck	38
Tabla 4. Tabla de valores relativos del coeficiente de permeabilidad en diferentes tipos de suelos según, Casagrande y Fadum	39
Tabla 5. Permeabilidad de un suelo con relación al tipo de estructura presente	40
Tabla 6. Permeabilidad de un suelo con relación al tipo de textura presente	41
Tabla 7. Variación de la permeabilidad según su textura	41
Tabla 8. Densidad del agua según su temperatura	74
Tabla 19. Resultados obtenidos a partir del ensayo de límite de contracción para una muestra de suelo Areno Arcillosa	84
Tabla 9. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos en su estado Virgen	86
Tabla 10. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Arcillosos en estado Virgen	86
Tabla 11. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 20% de la porosidad	88
Tabla 12. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 20% de la porosidad	88
Tabla 13. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 30% de la porosidad	90
Tabla 14. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 30% de la porosidad	90
Tabla 15. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 40% de la porosidad	92
Tabla 16. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 40% de la porosidad	92
Tabla 17. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 50% de la porosidad	94
Tabla 18. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 50% de la porosidad	94
Tabla 19. Resultados obtenidos a partir del ensayo de límite de contracción para una muestra de suelo Areno Limosa	96
Tabla 20. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Limosos en estado Virgen	98
Tabla 21. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Limosos en estado Virgen	98
Tabla 22. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 20% de la porosidad	100
Tabla 23. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Limosos Contaminados con el 20% de la porosidad	100

Tabla 24. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Arenos Limosos Contaminados con el 30% de la porosidad	102
Tabla 25. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Arenos Limosos Contaminados con el 30% de la porosidad	102
Tabla 26. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Arenos Limosos Contaminados con el 40% de la porosidad	104
Tabla 27. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Arenos Limosos Contaminados con el 40% de la porosidad	104
Tabla 28. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Arenos Limosos Contaminados con el 50% de la porosidad	106
Tabla 29. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Arenos Limosos Contaminados con el 50% de la porosidad	106
Tabla 30. Análisis comparativo de los porcentajes de variación de las humedades óptimas en muestras arenos arcillosas y arenos limosos contaminados con hidrocarburos respecto a los resultados de las muestras de suelo vírgenes.	108
Tabla 31. Análisis comparativo de los porcentajes de variación de los coeficientes de permeabilidad en muestras arenos arcillosas contaminados con hidrocarburos respecto a los resultados de muestras de suelo vírgenes.	110
Tabla 32. Análisis comparativo de los porcentajes de variación de los coeficientes de permeabilidad en muestras arenos limosas contaminados con hidrocarburos respecto a los resultados de muestras de suelo vírgenes.	111
Tabla 33. Análisis comparativo de los porcentajes de variación de los coeficientes de consolidación en muestras arenos arcillosas contaminados con hidrocarburos respecto a los resultados de las muestras de suelo vírgenes.	115
Tabla 34. Análisis comparativo de los porcentajes de variación de los coeficientes de consolidación en muestras arenos limosas contaminados con hidrocarburos respecto a los resultados de las muestras de suelo vírgenes.	117

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura del suelo	21
Figura 2. Proceso de formación del suelo	23
Figura 3. Horizontes del suelo	26
Figura 4. Ejemplo de suelo inorgánico	27
Figura 5. Ejemplo de suelo orgánico	28
Figura 6. Esquema detallado del permeámetro de carga variable	35
Figura 7. Tipos de estructura del suelo	41
Figura 8. Compresibilidad de una muestra de suelo Virgen y una muestra de suelo Contaminada	47
Figura 9. Apariencia de la glicerina	52
Figura 10. Glicerina almacenada en pimpinas	54
Figura 11. Recipientes para el almacenamiento del suelo virgen y el suelo contaminado	55
Figura 12. Infograma correspondiente al procedimiento del ensayo de granulometría para suelos areno arcillosos (izquierda) y areno limosos (derecha)	57
Figura 13. Molde cilíndrico y martillo metálico de Próctor modificado	60
Figura 14. Máquina de compactación en estado de reposo y en pleno funcionamiento	61
Figura 15. Enrasado y pesado del cilindro de Próctor modificado	62
Figura 16. Muestras de suelo contaminadas para ser secadas al horno a temperatura de 50 °C	62
Figura 17. Equipo para hincado y extracción de muestras	64
Figura 18. Infograma correspondiente al procedimiento de hincado de los tubos tomamuestras	66
Figura 19. Tubos tomamuestras recién hincados en el cilindro de Próctor modificado	66
Figura 20. Desplazamiento de suelo hacia el collar de extensión del Próctor para facilitar remoción del material	67
Figura 21. Extracción de los tubos tomamuestras del cilindro de Próctor mediante cincel y martillo	67
Figura 22. Forma en que debe enrasarse el espécimen antes de ser extraído del tubo tomamuestras	68
Figura 23. Desplazamiento del espécimen del tubo tomamuestras	69
Figura 24. Extracción del espécimen del tubo tomamuestras	70
Figura 25. Infograma correspondiente a la metodología empleada para la incubación de especímenes	71
Figura 26. Ejemplo de método inadecuado para la incubación de especímenes	72
Figura 27. Infograma correspondiente al ensamblaje del conjunto del permeámetro	75
Figura 28. Consolidómetros del laboratorio de suelos con sus respectivos dispositivos de carga	78
Figura 29. Infograma correspondiente al procedimiento del ensamblaje del conjunto del consolidómetro	81
Figura 30. Curva Granulométrica del ensayo de granulometría para una Arena Arcillosa en estado Virgen	83

Figura 31. Curva de fluidez múltiple del ensayo de limite líquido para una Arena Arcillosa en estado Virgen	84
Figura 32. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Arcillosa en estado Virgen	85
Figura 33. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Arcillosa Contaminada con el 20% de la Porosidad	87
Figura 34. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Arcillosa Contaminada con el 30% de la Porosidad	89
Figura 35. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Arcillosa Contaminada con el 40% de la Porosidad	91
Figura 36. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Arcillosa Contaminada con el 50% de la Porosidad	93
Figura 37. Curva Granulométrica del ensayo de granulometría para una Arena Limosa en estado Virgen	95
Figura 38. Curva de fluidez múltiple del ensayo de limite líquido para una Arena Limosa en estado Virgen	96
Figura 39. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Limosa en estado Virgen	97
Figura 40. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Limosa Contaminada con el 20% de la porosidad	99
Figura 41. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Limosa Contaminada con el 30% de la porosidad	101
Figura 42. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Limosa Contaminada con el 40% de la porosidad	103
Figura 43. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Limosa Contaminada con el 50% de la porosidad	105
Figura 44. Coeficiente de Permeabilidad vs. Concentración del Contaminante en suelos Areno Limosos	109
Figura 45. Coeficiente de Permeabilidad vs. Concentración del Contaminante en suelos Areno Arcillosos	109
Figura 46. Coeficiente de Permeabilidad vs. Concentración del Contaminante en suelos Areno Limosos	112
Figura 47. Coeficiente de Permeabilidad vs. Concentración del Contaminante en suelos Areno Arcillosos	113
Figura 48. Coeficiente de Permeabilidad vs. Concentración del Contaminante en suelos areno arcillosos y areno limosos	114
Figura 49. Coeficiente de Consolidación (m^2/s) vs. Esfuerzo Empleado en suelos Areno Arcillosos ($kgf/cm^2/s$)	116
Figura 50. Coeficiente de Consolidación vs. Esfuerzo Empleado en suelos Areno Limosos	118

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ENSAYOS DE PERMEABILIDAD Y CONSOLIDACIÓN PARA SUELOS ARENO-ARCILLOSOS Y ARENO-LIMOSOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS CON CONCENTRACIONES DEL 20%, 30%, 40% Y 50% DE LA POROSIDAD

AUTOR(ES): ANDRÉS FELIPE VILLACRECES MARTÍNEZ

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Ph.D. MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN

RESUMEN

La presente investigación plantea la metodología que debe seguirse para la evaluación de la permeabilidad y el comportamiento de la consolidación en suelos areno arcillosos y areno limosos con hidrocarburos con concentraciones del 20%, 30% 40% 50% de la porosidad. Para ello, se comparan las muestras afectadas con un derivado de hidrocarburo y las muestras vírgenes, también a partir de estos resultados se extrajeron algunas conclusiones que aportan posibilidades de uso de estos suelos atendiendo a la productividad de los mismos. En cuanto a la permeabilidad, estudiada por el método de cabeza variable evidencia que a medida que se aumenta el grado de concentración de hidrocarburo, el suelo se torna cada vez más impermeable, sin embargo también se observó que la impermeabilidad tendía a desaparecer como propiedad a medida de que el grado de contaminación aumentaba, pues al llegar a cierto limite el hidrocarburo tiende a escaparse. Otro de los aspectos a destacar se centró en el ensayo de consolidación unidimensional que permitió determinar que a mayor grado del contaminante, mayor era la compresibilidad tanto para arenas arcillosas como en las arenas limosas pues no obstante al presentar mayor contenido de arena que de arcilla o limo en ambos suelos prevalecía la estructura porosa del limo para la expulsión del agua del aire de sus vacíos al ser aplicado un esfuerzo sobre él.

PALABRAS CLAVES:

CONSOLIDACIÓN, PERMEABILIDAD, HIDROCARBUROS,
COMPACTACIÓN

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: PERMEABILITY AND CONSOLIDATION TESTS ON SOIL SILY SAND AND CLAVEY SAND CONTAMINATED WITH HYDROCARBONS AT CONCENTRATIONS OF 20%, 30%, 40% AND 50% POROSITY

AUTHOR(S): ANDRÉS FELIPE VILLACRECES MARTÍNEZ

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ph.D. MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN

ABSTRACT

This research presents the methodology to test mechanical properties as permeability and consolidation in samples of silty sand and clay sand soils with hydrocarbons at concentrations of 20%, 30% 40% 50% of their porosity. For doing that, the results of contaminated soils are compared with the same test at clean soil. Regarding the permeability conducted by variable head method, it was observed that an increase in percent of hydrocarbon increases the non-permeability of the soil. On the other hand, when the concentration of hydrocarbons exceed or is similar to the porosity the permeability behavior loss relevance because the hydrocarbon tended to release from the soil during the test. Another noteworthy aspect focused on dimensional consolidation test which identified that the higher the degree of pollution, the higher the compressibility for both clayey sands and silty sands. Both sample of soils shown higher content of clay or sandy loam soils where the quantity of silty matrix release the water.

KEYWORDS:

CONSOLIDATION,
COMPACTION

PERMEABILITY,

HYDROCARBONS,

INTRODUCCIÓN

Las diferentes actividades productivas de los sectores de alimentos, industria y vivienda, entre otros, pueden causar alteraciones al suelo. Así mismo las actividades de explotación y transporte de crudo, por lo cual el derrame de hidrocarburos es un problema cada vez más común.

Dependiendo del tipo de hidrocarburo y de la humedad, temperatura y textura del suelo, el hidrocarburo como tal puede generar una serie de procesos físico químicos que al darse de forma simultánea, impiden el intercambio gaseoso con la atmósfera. El nivel de toxicidad en estos procesos se relaciona con la cantidad de hidrocarburo derramado. Muchos de los microorganismos utilizados en el tratamiento de aguas y de suelos contaminados, además de hacer más difícil su tratamiento pueden destruir la estructura terciaria de las proteínas alterando la neutralidad de las enzimas y deshidratando las células; ello debido a los altos gradientes de salinidad que ellos soportan.

La mayor productividad del suelo se encuentra en su capa exterior y más superficial, que en la mayoría de casos, aun cuando solo llega alcanzar un centímetro en cientos y hasta miles de años puede ser fácilmente destruida en cuestión minutos por vientos y/o lluvias fuertes y escasamente en ocasiones esta alcanza unos pocos centímetros de espesor. [1]

Este estudio reviste importancia en la medida en que a partir de los procedimientos ejecutados durante el proceso investigativo, es viable determinar el comportamiento mecánico de los suelos areno arcillosos y areno limosos contaminados con el 20%, 30% 40% y 50% de la porosidad.

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El manejo inadecuado de los materiales y residuos peligrosos por parte del ser humano ha generado un serio problema de contaminación a los ecosistemas convirtiéndose en tema de preocupación para la sociedad en general, pues el derrame de hidrocarburos en la infraestructura implica pérdidas de tiempo, dinero y genera impactos negativos en el medio ambiente.

Este estudio evalúa los problemas causados por la contaminación por derivados de hidrocarburos, revisando el comportamiento mecánico de la permeabilidad y la consolidación de suelos limo-arenosos y arcillo-arenosos contaminados con

hidrocarburos, con concentraciones al 20%, 30%, 40% y 50% de la porosidad, al tiempo que documenta estos procedimientos de los ensayos para los suelos, y finalmente compara las variaciones presentadas en los parámetros de los respectivos ensayos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los procesos físico-químicos simultáneos, tales como la evaporación y la penetración que se presentan en el suelo al interactuar con hidrocarburos y que impiden el intercambio gaseoso con la atmósfera, se vienen generando hace varias décadas. Sin embargo, aún no se ha tomado real conciencia del grado de dificultad y el costo que representa remediar los daños causados en el suelo debido a dicha situación, tanto por los operadores de dichos recursos, como por las autoridades y la comunidad en general.

Ahora bien, cabe recalcar que si bien dicho problema se viene generando hace varias décadas, aún no se ha tomado real conciencia del grado de dificultad y el costo que representa remediar los daños causados en el suelo debido a dicha situación, tanto por los operadores de dichos recursos, como por las autoridades y la comunidad en general.

Otro asunto que tiene fundamental relevancia en el tema, son las operaciones de transporte, -teniendo en cuenta que el transporte de mercancías en el país y el resto del mundo constituye un medio estratégico e indispensable en el proceso de desarrollo nacional-. En este orden, muchos de los siniestros en materia de contaminación por hidrocarburos se presentan en dicha fase, debido a fallas tanto mecánicas como humanas de los medios carretables o ferroviarios destinados para tal fin. (Flores, 2013).

Este estudio expone la magnitud del problema y pretende sensibilizar al lector y en especial a los operadores del crudo que tengan acceso a este documento así como a las autoridades encargadas del control de tales operaciones, de los principales riesgos e impactos ambientales generados por derrames de hidrocarburos y demás sustancias químicas, buscando que se tomen medidas tanto preventivas como correctivas para mitigar tan significativos riesgos y daños.

1.3 ALCANCE

El propósito de esta investigación es evaluar la variación y el comportamiento mecánico de los suelos mediante los ensayos de permeabilidad y consolidación. Para ello, se realizaron los ensayos de clasificación los cuales corresponden los límites de consistencia (límite líquido, límite plástico y límite de contracción), la granulometría y la gravedad específica del suelo, para suelos areno limosos y areno arcillosos.

Una vez realizada la clasificación de los suelos, ambas muestras limo y arcilla en su estado virgen fueron compactadas mediante el ensayo de Próctor modificado con el fin de obtener sus respectivas humedades óptimas, las cuales posteriormente se sometieron a los ensayos en los que se sustentó la experimentación.

Las muestras en su estado virgen se contaminaron cada una con derivados de hidrocarburos del 20%, 30%, 40%, 50%, de la porosidad, de igual manera se compactaron para obtener las humedades óptimas requeridas para la realización de los ensayos de permeabilidad y consolidación. El desarrollo de esta experimentación es con el fin de evaluar los comportamientos mecánicos de ambos procesos y verificar si el proceso que se está implementando, es el adecuado.

La distribución de estos ensayos se realizó de la siguiente manera: respecto a los ensayos de permeabilidad, se llevaran a cabo exactamente ocho (8) para cada grado de contaminación de cada suelo incluyendo las muestras sin alterar para un total de ochenta (80) ensayos, en cuanto a los ensayos de consolidación se realizaron tres (3) ensayos que para cada grado de contaminación cada suelo incluyendo la muestra sin alterar para un total de veintisiete (30) ensayos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Verificar las variaciones de la permeabilidad y consolidación de suelos areno-limosos y areno-arcillosos contaminados con derivados de hidrocarburos, en concentraciones al 20%, 30%, 40% y 50% de la porosidad.

1.4.2 Objetivos Específicos

Determinar las propiedades mecánicas de las muestras de areno-limosas y areno-arcillosas.

Evaluar la variación de la permeabilidad y consolidación de suelos areno-arcillosos., contaminados con hidrocarburos con concentraciones al 20%, 30%, 40% y 50% de la porosidad.

Evaluar el comportamiento mecánico de la permeabilidad y consolidación de suelos areno-limosos, contaminados con hidrocarburos con concentraciones al 20%, 30%, 40% y 50% de la porosidad.

Documentar los procedimientos de ensayo para los suelos contaminados de acuerdo a las normas técnicas.

Comparar las variaciones presentadas en el parámetro de permeabilidad y en consolidación.

1.5 RELEVANCIA DEL ESTUDIO

Este estudio es útil porque a partir del mismo es factible determinar si un suelo afectado por contaminantes y dependiendo de su grado de contaminación, puede llegar a ser apto o no para que sobre él se desarrollen o lleven a cabo proyectos de construcción. En efecto dichos estudios pueden arrojar resultados negativos en cuanto a la compactibilidad y estabilidad necesarias para establecer las bases de dichos proyectos. De otro lado, dichos suelos pueden llegar a resultar no aptos en la medida de los efectos nocivos que puedan generar en la salud humana o medio ambiente.

Todo ello, permitirá que futuros investigadores puedan adoptar los correctivos o medidas necesarias para corregir estos desbalances, o en su defecto para que autoridades municipales o del medio ambiente nieguen las licencias ambientales o de construcción o para la ejecución de proyectos ingenieriles sobre los mismos. De lo contrario, será necesario para determinar los riesgos que para la salud humana o el medio ambiente pueden generar dichos suelos en la medida en que puedan desplegar para determinar si los suelos contaminados por contaminantes deben ser removidos o pueden ser aprovechados.

1.6 ORGANIZACIÓN

El capítulo 1 corresponde al desarrollo introductorio del proyecto donde se expondrá la formulación del problema y se propone la solución al asunto que se va a tratar, partiendo de la observación de un hecho o de una serie de hechos. Así mismo se expone la justificación del trabajo, en razón a la importancia del tema y la relevancia de llevar a cabo esta investigación; el alcance referente al control de lo que se planea llevar a cabo en el proyecto y por último se definen claramente las actividades, procesos y criterios que se llevaron a cabo, y fundamentalmente, los objetivos fijados en esta tesis.

El capítulo 2 se centra en el desarrollo del contexto histórico del proyecto, exponiendo detalladamente y de manera profunda, los conceptos claves de la investigación, consistentes en el suelo y los hidrocarburos. Respecto del suelo, se plantea su definición, origen, composición, tipos conocidos, sus propiedades, sus funciones en cuanto a los hidrocarburos, e igualmente se señalan algunas generalidades para facilitar su entendimiento.

El capítulo 3 corresponde a la metodología empleada para el desarrollo de la investigación en la que se define cada etapa de forma clara, acompañado del registro fotográfico correspondiente.

En el capítulo 4 se exponen los resultados correspondientes a los ensayos de clasificación de suelos, los ensayos de Próctor modificado, los ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable y los ensayos de consolidación unidimensional.

En el capítulo 5 se presenta el análisis de los resultados obtenidos producto de los procesos correspondientes a la investigación esto es: la clasificación de los suelos, los ensayos de Próctor modificado, los ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable y los ensayos de consolidación unidimensional.

El capítulo 6 es el correspondiente a las conclusiones, donde se exponen los resultados de la investigación. Contiene argumentos y afirmaciones relativas a los datos de mediciones experimentales y de lógica, entendida esta como reglas y procedimientos necesarios para discernir si lo expuesto es válido.

En el capítulo 7 se incluyen algunas recomendaciones resultantes de la experiencia adquirida en el transcurso del trabajo de investigación, y que serán de utilidad para

otros estudios posteriores, en la medida en que fijan pautas para el buen desarrollo de futuras experimentaciones, propiciando la obtención de resultados óptimos y seguros.

2. CONTEXTO TEÓRICO

2.1 SUELO

2.1.1 Definición de Suelo

El suelo es la capa superficial que cubre la corteza de la tierra como resultado de la desintegración o alteración física y química de un sustrato rocoso llamado roca madre y de los residuos de las actividades de seres vivos que se asientan sobre ella.

La roca madre es el sustrato mineral sobre el que se asientan los seres vivos, especialmente, plantas y bacterias. [2]

La constitución de la roca madre y sus minerales, definirá la composición de los suelos. A causa de agentes climatológicos, las rocas se van deshaciendo en pequeñas partes que conservan la misma estructura. [2]

2.1.2 Estructura del Suelo

La estructura de un suelo está determinada por la repetición de terrones o agregados estructurales primarios, también llamados peds, los cuales están formados por partículas individuales (minerales, materia orgánica y huecos). De esta formación de agregados son responsables los coloides minerales, los cuales consisten principalmente, de minerales de la arcilla e hidróxidos de hierro y aluminio.

Figura 1. Estructura del suelo



Fuente: <http://tesis.bioetica.org/pab2-1.htm>

La porosidad está determinada por el espacio formado por el arreglo de las partículas. La estructura del suelo describe la disposición de las partes sólidas del suelo y del espacio de poroso situado entre ellas. [3]

La porosidad está determinada por el espacio formado por el arreglo de las partículas. La estructura del suelo describe la disposición de las partes sólidas del suelo y del espacio de poroso situado entre ellas. [3]

2.1.3 Origen del Suelo

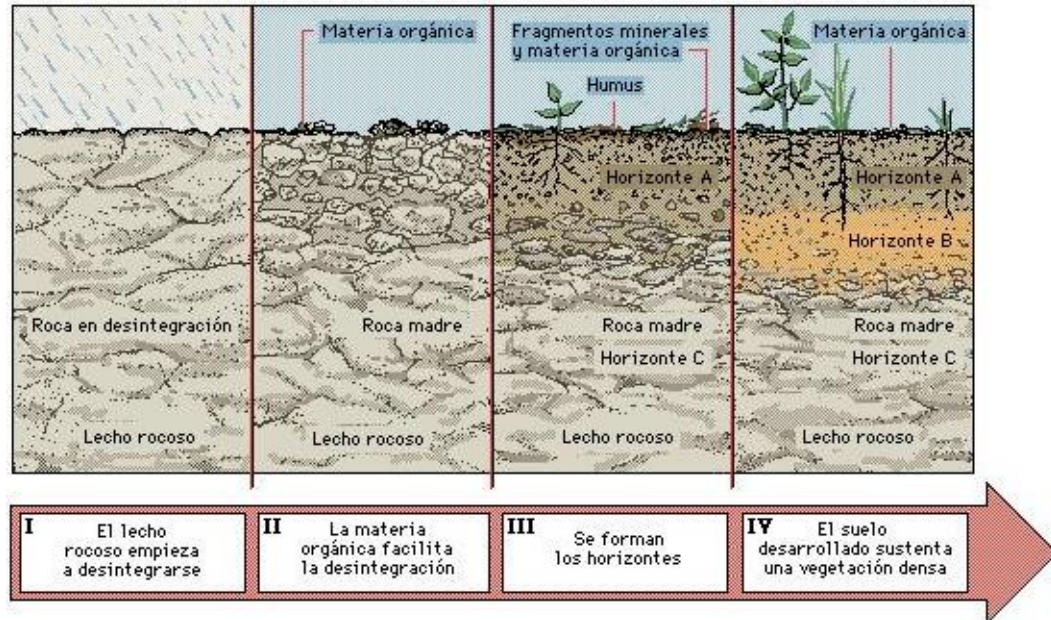
El proceso evolutivo del conocimiento científico que se tiene respecto de los suelos a lo largo del tiempo ha generado cambios respecto a las teorías trazadas sobre su génesis como consecuencia del cambio del concepto de suelo.

Hasta hace un siglo, era común considerar al suelo como roca desintegrada, mezclada con materia orgánica descompuesta; esta idea fue cambiada en Rusia y posteriormente en otros países con el concepto de que el suelo en sí, provenía de las rocas y que su formación se debía al resultado de la meteorización de estas mismas y a la acción de los seres vivos. [4]

La anterior idea ayuda a entender claramente que el suelo es un compuesto órgano-mineral, en tanto está conformado por una parte mineral y otra biológica; al mismo tiempo, este compuesto se convierte en el sustento de otras especies, tanto vegetales como animales. [5]

El término meteorización de las rocas es el concepto empleado por los geólogos para describir el proceso mediante el cual la roca es atacada por los mecanismos de descomposición química y desintegración física, los cuales se atribuyen a la actuación combinada de los factores formadores como el clima, la vegetación, la litología, la geomorfología y el tiempo. [6, 7]

Figura 2. Proceso de formación del suelo



Fuente: <https://despertandoconcienciaplanetaria.wikispaces.com/Suelo>

2.1.4 Agentes Generadores de Suelo

2.1.4.1 Desintegración Mecánica

La meteorización física, también conocida como meteorización mecánica, es el proceso causante de la desintegración o ruptura de las rocas sin generar cambio alguno en su composición química, -esto es, sin producir alteración de los minerales constitutivos de la roca, sino simplemente separación entre ellos-, bajo la acción de fuerzas físicas como la corriente de agua de los ríos, el viento, las olas oceánicas, el hielo glacial y la acción de congelación además de expansiones y contracciones causadas por ganancia o pérdida de calor. [5, 8]

2.1.4.2 Descomposición Química

La meteorización química es el proceso de descomposición de la roca ante la acción del agua o por los agentes gaseosos de la atmósfera como el oxígeno y el dióxido de carbono, causando su disgregación con mayor facilidad, pues los granos de minerales van perdiendo adherencia hasta que se desprenden.

La estructura química de las rocas puede ser alterada mediante la meteorización química, pues los materiales sufren modificaciones originando otros minerales y dando lugar a las características químicas propias de cada suelo.

Como procesos de alteración química podemos citar a la: disolución (las rocas compuestas por las sales que quedaron al evaporarse el agua se disuelven), la carbonatación (el agua carbonatada reacciona con rocas cuyos minerales predominantes sean calcio, magnesio, sodio o potasio, dando lugar a los carbonatos y bicarbonatos), la hidratación (algunos minerales aumentan su volumen en cuanto el agua se incorpora en su estructura), la hidrólisis (el agua se transforma en iones que reaccionan con determinados minerales), y la oxidación (cuando los minerales reaccionan con el oxígeno atmosférico). [9, 10]

Tabla 1. Perfil de meteorización según diversas fuentes

LOVE 1951 LITTLE 1961	VARGAS 1951	SOWERS 1954 - 1963	CHANDLER 1969	GEOLOGICAL SOC. ENG. GROUP 1970	DEERE Y PATTON 1971
ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS, BASÁLTICAS Y ARENISCAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	MARGAS Y LIMOLITAS	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS
VI SUELO	SUELO RESIDUAL	ZONA SUPERIOR	IV COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA
V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL JOVEN	ZONA INTERMEDIA	IVA	V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL HORIZONTE IB HORIZONTE IC (SAPROLITO)
IV ALTAMENTE ALTERADA	CAPAS DE ROCA DESINTEGRADA	ZONA PARCIALMENTE ALTERADA	PARCIALMENTE ALTERADA	IV ALTAMENTE ALTERADA	ZONA DE TRANSICIÓN TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA SAPROLITO
III MODERADAMENTE ALTERADA				III MODERADAMENTE ALTERADA	
II ALGO ALTERADA				II DÉBILMENTE ALTERADA	
I ROCA SANA	ROCA SANA	ZONA INALTERADA	ROCA INALTERADA	IB MUY POCO ALTERADA IA ROCA SANA	IB PARCIALMENTE METEORIZADA ROCA SANA

Fuente: Muelas Rodríguez Ángel. Manual de mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial librería técnica Bellisco

2.1.5 Factores formadores del suelo

Según Hans Jenny -1940-, el suelo está conformado por cinco factores, representados en la siguiente ecuación:

$$S = f (cl, o, r, p, t).$$

Donde "S" representa al suelo, "f" es una función, "cl" al clima, "o" a los organismos, "r" al relieve, "p" a la roca madre y "t" al tiempo.

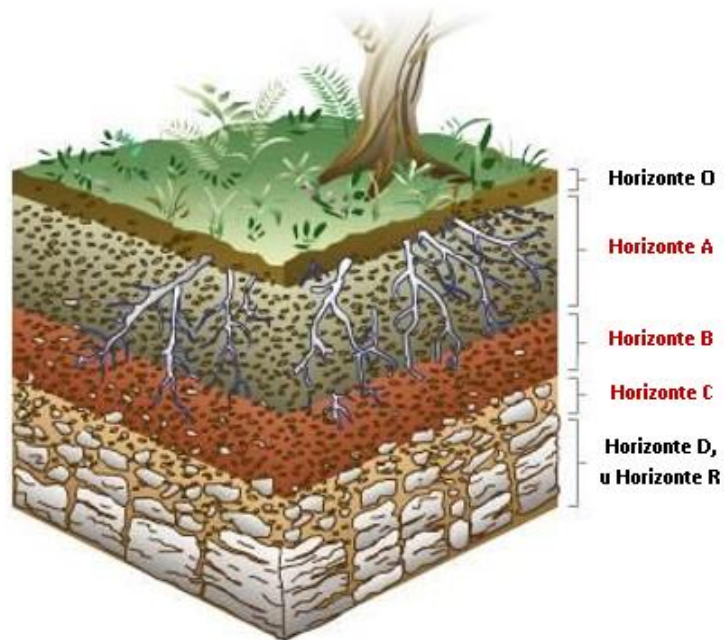
2.1.6 Horizontes del suelo

En un suelo común se distinguen cinco capas verticales denominadas horizontes, que desde la superficie hacia abajo, estas son:

- Horizonte O, ó capa superficial del horizonte A: es la capa más externa del suelo, se puede apreciar como una capa fina de color negro o marrón oscuro; está compuesta por materia orgánica que ha caído de la vegetación y se ha acumulado sobre la superficie. Esta materia pueden ser desechos frescos y parcialmente descompuestos que cubren hojas, troncos, ramas, musgos y líquenes; también incluye los restos de animales e insectos. Se pueden encontrar sobre suelos minerales u orgánicos.
- Horizonte A, o zona de lavado vertical: capa superficial del suelo: se caracteriza por ser orgánicamente rica, ser más blanda y más oscura que los horizontes subyacentes; su color oscuro se debe principalmente a la presencia de compuestos orgánicos en descomposición que forma el humus. También se compone por sustancias minerales, de las cuales, algunas son arrastradas por el agua subterránea. En ella también pueden encontrarse pequeños animales y las raíces de las plantas.
- Horizonte B, o zona de precipitación: el subsuelo: se forma debajo del horizonte A y es menos orgánico pues carece prácticamente de humus, pero es rico en minerales que descienden de la capa superficial, es decir, que fueron arrastrados desde arriba, principalmente, materiales arcillosos, óxidos e hidróxidos metálicos, carbonatos, etc.; se forma en aquellos suelos que han evolucionado durante bastante tiempo (al menos cientos de años).

- El horizonte C, o subsuelo: es la zona de contacto entre el suelo y la roca madre. Está constituido por la parte más alta del material rocoso *in situ* sobre el que se apoya el suelo; no contiene material orgánico pero si se contiene arena, grava y piedras. Su composición determina las características respecto a la oxidación; En esta capa no hay remoción, ni depósito de materiales de suelo por filtración, ni revestimiento. [11, 12, 13, 14]
- El horizonte D, o roca madre, o material rocoso, u horizonte R: Es la zona más profunda del suelo formada por capas continuas del material rocoso subyacente y que no ha sufrido ninguna alteración química o física significativa. Muchas veces constituye el substrato de los suelos. Cuando el suelo es autóctono y el horizonte representa a la roca madre se distingue con la letra D; y cuando el suelo es alóctono y la roca representa no sólo una base física sin una relación especial con la composición mineral del suelo que tiene encima, se distingue con la letra R.

Figura 3. Horizontes del suelo



Fuente: <http://lacienciaes.blogspot.com/2011/11/estructura-del-suelo.html>

2.1.7 Tipos de suelo

2.1.7.1 Suelo inorgánico

Los suelos inorgánicos pueden formarse, ya sea en el sitio en el que permanecen por acción y efecto de la meteorización de las rocas, o también por la acción de los agentes transportadores como la gravedad y los taludes, estos transportados a su vez por el agua: aluviales o lacustres; por viento: eólicos; por glaciares: Depósitos glaciares. [15]

Los componentes inorgánicos de los suelos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Los componentes sólidos son los fragmentos de rocas y minerales procedentes de la meteorización; los líquidos, el agua de infiltración, más o menos cargada de sales en disolución y los gaseosos corresponden a aire atrapado en los poros del componente sólido, más o menos oxigenado según sea la porosidad del material. [16]

Figura 4. Ejemplo de suelo inorgánico



Fuente: http://todoesquimica.bligoo.cl/media/users/10/520382/files/94267/Los_Suelos-Felipe....pdf

2.1.7.2 Suelo orgánico

El suelo orgánico es un tipo específico de suelo que se caracteriza por estar constituido por materiales orgánicos. La materia orgánica del suelo está integrada por compuestos que comprenden todo el material, vivo -plantas y animales- o muerto -restos de organismos en descomposición- además de arena y arcilla, siendo éste, el que más favorece al desarrollo de la vida vegetal.

Por su parte, los microorganismos tales como bacterias, mohos y actinomicetos, son células vivas que constituyen una pequeña parte de la materia orgánica. Estos, tienen la función de descomponer la materia orgánica en dióxido de carbono; de no

ser por su acción, el dióxido de carbono de la atmosfera sería retenido como materia orgánica en el suelo.

La materia orgánica repercute de forma positiva en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En el caso de las propiedades físicas, éstas se ven favorecidas por la materia orgánica pues disminuye la densidad aparente del suelo, mejora la tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua, favoreciendo en general la estructura agregada que limita el arrastre de partículas de suelo, canalizando el paso del agua a través del mismo. En cuanto a las propiedades químicas, éstas se ven favorecidas debido a que la materia orgánica enriquece al suelo con micronutrientes para las plantas y reduce los efectos tóxicos de los cationes. [17]

Figura 5. Ejemplo de suelo orgánico



Fuente: <http://www.compostandociencia.com/2011/06/la-importancia-de-la-materia-organica-html/>

2.1.7.2.1 Humus

El humus es un material orgánico inactivo que proviene de la descomposición de los restos orgánicos por parte de organismos y microorganismos benéficos (hongos y bacterias). Esta sustancia permite que la tierra sea rica y provea gran cantidad de minerales y nutrientes para las plantas en crecimiento, sin afectar la productividad del suelo.

El proceso de formación humus depende de la cantidad de material vegetal que se haya añadido cada año y del tipo de suelo base, y puede verse afectado por el clima y el tipo de organismos presentes. Dependiendo del material madre y las condiciones climáticas el contenido de materia orgánica puede variar, así:

En el caso de los suelos ricos en materia orgánica, principalmente en regiones frías, pueden tener 60–70% de humus.

Tratándose de suelos forestales, estos contienen más de 5 por ciento de materia orgánica. De otra parte, los suelos que han sido arados por un largo tiempo y los suelos tropicales contienen entre 0,5-1,5 por ciento de materia orgánica. [18]

2.1.8 Propiedades físicas de los suelos

2.1.8.1 Textura

La textura del suelo hace referencia a la proporción de componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños como arena, limo y arcilla. La arena y el limo son los productos de la meteorización física y química; la arcilla, por su parte, es un producto de la erosión química, pero a menudo se forma como un mineral secundario precipitado, a partir de minerales disueltos.

La textura es una propiedad importante ya que influye como factor de fertilidad y tiene como habilidad, la de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades. [21, 22, 23, 24]

2.1.8.2 Estructura

La estructura es la forma en que las partículas elementales del suelo se agrupan para generar formas de mayor tamaño, mejor conocidas como agregados. De acuerdo a esto, se distinguen suelos de estructura esferoidal (agregados redondeados), laminar (agregados en láminas), prismática (en forma de prisma), blocosa (en bloques), y granular (en granos). La estructura del suelo afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión. [21, 22, 23, 24]

2.1.8.3 Densidad

La densidad se refiere al peso por unidad de volumen de un objeto. La densidad de partículas es igual a la masa de partículas sólidas dividido por el volumen de partículas sólidas; opera en relación con la porosidad, pues mediante su determinación, se puede obtener la porosidad total del suelo. La Densidad de las partículas del suelo es más baja para los suelos con alto contenido de materia

orgánica, pero a la vez es mucho más poroso. Se conocen dos tipos, real y aparente. [21, 22, 23, 24]

2.1.8.4 Consistencia

La consistencia es la capacidad del suelo para pegarse a sí misma o a otros objetos (cohesión y adhesión, respectivamente), y su capacidad para resistir la deformación y ruptura que pueden aplicar sobre él. Se mide mediante tres niveles de humedad; aire-seco, húmedo y mojado. Si se toma un agregado seco, ofrece una cierta resistencia a partirse, al humedecerse se fractura mejor, y cuando está mojado puede resultar moldeable y más o menos pegajoso. [21, 22, 23, 24]

2.1.8.5 Color

El color del suelo es a menudo la primera impresión que se tiene al verlo. Es muy variable y está determinado por el contenido de materia orgánica, condiciones de drenaje, y grado de oxidación. La mineralogía del suelo es quien influencia su color.

El color rojo indica contenido de óxidos de hierro y manganeso; el amarillo indica óxidos de hierro hidratado; el blanco y el gris indican presencia de cuarzo, yeso y caolín; y el negro y marrón indican materia orgánica. Cuanto más negro el suelo más productivo será, por los beneficios de la materia orgánica. [21, 22, 23, 24]

2.1.8.6 Porosidad

La porosidad es la propiedad que constituye el dominio de las fases líquidas y gaseosas del suelo; por lo tanto, no la ocupan los sólidos como materia orgánica y minerales. La porosidad depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo.

La porosidad está formada por la suma de porcentajes de poros de diferentes tamaños, entre estos podemos distinguir los macro poros y micro poros donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. [21, 22, 23, 24]

2.1.9 Fases del suelo

En el suelo se encuentran implícitas tres fases fundamentales: sólida, líquida y gaseosa. La cantidad, disposición e interacción de dichas fases influye en el comportamiento al suelo. Suele decirse que un suelo está saturado cuando comprende solamente las fases sólida y líquida; por el contrario, se llama no saturado a un suelo que contiene las tres fases.

- Fase sólida: Formada por partículas minerales, generalmente producto de la meteorización. Esta fase constituye el volumen de los sólidos.
- Fase líquida: Formada por el agua que se ubica en los espacios entre las partículas sólidas llamados poros. Cuando todos los poros están llenos del líquido, se dice que está saturado.
- Fase gaseosa: Comprende el aire, y en él cualquier clase de vapores como sulfurosos o carbónico que se encuentran en los poros no saturados. Esta fase rara vez está presente en el suelo.

2.1.10 Contaminantes Orgánicos

En la producción intensiva de cultivos, algunos pesticidas pueden ser de gran utilidad cuando se trata del control de las malezas, enfermedades y plagas; sin embargo, los plaguicidas, deben usarse con especial cuidado, pues el uso inadecuado de un herbicida puede llegar a producir problemas de reproducción, al tiempo que los fungicidas e insecticidas pueden dañar la vida del suelo.*

Por otro lado se tienen los hidrocarburos clorados los cuales son compuestos volátiles solubles en tejido graso usados como disolventes [19]. Sobre el particular, se tiene que *“El uso de pesticidas derivados de hidrocarburos clorados en el control de plagas ha tenido efectos desfavorables en el medio ambiente, pues estos se adhieren a los tejidos de las plantas y se acumulan en los suelos y en el sustrato del fondo de las corrientes, estanques y a la atmosfera, un vez que se han disipado se distribuyen por todo el mundo, contaminando áreas silvestres a gran distancia de las regiones agrícolas, e incluso en las zonas ártica y Antártica”*. [20]

* Los plaguicidas o pesticidas son compuestos que se utilizan para prevenir, mitigar, repeler o controlar alguna plaga, entre estos encontramos los Herbicidas producto fitosanitario cuyo uso específico es el de eliminar plantas no deseadas, los fungidas cuya función es impedir el crecimiento de hongos y mohos y los insecticidas que se usan para matar insectos.

Ha sido comprobado que el uso a largo plazo de insecticidas tales como el lindano, la aldrina, el DDT, el heptacloro y algunos fungicidas en la agricultura y silvicultura han causado molestias en las comunidades debido al lento proceso de degradación de las sustancias, puesto que estas sustancias pueden llegar a la cadena alimenticia a través de la vía suelo-planta-animal-hombre, afectando a los animales y al mismo organismo humano, principalmente a través del hígado.

Contaminantes altamente tóxicos como los bifenilos policlorados (PCB), los hidrocarburos clorados (CHC) y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) pueden llegar al suelo desde el aire y muchos de ellos pueden llegar a ser difíciles de degradar. Las investigaciones actuales revelan que apenas serán absorbidos por las raíces de las plantas y no van a ser lavados; sin embargo, pueden llegar a pasar a través de la contaminación de los productos cosechados a la cadena alimentaria.

2.1.11 Importancia del estudio de suelos

Hoy en día es un asunto de vital importancia conocer las características y técnicas necesarias para evaluar las condiciones en las que se encuentra un terreno antes de llevar cabo el desarrollo de un proyecto ingenieril. Por ejemplo, nos permite analizar tanto las estructuras naturales como las artificiales que son compatibles, o hechos de tierra, o estructuras que están enterradas en los suelos.

La obtención de las muestras suelo en campo apropiadas para el pertinente desarrollo de las pruebas laboratorio, son una indispensable etapa que debe llevarse a cabo por parte del ingeniero para llegar a resultados razonablemente dignos de crédito, siendo esencial conocer las propiedades físicas y mecánicas del terreno, a fin de garantizar la seguridad de cualquier edificación.

Estas dos importantes actividades: el muestreo de los suelos y la realización de las pruebas necesarias de laboratorio, resultan estrechamente ligadas pues es el programa de pruebas de laboratorio el que impone los requerimientos para los ejemplares obtenidas en el muestreo, y de la misma forma, el programa de pruebas no puede conocerse sin efectuar previamente el correspondiente muestreo, siendo necesario definir, en términos de la naturaleza, los problemas que puedan resultar en una obra.

La concepción razonable del proyectista está centrada en su análisis, pues para obtener los resultados definitivos de su trabajo, primero debe realizar las respectivas

pruebas de clasificación del suelo, ubicando correctamente el problema, y de acuerdo a éste, bajo su propio criterio estará en capacidad de tomar las alternativas más viables para dar solución al problema en particular. [25, 26]

2.1.12 Los suelos de Colombia

A través del tiempo el medio ambiente ha ido evolucionando y con el todos sus componentes, dentro de los cuales se destaca el suelo; éste, además de ser un recurso natural es el soporte de la vida terrestre y su desarrollo evolutivo se ha visto afectado por las condiciones atmosféricas, el relieve, el material parental, el tiempo y los procesos fisicoquímicos y biológicos que se lleven a cabo en él.

Los principales tipos de suelos en Colombia se pueden identificar gracias a los elementos biofísicos que los contienen, sus características y su evolución en el tiempo. Es así como se encuentran los entisoles o Inceptisoles, que son los de menor grado evolutivo y los más sobresalientes.

En la región de la alta montaña, ubicada en la zona peri glaciar, existe una continua formación de agujas de hielo, que al derretirse durante el día aumentan el volumen del suelo, degradándolo; sin embargo, en zonas de pendiente, el agua fundida desplaza micro agregados por arrastre, generando así un manto de gelifusión que fluye fácilmente, desestabilizando las vertientes.

Por otro lado, en zonas oscuras, donde existen acumulaciones de piroplastos debido a la influencia de cenizas volcánicas, se generan suelos llamados Andosoles o Andisoles, en los cuales se presenta acumulación de materiales húmicos asociados con alófanos; entonces, los productos de alteración mineral reaccionan con los compuestos producidos por la descomposición de material orgánico, para formar un complejo de adsorción orgánico-mineral, originando horizontes oscuros. Este tipo de suelos se pueden observar en regiones de alta producción cafetera, como: Risaralda, Quindío y Caldas.

En la región de la Amazonía y la altillanura de la Orinoquía se encuentran los Ultisoles y Oxisoles, suelos de alta evolución, relacionados con climas húmedos y muy húmedos. Gracias a la limitada presencia de minerales alterables en su material parental y el avanzado tiempo de evolución, son calificados como los suelos con mayor grado de alteración del país.

El departamento del Vaupés tiene zonas de arenas blancas; cuando éstas tienen condiciones de muy alta precipitación, el hierro forma compuestos solubles y se elimina. Como resultado del proceso van quedando capas remanentes de arena blanca que reducen la fertilidad. En estos casos los materiales orgánicos de la superficie migran y se acumulan en profundidad creando una zona compactada de material húmico, generalmente relacionada con un nivel freático alto que determina una vegetación limitada, no de bosque exuberante, sino de catinga.

Por otro lado, la región del Caribe contrasta con las otras regiones ya mencionadas; ella aporta suelos asociados a la presencia de arcillas expandibles, acumulación de sales, Aridisoles y Mollisoles.

En la planicie Caribeña, los materiales sedimentarios generan dos tendencias: suelos con un horizonte que propicia el desarrollo agrícola, es decir, los Mollisoles y suelos que están compuestos principalmente de un material arcilloso de tipo montmorillonita. Debido al clima estacional, se generan grietas por donde el material del suelo migra hacia abajo y hacia arriba; estos se denominan Vertisoles, los cuales tienen un campo de aplicación bastante reducido debido a su inestabilidad, así como el alto contenido de sales. [27]

2.2 PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS

El procedimiento para la determinación de la permeabilidad del suelo resulta ser un proceso de gran utilidad cuando se pretende estudiar la relación entre “*permeabilidad y relación de vacíos*”; sin embargo, cuando no se cuenta con facilidades técnicas para realizar trabajos de medición en campo, la determinación de la permeabilidad de un suelo en el laboratorio resulta ser una alternativa más asequible que la determinación *in situ*.

realización de un estudio previo, dado que los asentamientos de las estructuras se rigen por el análisis de los resultados de este procedimiento.

El coeficiente de permeabilidad en cada caso concreto puede determinarse directamente en el laboratorio mediante dos métodos generales, conocidos como el “método de cabeza constante” y el “método de cabeza variable”, basados en la ley de *Darcy*. [28]

2.2.2 Generalidades

Mediante el “método de cabeza variable” se busca la determinación del contenido de humedad en suelos finos (arenas finas con limos o arcillas).

Para que un material sea poroso, también debe ser permeable; vale decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. Ello ocurre cuando las partículas minerales que conforman los suelos dejan vacíos entre ellas, los cuales a su vez se encuentran interconectados permitiendo el flujo de agua a través de ellos, convirtiendo los suelos en materiales permeables al agua. De otro lado, al presentarse la existencia de fallas, grietas, juntas, u otros defectos estructurales, suele aumentarse la permeabilidad.

El coeficiente de permeabilidad (k) es “una constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso”.

La permeabilidad de un suelo está dada en la mayor o menor posibilidad con que el agua puede fluir a través de los vacíos continuos del suelo.

De otro lado, el grado de permeabilidad se determina mediante la aplicación de una diferencia de presión hidráulica a una muestra de suelo totalmente saturada. [29]

2.2.3 Ley de Darcy

Una de las piezas más útiles para comprender el estudio de la mecánica de los suelos es la llamada ley de *Darcy*, esto es, una ley fundamental que rige la filtración de agua a través de los suelos y la cual lleva el mismo nombre del científico que la estableció *Henry Darcy*, cuyo trabajo ha sido analizado y puesto a prueba por muchos investigadores, haciendo que esta teoría mantenga su validez para la mayoría de los tipos de flujo de fluido en los suelos.

2.2.3.1 Coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad puede ser determinado a partir de dos métodos generales de laboratorio conocidos como el método de cabeza variable y el método de cabeza constante, ambos basados en el uso de la ley de Darcy, con las condiciones de un flujo laminar.

Según Bowles (1980) ninguno de los dos ensayos permite obtener valores de coeficiente de permeabilidad de un suelo demasiado confiables. Las principales razones de ello, son:

1. 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.
2. La orientación in situ de los estratos respecto al flujo de agua es probablemente diferente en el laboratorio.
3. Las condiciones de frontera son diferentes en el laboratorio. Las paredes del molde de permeabilidad mejoran los caminos del flujo con respecto a los caminos naturales en el terreno. [30]

Todos los suelos presentan un grado de permeabilidad ya sea mayor o menor; de hecho, el propio granito no es totalmente impermeable, lo que ocurre es que la poca cantidad de agua que pasa por unidad de tiempo se evapora al entrar en contacto con el aire. También cabe aclarar que el coeficiente de permeabilidad no solo depende de las propiedades del material poroso, sino del líquido que circula por el mismo, principalmente de su viscosidad y su densidad. [29]

2.2.4 Clases de permeabilidad del suelo

En ocasiones, hallar un valor representativo de la permeabilidad a partir de mediciones reales, resulta convirtiéndose en un trabajo bastante tedioso, dada la existencia de fisuras y cárcavas. Por esta razón, un estudio previo de los perfiles resulta ser una opción indispensable para la comprobación de dichas mediciones.

El coeficiente de permeabilidad es expresado en términos de velocidad del flujo de agua a través de éste, durante un período determinado. Generalmente se expresa, bien como una tasa de permeabilidad en centímetros por hora (cm/h), milímetros por hora (mm/h), o centímetros por día (cm/d), o, como un coeficiente de

permeabilidad en metros por segundo (m/s), o en centímetros por segundo (cm/s).
[31]

Tabla 2. Clases de permeabilidad del suelo



Fuente: FAO. Permeabilidad del Suelo [Internet]. Washington, 2009. Disponible en ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm#top

A continuación pueden apreciarse las tablas de valores relativos de permeabilidad según el tipo de suelo por dos diferentes autores:

Tabla 3. Tabla de valores relativos del coeficiente de permeabilidad en diferentes tipos de suelos, según Terzaghi y Peck

Permeabilidad relativa	Valores de K (cm/seg)	Suelo típico
Muy permeable	$> 1 \cdot 10^{-1}$	Grava gruesa
Moderadamente permeable	$1 \cdot 10^{-1}$ a $1 \cdot 10^{-3}$	Arena, arena fina
Poco permeable	$1 \cdot 10^{-3}$ a $1 \cdot 10^{-5}$	Arena limosa, arena sucia
Muy poco permeable	$1 \cdot 10^{-5}$ a $1 \cdot 10^{-7}$	Limo y arenisca fina
Impermeable	$< 1 \cdot 10^{-7}$	Arcilla

Fuente: Terzaghi K. y Peck R., 1980

Tabla 4. Tabla de valores relativos del coeficiente de permeabilidad en diferentes tipos de suelos según, Casagrande y Fadum

Tipos de suelo	Valores de K (cm/seg)
Gravas gruesas y finas	$1 \cdot 10^2$ a $1 \cdot 10$
Arenas gruesas y finas	$1 \cdot 10^{-1}$ a $1 \cdot 10^{-3}$
Arenas muy finas	$1 \cdot 10^{-4}$ a $1 \cdot 10^{-6}$
Limos y arcillas	$1 \cdot 10^{-7}$ a $1 \cdot 10^{-11}$

Fuente: Casagrande y Fadum, 1940

Respecto al flujo en el suelo, *Darcy* dedujo que en cuanto las cargas hidráulicas no fueran tan grandes en las arenas, el flujo de agua sería laminar. Esto, confirma el mismo fenómeno de un flujo laminar para suelos finos como arcillas y limos, pues la velocidad a la que circulaba el agua en éstos, es mucho menor. [31]

Ahora respecto a la velocidad de descarga, se tiene como aquella que podemos deducir directamente mediante la ley de *Darcy*, mientras que la velocidad de filtración es la velocidad media de avance del agua en dirección del flujo.

La velocidad con la que el fluido atraviesa el material puede depender de tres factores básicos:

1. La porosidad del material.
2. La densidad del fluido considerado, afectada por su temperatura.
3. La presión a la que se encuentra sometido el fluido.

Nutting en 1930 estableció la hipótesis de que la velocidad de descarga es inversamente proporcional al coeficiente de viscosidad (η) y se define así como un nuevo coeficiente:

$$k' = \frac{\eta}{\gamma} * k; \text{ El cual depende únicamente las características del medio poroso.}$$

2.2.5 Factores que determinan la permeabilidad

1. La influencia de la relación de vacíos de suelo, la cual es posible analizar teóricamente.
2. La influencia de la temperatura del agua. Para poder comparar los resultados de los ensayos de permeabilidad con mayor facilidad es conveniente que nos refiramos a una temperatura constante, que sea por lo general de 20°C.

3. La influencia de la estructura y la estratificación, pues un suelo puede tener diferentes permeabilidades en estado inalterado y remoldeado.

El coeficiente de permeabilidad puede llegar a variar durante la prueba, en tanto existen ocasiones en que partículas de suelo quedan libres debido al remoldeo y el agua al fluir las mueve y reacomoda ocasionando la obstrucción de los canales; otra situación que puede llegar a presentarse es cuando las partículas son arrastradas al exterior de la muestra, ocasionando turbidez del agua de salida. [31]

Tanto la estructura como la textura influyen en la permeabilidad de un suelo, ya que éstas guardan una estrecha relación con el tamaño y el número de los poros, los cuales son de gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). [32]

Tabla 5. Permeabilidad de un suelo con relación al tipo de estructura presente

Tipo de estructura		Suelo típico
Laminar	Gran traslapo	De muy lenta a muy rápida
	Ligero traslapo	
En bloque		
Prismática		
Granular		

Fuente: FAO. Permeabilidad del Suelo [Internet]. Washington, 2009. Disponible en ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm#top

Figura 7. Tipos de estructura del suelo



Fuente: Neyoi Siari C. Principales factores que afectan la absorción de nutrientes en las plantas [Internet]. S.f. Disponible en <http://fisiolvegetal.blogspot.com/2012/10/principales-factores-que-afectan-la.html>

Tabla 6. Permeabilidad de un suelo con relación al tipo de textura presente

Suelo	Textura	Permeabilidad
Suelos arcillosos	Fina	De muy lenta a muy rápida
Suelos limosos	Moderadamente fina	
	Moderadamente gruesa	
Suelos arenosos	Gruesa	

Fuente: FAO. Permeabilidad del Suelo [Internet]. Washington, 2009. Disponible en ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm#top

Tabla 7. Variación de la permeabilidad según su textura

Tipos de suelo	Permeabilidad
Arenosos	5,0
Franco arenosos	2,5
Franco	1,3
Franco arcillosos	0,8
Arcillo limosos	0,25
Arcillosos	0,05

Fuente: FAO. Permeabilidad del Suelo [Internet]. Washington, 2009. Disponible en ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm#top

4. La influencia de la presencia de agujeros, fisuras, etc., a causa de efectos naturales, pues las características de permeabilidad de los suelos pueden llegar a cambiar, convirtiendo incluso una arcilla muy impermeable en el material más poroso.

2.2.6 Antecedentes del estudio de la permeabilidad

El ingeniero *Henry Darcy* investigó las características del flujo del agua a través de filtros, formados precisamente por materiales térreos.

En 1865 *Henry Darcy* descubrió una ley, en la cual describe con base en experimentaciones de laboratorio, un modelo matemático que indica el flujo de los fluidos a través de medios porosos. La ley que lleva su nombre fue obtenida en forma experimental, trabajando con medios homogéneos y con un solo fluido; ésta, se ha vuelto pieza fundamental en la mecánica de los suelos.

Velocidad Observada = Velocidad Lineal Media/Coeficiente.

“Donde dicho coeficiente depende de la tortuosidad del medio poroso, y aproximadamente puede ser de 1.0 a 1.18 en arenas (Freeze y Cherry, 1979)”

A continuación se describe la relación de la ecuación anterior con la velocidad de Darcy.

Velocidad Lineal Media = Velocidad Darcy/ m_e

Donde, m_e = porosidad eficaz

Velocidad de Darcy o Velocidad de Flujo = Caudal/Sección Total [s, jb]

BELGRAD, 1876, fue el primero en establecer una clara distinción entre formaciones permeables y formaciones impermeables, en su libro “ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA PARTE SUPERIOR DEL SENA”

PARAMELLE, 1856. Publica con gran éxito y difusión en Europa su libro “el arte de descubrir fuentes”.

DAUBRE, 1887. Publica el primer tratado de geología aplicada a la prospección de las aguas subterráneas, bajo el título: “el agua subterránea en la época actual y en las antiguas”.

JULES DUPUIT, 1863. Fue el primero en aplicar la ley de Darcy para calcular el flujo de agua a un pozo.

ADOLPH THIEM, 1870 introdujo la teoría de flujo de aguas hacia pozos y galerías en régimen permanente, pero no fue efectivo en régimen transitorio.

GUNTHER THIEM, 1906. Continúo los trabajos de su predecesor, desarrollándolos mejor.

DEGLEE (holandés); FORCHEIMER (austriaco) y MUSKAT (norteamericano). Dieron aportes sustanciales al desarrollo de la teoría desarrollo sobre captaciones de agua en régimen permanente. [33]

2.3 CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS

2.3.1 Generalidades

Al estar sometidos los materiales a cambios en sus condiciones de esfuerzo, pueden llegar a experimentar deformaciones. Hoy en día, para la mayoría de las aplicaciones prácticas, las características de esfuerzo-deformación de los materiales estructurales tales como el acero y el concreto están muy bien comprendidas, pues ellas pueden determinarse con razonable grado de confianza en el laboratorio.

Sin embargo, a diferencia de los suelos, éstos, al estar bajo cargas pequeñas, pueden llegar a presentar deformaciones mucho mayores que los elementos estructurales, y deformaciones que no se producen de forma usual, sino que se desarrollan en el transcurso del tiempo. [31]

2.3.2 Generalidades de la compresibilidad

Cuando hablamos de la compresibilidad de un suelo, nos referimos a aquella propiedad según la cual, un suelo por efectos de la carga que soporta es susceptible de reducir su volumen, siendo ésta, una de las propiedades más útiles para comprender la mecánica de los suelos, y cuyo desarrollo hasta la fecha, se sustenta sobre bases relativamente empíricas influenciadas por el doctor Karl Von Terzaghi. [31]

Es por todos conocido que en la medida en que en los suelos aumenten la proporción de partículas pequeñas, la compresibilidad de los mismos se hace aún mayor; es por esta razón que en los suelos de textura gruesa -los cuales tienen partículas en contacto-, la compresibilidad es mínima, al tiempo que en los suelos de grano fino que contienen materia orgánica, ésta puede llegar al máximo.

Experimentalmente no es fácil determinar los parámetros de compresibilidad de los depósitos de suelo; ello debido a que los esfuerzos que se inducen dentro de él, son un problema sin solución exacta debido a la falta de homogeneidad anisotrópica del medio. [35]

Ahora bien, para proyectar una estructura de manera adecuada es necesario conocer la interacción existente entre el suelo y estructura, pues los elementos mecánicos que actúan sobre esta, se ven influenciados por las deformaciones del suelo; ello quiere decir, que cuando se presenta la aparición repentina de condiciones no previstas en el suelo, son factibles movimientos fuertes de los cimientos que serán transmitidos a la estructura, ocasionando daños. Algunos de los ejemplos de compresibilidad en diversos suelos son los siguientes:

- Las gravas y las arenas son prácticamente incompresibles. Si se comprime una masa húmeda de estos materiales, no se produce ningún cambio significativo en su volumen.
- Las arcillas son compresibles. Si se comprime una masa húmeda de arcilla, la humedad y el aire pueden ser expelidos, lo que trae como resultado una reducción de volumen que no se recupera inmediatamente cuando se elimina la carga.

Los suelos de grano fino pueden clasificarse con arreglo a tres clases de compresibilidad sobre la base de su límite líquido, cuando contiene por lo menos 50% de limo + arcilla, Estas clases son las siguientes:

- Compresibilidad baja: LL inferior a 30;
- Compresibilidad media: LL de 30 a 50;
- Compresibilidad alta: LL superior a 50.

En general, la compresibilidad es aproximadamente proporcional al índice de plasticidad. Mientras mayor es el IP, mayor es la compresibilidad del suelo. A partir de la teoría de consolidación, *-ideada originalmente por Karl VonTerzaghi-*, podemos establecer la relación entre las presiones aplicadas a un suelo y su reducción de volumen. [36]

2.3.3 Causas de los asentamientos

Whitlow (1996), estableció que la magnitud de los asentamientos puede estimarse tomando en cuenta varios mecanismos de suelo que son causa de asentamientos:

Compactación: es un proceso que experimenta el suelo como consecuencia de la aplicación de cargas transitorias de corta duración, en el cual sus partículas se fuerzan a un estado de acomodo, reduciendo de esta manera su volumen y expulsando el aire contenido en los poros.

Movimientos por cambios de humedad: el volumen en algunos tipos de suelos puede llegar a expandirse o a contraerse a medida que su contenido de agua aumente o disminuya, respectivamente.

Efectos del abatimiento de nivel de agua subterránea: la reducción del nivel freático del agua circundante como efecto del bombeo de agua de una excavación, puede llegar a ocasionar una reducción del volumen de las arcillas cuando su contenido de humedad disminuya; además, la reducción de la presión hidrostática en los poros tiene como consecuencia un aumento del esfuerzo efectivo de sobrecarga en las capas que están por debajo.

Efectos de los cambios de temperatura: los suelos arcillosos al situarse debajo de cimentación de hornos, estufas, calefactores y calderas pueden contraerse de manera severa. En cuanto a los limos, arenas finas y materiales calcáreos como el yeso, puede producirse un levantamiento por heladas, cuando las bajas temperaturas son constantes.

Efectos de la infiltración y las socavaciones: algunos suelos arenosos pueden acabar socavándose debido al arrastre de partículas finas por la acción de corrientes de agua.

Pérdida de soporte lateral: cuando se realiza la excavación de pozos profundos junto a las cimentaciones, puede generarse desplazamientos de los mismos cimientos, generando fallas serias.

Cargas: Las cargas representan una causa del asentamiento; una vez se realiza la aplicación de éstas, la reacción del suelo dependerá de su naturaleza, intensidad y duración. [31]

2.3.4 Fenómeno de la consolidación en los suelos

La consolidación de un suelo es un proceso en el cual, por efecto de la actuación de un aumento de cargas por sedimentación sucesiva, se produce una reducción del volumen de la masa del suelo en razón a la disminución de agua en este mismo; es decir, que debido al peso de las cargas que se depositan encima y al ser el agua el fluido que se encuentra en los espacios de vacíos o poros, esta es expulsada de entre las partículas. (Durante este proceso no se da una reducción del volumen del agua, ni de la partículas de suelo; sin embargo, como consecuencia de las capas que comprimen los estratos del suelo, estas tienden a deformarse y reacomodarse; por otro lado, el volumen de poros si tiende a disminuir).

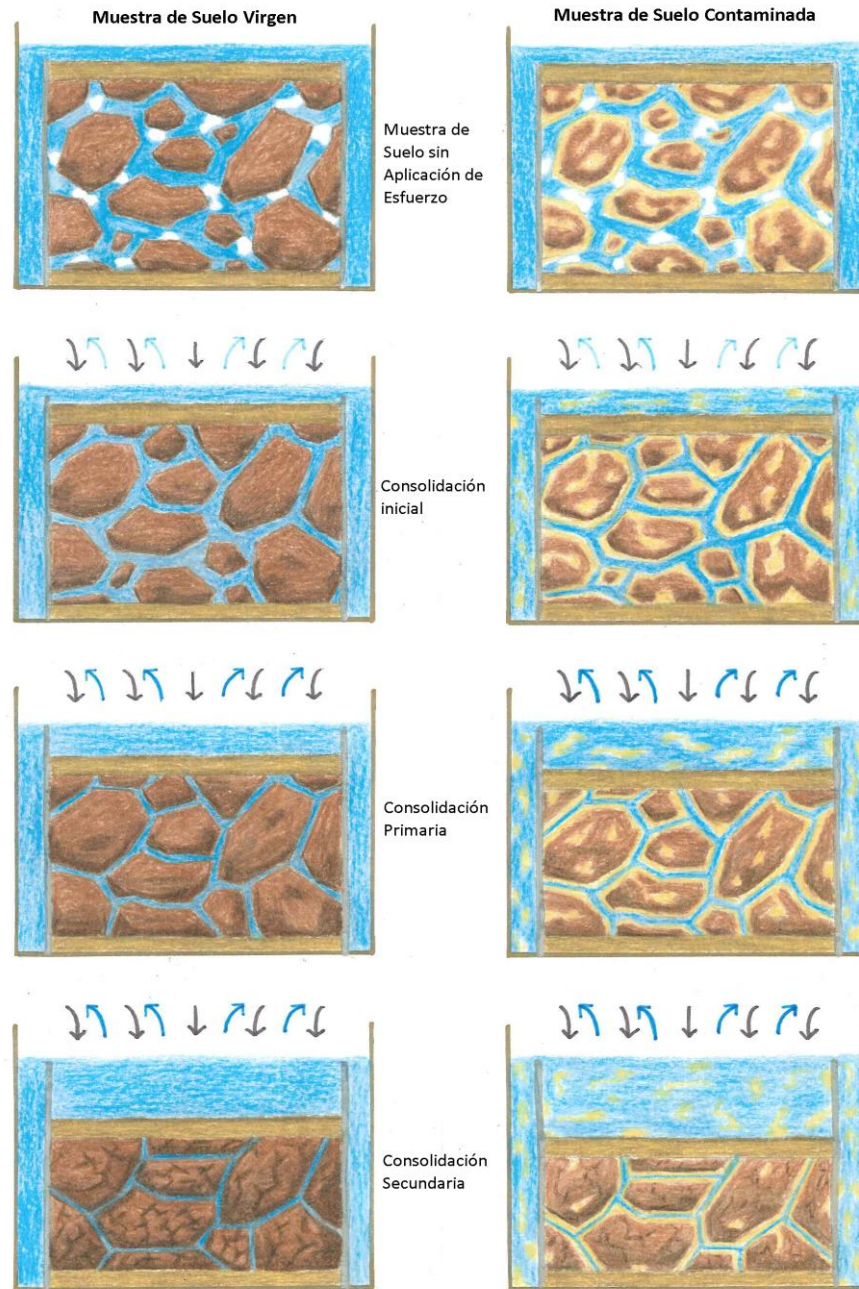
Debido al rápido drenaje del agua de los poros, esta reducción del volumen de la masa del suelo en un sentido vertical genera un asentamiento. El asentamiento por consolidación que se da más que todo, en suelos granos finos y cohesivos tales como las arcillas y los limos plásticos; todo ello depende del tiempo.

2.3.5 Etapas de la consolidación

El asentamiento se divide en tres grandes etapas:

1. Consolidación inicial: Ocurre cuando el volumen de la masa de un suelo experimenta una reducción de forma casi instantáneamente al encontrarse bajo la aplicación una carga vertical, debido principalmente a que el aire contenido en los vacíos del suelo se comprime o es expulsado.
2. Consolidación primaria: Ocurre cuando el volumen de la masa de un suelo experimenta una reducción causada por la aplicación de una carga permanente y también en parte a la expulsión del agua de los vacíos; esto a su vez se encuentra acompañado por una transferencia de carga del agua a las partículas sólidas del suelo, debido a la disipación de la presión de poros.
3. Consolidación secundaria: Ocurre cuando el volumen de la masa de un suelo experimenta una reducción debido a la aplicación de una carga vertical y al acomodo de la estructura interna de la masa, luego de que la mayor parte de la carga ha sido transferida a las partículas sólidas de suelo.

Figura 8. Compresibilidad de una muestra de suelo Virgen y una muestra de suelo Contaminada



Fuente: autor

2.4 LÍMITES DE ATTERBERG O LÍMITES DE CONSISTENCIA

2.4.1 Generalidades

Los límites de *Atterberg* o límites de consistencia, son propiedades índices del suelo con las cuales podemos cuantificar su plasticidad, identificarlo y clasificarlo. El método usado para la medición de estos límites de humedad fue ideado en 1911 por el científico *Albert Atterberg*, y de ahí deriva su nombre.

En suelos finos que poseen algo de cohesión, según su naturaleza y en función del contenido de humedad en la masa, pueden encontrarse en estado sólido, semi-sólido, plástico o semi-líquido. Los cambios de estado según el contenido agua o humedad, varían de un suelo a otro.

Para la mecánica de suelos, la determinación de los límites de consistencia junto con la granulometría resultan ser temas de gran interés determinar, pues son la base para juzgar la calidad del suelo con la que se pretende usar en terraplenes de cortinas, sub-base y bases de pavimentos. [15, 37, 38, 39]

2.4.2 Plasticidad y límites de consistencia

La consistencia es la resistencia al flujo, relacionada con la fuerza de atracción entre partículas. La medición de este parámetro se puede realizar a partir de los horizontes del perfil del suelo. [37]

Los límites definidos por Atterberg, son:

Límite Líquido: El Límite Líquido LL es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado líquido. En este estado tiende a comportarse como un fluido viscoso y fluye bajo su propio peso.

Límite Plástico: El Límite Plástico LP es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado plástico. La mezcla en este estado tiende a deformarse bajo ligera presión a cualquier forma.

Límite de Contracción: El Límite de Contracción es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado semi sólido. Es la humedad máxima del suelo en la cual una reducción del contenido de humedad no causa una variación del volumen del suelo. [39, 40]

La plasticidad es una propiedad que presentan los suelos para aceptar deformaciones hasta cierto límite, sin agrietarse o producir rebote elástico. [15]

Como se mencionó con anterioridad, al variar el contenido de humedad de un suelo, cambia su consistencia. Los límites de Atterberg se calculan a partir de una muestra de suelo tamizada por la malla N °40 y la poción que queda retenido, se descarta. [15]

2.5 HIDROCARBUROS

2.5.1 Definición

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos que consisten totalmente de átomos de carbono (C) y de hidrogeno (H) unidos tetraédricamente por enlaces covalentes, así como todos los compuestos orgánicos.

La mayoría los hidrocarburos se encuentran en la tierra de forma natural en el petróleo crudo, donde la materia orgánica ya descompuesta proporciona una abundancia de carbono e hidrógeno que, al unirse, pueden concatenarse para formar cadenas aparentemente ilimitadas. De acuerdo a su tamaño molecular, los hidrocarburos se distribuyen en varias o múltiples fracciones, de las cuales, las más pesadas son de 22 o hasta de 40 átomos de carbono.

Los hidrocarburos se caracterizan principalmente por sus enormes yacimientos como los combustibles fósiles, lo cual los vuelve una fuente de energía esencial para la economía y en la producción ecológica de síntesis, alcanzando una considerable importancia industrial; sin embargo, al mismo tiempo constituyen una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero.

2.5.2 Generalidades

Los hidrocarburos se encuentran en la naturaleza y se forman bajo una gran presión dentro de la tierra *-por debajo de 150 km de profundidad-* y mediante procesos geológicos son llevados a zonas de menor presión, donde pueden llegar a formarse acumulaciones comerciales *-tales como las de petróleo, gas natural, carbón, y otras sustancias fósiles contenidos en grandes cantidades-*.

Se encuentran en muchas plantas, como por los terpenos, los carotenoides y el caucho; los hidrocarburos simples son productos del metabolismo de algunos

microorganismos. En el espacio y en materia interestelar pueden encontrarse hidrocarburos, la mayoría en forma de metano y etano.

Las moléculas más complejas de hidrocarburos poseen una alta estabilidad termodinámica; Sólo el metano, que es la molécula más simple (CH₄), se puede formar bajo condiciones de presión y temperatura más baja. Los hidrocarburos restantes no se forman espontáneamente en las capas superficiales de la tierra. [13, 41, 42, 43]

2.5.3 Tipos de hidrocarburos

Basándonos en su estructura molecular, los hidrocarburos, pueden clasificarse en dos tipos, los alifáticos y los aromáticos; los alifáticos a su vez, se pueden clasificar en alcanos, alquenos y alquinos. [13, 41, 42, 43]

2.5.3.1 Hidrocarburos alifáticos

Los Hidrocarburos alifáticos están formados por cadenas de átomos de carbono en las que no hay estructuras cíclicas; se les denomina en general, hidrocarburos de cadena abierta o acíclicos. [13, 41, 42, 43]

2.5.3.1.1 Hidrocarburos saturados

Los hidrocarburos alcanos o parafinas *-la parafina es un compuesto con estructura similar a la de los alcanos-*, son los que poseen la estructura más simple, pues solo presentan uno o más átomos de carbono que comparten enlaces simples con átomos de hidrógeno y con otros átomos de carbono.

Reciben el nombre también de hidrocarburos saturados pues sus moléculas están saturadas con hidrogeno, ya que cada carbono se une con el mayor número posible de átomos. Estos hidrocarburos son la base combustibles derivados del petróleo obteniéndose por destilación fraccionada. La fórmula general para alcanos alifáticos es C_nH_{2n+2}. [13, 41, 42, 43]

2.5.3.1.2 Hidrocarburos Insaturados

Son hidrocarburos en los que, *-a diferencia de los hidrocarburos saturados-*, el átomo de carbono no está unido a otros cuatro átomos por enlace simple, sino cuya cadena de carbono tiene al menos un enlace doble o un enlace triple.

Los alquenos u olefinas son compuesto químicos insaturados que contienen uno o varios enlaces dobles carbono-carbono, por lo que tienen dos átomos de hidrógeno menos que sus correspondientes alcanos. [13, 41, 42, 43]

En cuanto a los alquinos, son compuestos químicos insaturados que contienen un par de carbonos unidos por un triple enlace, lo que significa que tienen cuatro átomos de hidrógeno menos que los alcanos correspondientes.

2.5.3.2 Hidrocarburos aromáticos

Reciben este nombre debido a los intensos aromas que presentan generalmente. Son aquella clase de hidrocarburos que poseen propiedades específicas asociadas con el anillo del benceno, el cual, es una molécula cíclica de forma hexagonal y con un orden de enlace intermedio entre un enlace sencillo y uno doble. Además, posee seis grupos de carbono-hidrógeno unidos a cada uno de los vértices del polígono.

En la actualidad, los principales usos de los compuestos aromáticos como productos puros son: la síntesis química de plásticos, caucho sintético, pinturas, pigmentos, explosivos, pesticidas, detergentes, perfumes y fármacos. [13, 41, 42, 43]

2.5.4 Glicerina

La glicerina también conocida como 1, 2, 3-propanotriol o glicerol es un alcohol trivalente líquido, incoloro e inodoro que presenta la formula $C_3H_8O_3$. Dicho elemento presenta un punto de ebullición alto a los 290 °C y su densidad es de 1.26 g/cm³. Su gran utilidad comercial se debe en parte a que presenta propiedades disolventes que le permiten la fácil absorción del líquido y deshacerse fácilmente en el agua o el alcohol; sin embargo no se disuelve en aceites.

Figura 9. Apariencia de la glicerina



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

Esta sustancia presenta una textura espesa y un pH neutro; es decir, que su grado de acidez y alcalinidad es de 7. La glicerina también es de sabor dulce y se vuelve gelatinosa al enfriarse, siendo ello apreciable al tacto y a la vista. Se extrae en el proceso de la fabricación de jabones y en el mercado es un producto muy valioso en la confección de muchos productos tales como productos medicinales, cosméticos, en la industria de textiles y explosivos, también se le su uso en la fabricación de plásticos, barnices y pinturas

La glicerina es latamente higroscópica, esto quiere decir que tiene la capacidad de atraer la humedad del medio circundante. [44, 45, 46, 47]

2.5.5 Antecedentes: derramamiento de hidrocarburos e impactos

El uso de hidrocarburos se ha constituido en una práctica generalizada en muchos países, dependiendo de su desarrollo industrial. En México por ejemplo, a raíz del uso cada vez más frecuente del petróleo y sus derivados, *-causado por los bajos precios de los hidrocarburos en 1970-*se generó una mayor demanda energética, generando con ello altos niveles de contaminación sobre el medio ambiente. Tal circunstancia hizo necesario implementar políticas serias de reestructuración de la industria del petróleo, con impacto sobre la economía del país. (Ortínez y otros, 2013).

Por su parte en Colombia, si bien la industria del Petróleo se vislumbraba como la más próspera del país, lamentablemente se convirtió en el objetivo principal de grupos guerrilleros, quienes entre 1986 y 1998 realizaron permanentes atentados contra oleoductos e instalaciones petroleras, causando con ello el derramamiento de cerca de 2 millones de barriles de petróleo y generando de contera graves daños en ríos, ciénagas y suelos en general, con la consecuente afectación de la industria agrícola, pesquera y pecuaria de las regiones por donde dichos oleoductos transitan, ubicadas en la zona alta de la llanura araucana, en la región de la cueca del río Catatumbo, en la llanura del valle medio y medio-bajo del río Magdalena. No obstante que la acción de las autoridades ha frenado un poco los atentados terroristas contra oleoductos e instalaciones petroleras, los impactos ambientales generados por dichos atentados aún permanecen vigentes en los diferentes ecosistemas afectados. [48]

Finalmente, en el oriente Ecuatoriano, numerosas presas de crudo –*presentes alrededor de las plataformas de perforación*– fueron utilizadas para verter desechos tóxicos, cubriéndolas luego con una capa de tierra, lo que generó que el suelo se mezclara con los contaminantes del crudo, derramándose finalmente en los ríos colindantes. Ante dichos daños ambientales, el gobierno ecuatoriano buscó ayuda para la realización de estudios que ayudaran a la recuperación de los suelos afectados, actividad que fue cofinanciada por Petro-Ecuador, City/Alberta Energy y la Unión Europea, quienes recomendaron una tecnología ecológica compatible y de bajo costo para dicho fin.

Es un hecho notorio que algunas bacterias del suelo aumentan el proceso microbiológico; es por esto que una de las primordiales soluciones para la problemática antes expuesta la ofrece la misma naturaleza, que, degradando y descomponiendo el aceite mineral y restituyéndolo al ciclo natural en una forma no tóxica, puede llegar incluso a corregir los más graves daños ambientales ocasionados por los derrames no controlados de hidrocarburos del petróleo empleando para ello su capacidad de regeneración. No obstante, dicho proceso toma mucho tiempo, incluso varias décadas para lograr que el crudo se descomponga totalmente, proceso en el cual puede ayudar el hombre, promoviendo a los microorganismos en este trabajo.

3. METODOLOGÍA

3.1 ORIGEN DEL SUELO

Dando continuidad a las investigaciones pertinentes *-realización de ensayos con muestras de suelo contaminadas con hidrocarburos-* al igual que otros trabajos de grado realizados enmarcados en una investigación, debe explicitarse el lugar de donde fue extraído el material con el que se trabajó durante el transcurso de la investigación. En este orden, las muestras de suelo areno limoso, se extrajeron de las excavaciones en la construcción de obras civiles para la construcción del Colector Mensuli, Sector Club Ecuestre-Planta de Tratamiento. En cuanto al suelo areno arcilloso, las muestras se extrajeron de las excavaciones para la construcción del hospital internacional de la fundación cardiovascular.

3.2 RECOLECCIÓN DEL HIDROCARBURO

El hidrocarburo (glicerina) con el cual se trabajó para la realización de la investigación fue financiado por Colciencias proyecto CT-0078-2013, Ecopetrol y el Instituto Colombiano del Petróleo Acta de Colaboración AC-5211508 y la Dirección General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga proyecto Cod. 057-0113-2300 en dos pimpinas blancas tal como se observa a continuación.

Figura 10. Glicerina almacenada en pimpinas



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

Para el almacenamiento y caracterización de los suelos se requirió la adquisición de cuatro baldes plásticos color blanco los cuales fueron financiados por Colciencias proyecto CT-0078-2013, Ecopetrol y el Instituto Colombiano del Petróleo Acta de Colaboración AC-5211508 y la Dirección General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga proyecto Cod. 057-0113-2300 siendo estos necesarios para el desarrollo apropiado y cómodo de la investigación.

Figura 11. Recipientes para el almacenamiento del suelo virgen y el suelo contaminado



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

Siguiendo la norma I.N.V. E – 141 – 142 -*correspondiente al ensayo modificado de compactación*-, se tamizaron previamente 260 kg de arena arcillosa y 260 kg de arena limosa, de los cuales, una cantidad de 104 kg por cada suelo fue distribuida en los baldes, y los 156 kg restantes de cada uno, se depositaron en las vasijas rojas. No obstante, la cantidad de material total tamizada para su uso y posterior desarrollo de la tesis, fue de 280 kg por cada suelo, es decir 560 kg en total, debido a los numerosos inconvenientes que tuvieron lugar durante en el transcurso del proyecto, demandando la preparación de más suelo del inicialmente presupuestado.

En el curso del proceso se fueron contaminando una a una las cantidades de suelo que se encontraban depositadas en los cuatro baldes, según el tipo de suelo (arena limosa o arena arcillosa) y la cantidad disponible (40 kg en cada recipiente), usando una porción de glicerina pesada en kilogramos -*determinada a partir de los porcentajes de hidrocarburo obtenidos según la porosidad de cada de suelo*- y mezclándola con el material a fin de obtener la concentración pretendida.

Una vez realizada la contaminación de las dos primeras cantidades de suelo correspondientes a las concentraciones del 20% y 30%, las muestras fueron depositadas nuevamente en cada uno de los baldes, a fin de mantener el orden del proceso. El almacenamiento del suelo dentro de los baldes con tapa tenía como finalidad igualmente, la de garantizar una mejor incubación. Durante la experimentación, se observó en alguna de las cantidades una disminución leve de su humedad natural respecto a su humedad óptima, mientras que en otras, se observó un aumento de la humedad natural con respecto a la óptima.

Luego de surtido el proceso de contaminación, las muestras de suelo quedarían de la siguiente manera: 40 kg de arena arcillosa virgen y 40 kg de arena limosa virgen, en las vasijas rojas y en los baldes blancos: 40 kg de arena arcillosa contaminada al 20% de la porosidad y 40 kg de arena limosa contaminada al 20% de la porosidad, 40 kg de arena arcillosa contaminada al 30% de la porosidad y 40 kg de arena limosa contaminada al 30% de la porosidad.

Una vez cumplido con la mitad de los ensayos totales, se procedió a realizar el mismo proceso, esta vez con los suelos contaminados con concentraciones del 40% y 50%, para esto, se retiraron los sobrantes de los baldes suelo y luego se procedió a depositar en ellos, las nuevas cantidades de suelo contaminados de la siguiente manera: 40 kg de arena arcillosa contaminada al 40% de la porosidad y 40 kg de arena limosa contaminada al 40% de la porosidad, 40 kg de arena arcillosa contaminada al 50% de la porosidad y 40 kg de arena limosa contaminada al 50% de la porosidad.

3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

3.4.1 Ensayo de Granulometría

Para realizar del siguiente ensayo se debe contar con una muestra de suelo previamente pecada y luego esta se lava para obtener el peso. Es necesario asegurarse de que la muestra sea representativa para lo cual es posible utilizar un cuarteo. A continuación se muestra el procedimiento para realizar el análisis granulométrico:

1. Teniendo la serie de tamices en su orden (diámetro mayores arriba hasta los diámetros menores abajo), hacer pasar la muestra realizando un vibrado manual o mecánico.

2. Obtener los pesos retenidos en cada uno de los tamices. Sumar los pesos retenidos y comprarlos con el peso total.
3. Calcular los porcentajes retenidos y que pasan por cada tamiz.
4. Realizar la curva granulométrica.

Figura 12. Infograma correspondiente al procedimiento del ensayo de granulometría para suelos areno arcillosos (izquierda) y areno limosos (derecha)



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

3.4.2 Ensayo de Límite Líquido

Para la realización del siguiente ensayo se tiene en cuenta la Norma Invias E-125 como también el manual de laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana.

1. Se pesó entre 50 a 100 gramos de muestra que pasara por el tamiz No 40 (0.425 mm).
2. Con la espátula se mezcló la muestra con agua hasta que esta se mostrara homogénea.

3. La altura de la máquina del límite líquido que va a utilizarse debe ser exactamente de 1 cm (± 0.1 mm). Cuando ya se tiene la Copa de Casagrande en su punto se llena hasta cierta altura.
4. Enseguida con el ranurador trapezoidal se cortó una ranura clara, recta que separara completamente la masa del suelo en dos partes. Como se utiliza la Copa de Casagrande, se debe mantener firmemente perpendicular a la tangente instantánea a la superficie de la cazuela y la herramienta, de forma que la profundidad de la ranura sea homogénea en toda su longitud.
5. Se acciono la copa a razón de dos golpes por segundo y se contó el número de golpes necesarios para que la ranura se cerrara en una longitud de 12.7 mm hecha anteriormente con el ranurador.
6. Se tomó una muestra para medir el contenido de humedad y luego se colocó en una capsula pesada con anterioridad, seguidamente esta fue llevada al horno.
7. Se removieron los restos de suelo de la copa y luego se llevaron al recipiente donde se mezcló con anterioridad, se agregó una pequeña cantidad de agua y luego se mezcló hasta obtener una mezcla homogénea para obtener un número de golpes entre 25 a 30 golpes aproximadamente. Coloco la muestra en la copa de Casagrande y se repitió el procedimiento anterior.
8. Se repite el ensayo para otros dos ensayos agregando una cantidad de agua hasta obtener mayor fluidez. En cada uno de los ensayos se remueve una cantidad de muestra y se coloca en una capsula, se procede a pesar para luego ser llevadas al horno y pesar al día siguiente.

3.4.2 Ensayo de límite Plástico

Para determinar el límite plástico de un suelo el ensayo debe realizarse de la siguiente manera:

1. Se tomó de 20 a 30 gramos de suelo que pasaron por el tamiz No 4 (0.425mm) y que habían sido separados con anterioridad durante la preparación de la muestra para límite líquido. Se agregó agua de tal forma que adquiriera una consistencia manejable.
2. Luego se formaron los rollos de masa de suelo de 3 mm de diámetro, a razón de 80 a 90 rotaciones por minuto, contando como rotación un movimiento completo de la mano hacia adelante y hacia atrás, regresando así, a la posición inicial. Sobre el vidrio o papel periódico crear los rollos con los dedos con tan solo la presión necesaria y sin utilizar más de dos minutos.

3. Cuando ya se tienen los rollos de 3 mm se separa o rompe en pedazos y se moldea nuevamente hasta unir y que vuelvan a enrollarse.

Este proceso se debe hacer hasta que los rollos se rompan bajo la presión de enrollamiento y no permitan que se enrollen adicionalmente.

4. Cuando ya se tenga la muestra, se pesa la capsula y se adiciona muestra. Se pesa el suelo húmedo más la capsula, se lleva al horno y se toma el peso del suelo seco más la capsula al día siguiente.

3.5 CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS

El suelo que se hallaba depositado en cada balde se extrajo por partes para ser contaminado. Para el efecto se usaron bandejas metálicas en las cuales se depositaron cantidades mínimas pero suficientes que para realizar cómodamente el proceso.

Luego de acuerdo al tipo del suelo y según el gramaje depositado en la bandeja se determinó la cantidad de glicerina en peso correspondiente a la concentración según su porosidad.

La glicerina se distribuyó uniformemente sobre la muestra de suelo depositada en la bandeja. Una vez hecho esto, con la ayuda de una pala se realizó el proceso de mezclado del suelo con el aceite.

A continuación se hizo necesario el uso de un tamiz # 4, para disolver los grumos más abultados existentes en la muestra y así facilitar la homogenización del suelo con el hidrocarburo obteniendo de ello una muestra más uniforme para la realización de los ensayos.

Cumplido este protocolo se regresó la cantidad total de suelo contaminada a su recipiente original.

Para una mejor adhesión del hidrocarburo al suelo, fue necesario dejar reposar la cantidad total de suelo contaminado en un periodo de incubación de 15 días.

3.6 ENSAYO PRÓCTOR MODIFICADO

3.6.1 Equipo

Molde metálico y cilíndrico de paredes sólidas, con un collar ajustable de 60 mm de altura y su base, martillo metálico, balanzas, horno, herramientas misceláneas, recipientes, tamiz y regla metálica.

Figura 13. Molde cilíndrico y martillo metálico de Próctor modificado



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

3.6.2 Procedimiento

Se seleccionó una muestra representativa con un peso aproximado de 7 kg o 15 lb, a partir de los 40 kg de suelo que previamente había sido tamizado, ya fuese suelo limo arenoso o arcilla arenoso, *-contaminada o no-*, que se tenía preparada en los baldes de almacenamiento, antes de la determinación de su humedad óptima.

Luego, con el fin de humedecer la muestra para obtener nuestro primer punto de la parábola, se añadió una proporción de agua aproximadamente *-del 3% de humedad correspondiente a los 7 kg de la muestra representativa con la que se pretendía realizar el ensayo-*; ésta se mezcla hasta obtener una muestra homogénea y consistente.

Para la preparación del espécimen, se compactó el suelo que recién humedecido en cinco capas aproximadamente iguales en una altura total compactada de alrededor de 127 mm (5").

Los procedimientos para determinar la humedad óptima se llevaron a cabo mediante la máquina de compactación en el respectivo molde de Próctor modificado de 152 mm (6") de diámetro (con el collar ajustado), ajustando firmemente el molde sobre un soporte denso, uniforme, rígido y estable. Efectuado lo anterior, se procedió a acomodar el montaje completo en la propia máquina.

Figura 14. Máquina de compactación en estado de reposo y en pleno funcionamiento



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

Cada capa de suelo se compactó mediante 55 golpes uniformemente distribuidos con el martillo de 4.54 Kg. (10 lb) y de área triangular a partir de una altura de caída libre por encima de la altura aproximada del suelo compactado de 457 mm (18"), La persona encargada de manipular la máquina, debe cerciorarse por completo de que el cilindro quede firmemente asegurado a ésta, con el fin de que durante la compactación de cada capa el molde no tienda a desplazarse en ninguna dirección; de no ser así, el cilindro podría desviarse durante el proceso provocando anomalías en el adecuado funcionamiento de la máquina, generando no solo márgenes de error altos en el cálculo de la determinación de la densidad del suelo, sino que además, podría afectar la seguridad del usuario, de quien lo manipule, o de cualquier persona que se halle cerca.

Nota: debe tenerse total precaución cuando se haga uso del equipo, acatando las precauciones de laboratorista encargo haciendo uso del soporte de seguridad, que impide que el martillo descienda en su totalidad.

Luego de la compactación de cada capa, el collar de extensión se removió y se recortó el suelo excedente compactado en la parte superior del molde, mediante el uso de un machete; seguidamente se registraba el peso del molde con el suelo húmedo en kilogramos.

Figura 15. Enrasado y pesado del cilindro de Próctor modificado



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

A continuación se extraje la muestra compactada del molde y se toma una muestra representativa del material, la cual se pesa de inmediato y posterior a esto se seca en un horno a 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F) por un tiempo mínimo de 12 horas o hasta peso constante, para determinar el contenido de agua. El peso de la capsula debe de haberse registrado con anterioridad, pues con este dato y de este modo podremos obtener el peso de la muestra seca.

Figura 16. Muestras de suelo contaminadas para ser secadas al horno a temperatura de 50 °C



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

Para el caso de muestras contaminadas con hidrocarburos la norma estipula que las muestras representativas recién extraídas deben de secarse a un plazo de 48 horas a una temperatura constante de 50°C, a fin de precaver riesgos, dado el carácter altamente inflamable de los hidrocarburos.

La porción de la muestra moldeada debe romperse hasta que a simple vista se deduzca su paso por el tamiz de 4.75 mm (No.4). A continuación debe aumentarse el contenido de humedad en 1 o 2%, y así de este modo se repite el procedimiento anterior para cada incremento de agua, hasta que se observe una disminución en el peso del suelo húmedo.

3.7 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD NATURAL DE UN SUELO MEDIANTE EL USO DE LA ESTUFA ELÉCTRICA

La determinación de la humedad del suelo mediante el uso de la estufa eléctrica, es un procedimiento que resulta ser muy eficaz cuando se requiere conocer de manera rápida y segura la humedad natural de los suelos. Realizar el secado de la muestra en los hornos puede resultar muy demorado y alarga de forma drástica la realización de los ensayos.

La ejecución de este proceso durante la investigación fue indispensable para la compactación de muestras de suelo, cuyo fin último era la extracción de especímenes. Debe aclararse que el suelo es susceptible al medio y su humedad varía constantemente; por ello, de no ser compactado con la humedad ideal, no se garantizaría la obtención de resultados óptimos.

Para llevar a cabo este proceso, se tomó una muestra de suelo-*de la cantidad total requerida para llevar a cabo el procedimiento de Próctor modificado*-se depositó en una cápsula, previamente pesada. Acto seguido, mediante el uso de la estufa se evaporó su contenido de agua hasta obtener el peso de su masa seca. A partir de este dato y junto con el valor del peso del recipiente con el suelo húmedo se determinó su contenido de agua; ahora, restándole a éste el peso del recipiente se obtuvo el valor de su masa seca. Con estos datos se calculó el contenido de agua a adicionar al suelo que se compactaría.

Es importante no descuidar el suelo mientras se encuentra en su proceso de secado, pues la temperatura con la que se trabaja la estufa podría llegar a calcinar la muestra.

3.8 OBTENCIÓN DE MUESTRAS

La metodología empleada para el proceso de obtención de muestras de suelo vírgenes y contaminadas se realizó a partir en tres etapas con el fin de facilitar un mejor desarrollo del proyecto, estas corresponden al hincado de los tubos tomamuestras en el suelo compactado con la energía Próctor modificado, la expulsión de las muestras de suelo del tubo tomamuestras y finalmente la incubación de los especímenes.

En la imagen que se muestra a continuación se puede apreciar el equipo con el que llevo a cabo esta fase de la investigación.

Figura 17. Equipo para hincado y extracción de muestras



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

3.8.1 Hincado de los tubos tomamuestras

Mediante el procedimiento que se establece a continuación se pretende la obtención de especímenes en estado virgen y contaminado a partir de muestras de suelo recién compactadas con la energía Próctor modificado, por medio del uso de tubos metálicos de pared delgada; esto, con el fin de establecer propiedades empleadas en ingeniería a partir de los ensayos de laboratorio de permeabilidad por el método

de cabeza variables y consolidación unidimensional. Cabe resaltar que el procedimiento expuesto a continuación se realizó con base a la norma I.N.V. E – 105 – 07.

Inicialmente debe verificarse que el gato hidráulico o equipo de Inserción del Tomamuestras se encuentre en las condiciones adecuadas, a fin de que en pleno proceso no se pueda lograr la elevación total del brazo y nos veamos suspendidos a pleno camino, dificultándose la extracción del espécimen.

El suelo fue compactado con su humedad óptima *–previamente determinada –*; luego de esto se retiró el collar de extensión y la base del cilindro de Próctor modificado para dejar libres ambas caras. Nuestro conjunto para extracción de muestras se observa en la imagen anterior. Sobre el cilindro de color azul, se colocó una placa plana para asegurar un hincado uniforme y en ella se situaron dos tubos de pared delgada (tubos tomamuestras). Sobrepuesto a continuación en ambas probetas, el cilindro con el suelo recién compactado y en la cara superior del Próctor, se colocaron dos segundos tubos de pared delgada (tomamuestras). La finalidad de este montaje era conseguir penetrar las cuatro probetas tanto a arriba como abajo en el Próctor mediante la presión que el gato hidráulico ejerciera sobre éstas. Finalmente, continuo a las probetas, se colocó una segunda placa en la cual se apoyó el dispositivo de elevación; cumplido lo cual se dio inicio al proceso.

El brazo del gato hidráulico se elevó a una determinada altura gracias a la presión del aceite, y una vez que éste hizo contacto con la placa superior del montaje, se comenzaron a inyectar las muestras. Si el cilindro de Próctor modificado se encontraba cómodamente ubicado y no tendía a inclinarse más hacia un lado, entonces el proceso de hincado se podía llevar a cabo de manera satisfactoria. El brazo del gato hidráulico hacía que el cilindro descendiera inyectando de manera simultánea, los tubos tomamuestras tanto inferiores como superiores (esto, gracias a las placas usadas como respaldo).

Figura 18. Infograma correspondiente al procedimiento de hincado de los tubos tomamuestras



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

Una vez realizado este proceso, se obtuvo el resultado que se plasma en las imágenes, según se observa a continuación:

Figura 19. Tubos tomamuestras recién hincados en el cilindro de Próctor modificado



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

Ahora bien, para extraer las probetas junto con las muestras de suelo, fue necesaria la extensión del cilindro de Próctor, en la misma forma en que se usaría para romper el suelo y removerlo una vez se hubiese compactado, pero en este caso, para

empujar el material junto las probetas hasta la extensión; según se aprecia a continuación.

Figura 20. Desplazamiento de suelo hacia el collar de extensión del Próctor para facilitar remoción del material



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

Separada la extensión de la probeta del Próctor y con la ayuda de un cincel y de un martillo, se liberaron las probetas, evitando el contacto con ellas para evitar cualquier tipo de vibración, a fin de no generar grietas.

Figura 21. Extracción de los tubos tomamuestras del cilindro de Próctor mediante cincel y martillo



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

Una vez extraídos los tubos tomamuestras, se separó cuidadosamente el collarín de la probeta, pues de realizarse de manera apresurada podría fracturarse el espécimen.

Una vez separados estos dos elementos, no era recomendable realizar un corte transversal al suelo sobresaliente, pues al haberse compactado éste por capas se podría debilitar la pastilla despedazándola y generando huecos irreparables; para ello, lo aconsejable fue desbastarlo cuidadosamente hasta reducir a lo más mínimo posible los sobrantes y luego emplear el cuchillo para acabar de emparejarlo, hasta la medida del tomamuestras.

Figura 22. Forma en que debe enrasarse el espécimen antes de ser extraído del tubo tomamuestras



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

En caso de que la muestra del molde presentara pequeños espacios que fuesen ocasionados por diminutas partículas de grava; se podía usar el suelo recién removido y con ayuda del cuchillo asentarlos, buscando que ambas caras quedaran de parejas.

3.8.2 Expulsión de la muestra dentro la probeta

Llevar a cabo este proceso manualmente puede resultar complicado dado que la muestra se aprisiona en la probeta. Por lo tanto se usó el gato hidráulico buscando que este procedimiento fuera más sencillo.

Se requirió un complemento adicional para la ejecución de este procedimiento; en este caso se dispuso de un pequeño cilindro de madera, que al igual que el brazo del gato, se usó como un pistón apoyado sobre la cabeza del vástago del gato hidráulico. Las dimensiones de diámetro y altura de esta pieza, estarán cercanos a las de la misma probeta o extractor de muestras; no deben ser muy precisas, para que este modo pueda entrar en la pequeña probeta sin generar fricción con la pared interna de la misma y haga más difícil el proceso, tal como se aprecia a continuación.

Figura 23. Desplazamiento del espécimen del tubo tomamuestras



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

Por su parte, la extensión del pequeño tubo tomamuestras fue de gran ayuda para liberar parte de la pastilla de suelo; ésta, debe deslizarse sin problema alguno al ser presionada por el pistón que al mismo tiempo es empujado por el brazo del gato hidráulico; de no hacer uso del pistón de madera, las pastillas de suelo podrían resultar estropeadas y no sería posible ensayarlas. También pueden ser de ayuda un juego de pesas circulares, cuya utilidad será válida tanto como para darle más altura al gato hidráulico o como para empujar el suelo, estando dentro del cilindro de Próctor.

Acto seguido, se hizo descender el tubo tomamuestras por esfuerzo propio. En esta etapa, la dificultad para liberar totalmente el espécimen, va a depender tanto de la naturaleza del suelo como de su grado de contaminación; por ejemplo: la arena limosa se fricciona menos que la arena arcillosa dentro de la probeta, por lo tanto, su extracción fue mucho más simple. Los suelos con mayor contaminación se deslizan con mayor facilidad que los que tienen menor grado, esto, gracias a la glicerina.

Figura 24. Extracción del espécimen del tubo tomamuestras



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

3.8.3 Incubación de los especímenes

Con el fin de evitar disminuciones en la humedad de los especímenes recién extraídos y proveer muestras apropiadas para la ejecución de los ensayos, se usaron métodos no convencionales en el laboratorio pero con niveles muy altos de efectividad, pudiendo ello evidenciarse a partir de las observaciones hechas durante su seguimiento.

Para el almacenamiento de las pastillas de suelo se usaron bolsas plásticas en donde estas se resguardarían, y se depositaron en recipientes metálicos con tapa.

Figura 25. Infograma correspondiente a la metodología empleada para la incubación de especímenes



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

Sin embargo, para conseguir que éstas conservaran su humedad original, se usaron lanillas húmedas para recubrir las bolsas plásticas que contenían los especímenes. La función de la lanilla húmeda era la de transmitir una temperatura ambiente a las muestras sin correr el riesgo de que el agua entrara al interior de la bolsa; así de este modo, podíamos simular de forma práctica un cuarto húmedo a fin de evitar un secamiento parcial o alguna contracción en los extremos de las muestras. No sobre resaltar, que a menor tiempo de incubación se reduce el riesgo de alteración de la humedad.

La implementación de hojas de papel o de algún otro material constituido por láminas delgadas elaboradas a partir de fibras vegetales -como es en el caso del *periódico*-, para ser usado como envoltura húmeda, puede ser considerados como método inapropiado o poco efectivo para conservar la humedad óptima de las muestras, ya que éstas presentan una estructura porosa, que podría facilitar el paso del agua directamente a la muestra, alterando su humedad de forma drástica durante el ensayo de consolidación. Esto, podría traducirse en mayores

deformaciones en un menor tiempo, dificultando dar una interpretación razonable a los resultados obtenidos de las curvas de compresibilidad.

Figura 26. Ejemplo de método inadecuado para la incubación de especímenes



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

3.9 ENSAYO DE PERMEABILIDAD DE SUELOS POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE

3.9.1 Equipo

Aparato de permeabilidad, tubo manométrico o bureta (con escalas métricas para medir cabeza de agua), templete con mástil y soporte para agarrar tubos de ensayo, balanza, embudo, cronometro, termómetro y un vaso graduado de 250 ml.

3.9.2 Procedimiento

Con el fin de facilitar el desarrollo de los cálculos y el desarrollo del respectivo informe, es necesario realizar con anticipación las debidas mediciones; para ello se debe medir el diámetro de la tubería de entrada o bureta con la cual será posible el caculo del área de la misma.

También se debe tomar la altura y el diámetro de la muestra de suelo, las cuales serán de utilidad para calcular el área y el volumen de la muestra de suelo.

El montaje de la muestra dentro de la célula se realizó de la siguiente manera y en el siguiente orden: primero se colocó, centrado en la base, un anillo plástico cuya función será la de evitar el escape de agua fuera de la cámara; a continuación, se

coloca una piedra porosa inferior y encima de ésta un disco papel filtro. Luego, se colocó la muestra, previamente engrasada en todo su grosor *-y no sobre ninguna de sus dos superficies-*, pues ello podría obstruir los poros de suelo generando márgenes de error bastante altos. Se recomienda evitar el exceso del lubricante, ya que luego podría resultar muy tedioso retirar los residuos sobrantes.

Juárez Badillo y Rico Suárez, en su texto guía de mecánica de suelo, especifican claramente que el uso de hidrocarburos como la parafina *-con el objetivo de cerrar el espacio entre la muestra y el cilindro de lucita-*, no es una opción apropiada debido a que el material no se adhiere muy bien a la muestra húmeda, dicha circunstancia es sistemática y es fácilmente apreciable a partir de la observación durante el desarrollo de pruebas. Durante la ejecución del proceso, la parafina podría llegar incluso a alterar la densidad del agua, afectando de este modo los resultados.

Por otro lado, si lo que se requiere es bloquear el paso de agua alrededor de la muestra, el sello más conveniente a usar sería uno a base de gel bentónica, el cual sería inyectado mediante un tubito de vidrio unido a un bulbo de hule que contenga el gel.

Posterior a la muestra, colocaremos nuevamente un disco papel filtro y seguidamente una segunda piedra porosa; los papeles filtros como su nombre lo indican tendrán la función de permitir que el agua se filtre a través de estos permitiendo la circulación del flujo entre piedra superior-suelo y suelo-piedra inferior, evitando que partículas finas de suelo se adhieran a alguna de los dos discos porosos. Por otro lado, las piedras porosas tendrán la función de servir a la muestra como respaldo para que el agua circule libremente a través de estas y previendo el escape de suelo por la tubería a de salida.

Una vez hecho esto y de forma cuidadosa, colocamos la cámara del permeámetro tratando de no arañar mucho el espécimen. Hacemos encajar en la base y presionamos bien hasta sentir que esta toque el fondo. Se recomienda hacerla deslizar de manera recta y lentamente, pues en algunos casos el cilindro de lucita del permeámetro puede llegar a ser muy angosto para la muestra.

Procediendo con el montaje del ensayo, se debe conectar una tubería plástica a la bureta graduada. La bureta debe tener un soporte, de modo que ésta se mantenga en forma vertical.

Cabe resaltar que la válvula de la tubería de entrada debe quedar al mismo nivel de la válvula de la tubería de salida a fin de mantener los niveles de flujo constantes y de esta manera hacer cumplir el principio de los vasos comunicantes.

Seguidamente se llena la tubería de entrada hasta una altura conveniente con el fin de medir la cabeza hidráulica a través de la muestra para obtener la altura (h1)

Para dar inicio al ensayo, las válvulas de entrada y salida deben abrirse simultáneamente al mismo tiempo en que se acciona el cronómetro para dar comienzo al escurrimiento del tubo de agua, dejando que el fluido corra a través de la muestra, hasta que la bureta se encuentre casi vacía

Finalmente se cierran las válvulas para detener el flujo y se registra el tiempo transcurrido (t) y la cabeza hidráulica (h2)

Se deben realizar de 2 o 3 mediciones adicionales, siempre llenando la tubería de entrada o bureta a la misma altura h1, previendo que el agua se mantenga a una misma temperatura durante todas las mediciones. En la tabla que se muestra a continuación, se pueden apreciar los valores de la densidad del agua según su temperatura. Este valor será de vital importancia para determinar a permeabilidad real del suelo que se ensayó [49, 50].

Tabla 8. Densidad del agua según su temperatura

° C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10	1,301	1,297	1,294	1,290	1,286	1,283	1,279	1,275	1,272	1,268
11	1,265	1,261	1,258	1,254	1,251	1,247	1,244	1,240	1,237	1,233
12	1,230	1,226	1,223	1,220	1,216	1,213	1,210	1,206	1,203	1,200
13	1,196	1,193	1,190	1,187	1,184	1,181	1,177	1,174	1,171	1,168
14	1,165	1,162	1,159	1,156	1,152	1,149	1,146	1,143	1,140	1,137
15	1,134	1,131	1,128	1,126	1,123	1,120	1,117	1,114	1,111	1,108
16	1,104	1,102	1,099	1,097	1,094	1,091	1,088	1,085	1,080	1,080
17	1,077	1,074	1,072	1,069	1,066	1,064	1,061	1,058	1,056	1,053
18	1,050	1,048	1,045	1,042	1,040	1,035	1,035	1,032	1,030	1,027
19	1,024	1,022	1,019	1,017	1,014	1,012	1,009	1,007	1,005	1,002
20	1,000	0,997	0,995	0,992	0,990	0,988	0,985	0,983	0,980	0,978
21	0,976	0,973	0,971	0,969	0,966	0,964	0,962	0,960	0,957	0,955
22	0,953	0,950	0,948	0,946	0,944	0,942	0,939	0,937	0,935	0,933
23	0,931	0,929	0,926	0,924	0,922	0,920	0,918	0,916	0,914	0,911
24	0,909	0,907	0,905	0,903	0,901	0,899	0,897	0,895	0,893	0,891
25	0,889	0,887	0,885	0,883	0,881	0,879	0,877	0,875	0,873	0,871
26	0,869	0,867	0,865	0,863	0,861	0,859	0,857	0,856	0,854	0,852
27	0,850	0,848	0,846	0,844	0,842	0,841	0,839	0,837	0,835	0,833
28	0,831	0,830	0,828	0,826	0,824	0,822	0,821	0,819	0,817	0,815
29	0,813	0,812	0,810	0,808	0,807	0,805	0,803	0,801	0,800	0,798
30	0,796	0,795	0,793	0,791	0,790	0,788	0,786	0,785	0,783	0,781
31	0,780	0,778	0,776	0,775	0,773	0,772	0,770	0,768	0,767	0,765
32	0,764	0,762	0,761	0,759	0,757	0,756	0,754	0,753	0,751	0,750

Fuente: Bowles J., 1982.

Figura 27. Infograma correspondiente al ensamble del conjunto del permeámetro





Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

3.10 ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

3.10.1 Introducción

La construcción de proyectos ingenieriles está directamente ligada a la aplicación de la mecánica de suelos, a partir de esta se pretende comprender el comportamiento de un suelo para ser usado como un material de construcción o

como base de sustentación de las obras de ingeniería, lo que permite tener una planificación adecuada de una estructura a partir de diseños óptimos, garantizando su funcionamiento y seguridad.

Para una transmisión eficiente de las cargas al terreno, se requiere un análisis minucioso de los puntos de apoyo o cimentaciones de una estructura sobre el suelo. Este campo, nos proporciona los parámetros necesarios para llevar a cabo dichos análisis. Cabe resaltar que debe tenerse un conocimiento exacto del comportamiento del suelo donde se va a construir, ante la acción determinadas cargas que debe soportar. Por ello, el ensayo de consolidación es muy recomendado.

Mediante la realización de este ensayo podremos obtener información acerca de la compresibilidad de una muestra de suelo saturada cuya presión lateral se encuentra totalmente restringida. La curva de compresibilidad podemos hallarla a partir de la relación entre la carga aplicada y la relación de vacíos de una muestra de suelo.

3.10.2 Equipo

Dispositivo de carga, Consolidometro, piedras porosas, balanza, horno, deformimetro, equipo misceláneo, recipientes

3.10.3 Ejecución del ensayo

Se contó con tres consolidómetros y con el apoyo del Laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali para validación de unos resultados.

Figura 28. Consolidómetros del laboratorio de suelos con sus respectivos dispositivos de carga



Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

3.10.3.1 Preparación de la muestra

Se preparó el espécimen con el cual se pretendía realizar el ensayo: para ello se humedeció una muestra de suelo con el contenido de agua necesario para alcanzar su humedad óptima.

Posteriormente, se procedió a compactar el suelo mediante la energía del Próctor modificado. Una vez realizado este procedimiento, se continuó con la metodología correspondiente al hincado los tubos tomamuestras en el cilindro de Próctor*.

La muestra se moldeó de acuerdo con el interior del diámetro del anillo del consolidómetro, forzándola dentro del mismo. El borde cortante que presenta el anillo facilitó el proceso de hincado en el suelo compactado. (Nota: A fin de proporcionar un ajuste adecuado del anillo para muestreo, se presentó el borde

* Nota: Los anillos que se usaron para armar el ensamblaje del conjunto del equipo de consolidación, eran piezas de uso exclusivo para cada dispositivo, pues éstas solo encajaban en su respectiva cámara.

cortante debidamente acondicionado); una vez realizada la extracción de la muestra, se removieron los sobrantes emparejándola con la superficie plana del anillo mediante una sierra de alambre.

Finalmente, con la ayuda de una regla con borde cortante, se realizó el corte final.

Se tomaron muestras del suelo sobrante para secar en el horno el fin de determinar su humedad, esto, con el fin último de encontrar su humedad*.

3.10.3.2 Ensamblaje del conjunto

Tal como puede apreciarse y se infiere de las imágenes insertas a continuación, el procedimiento para el ensamblaje del dispositivo es el siguiente: Sobre y debajo de cada cara de la muestra irán situados los discos porosos saturados de acuerdo a la naturaleza del suelo (por ejemplo, si se trabaja con suelos altamente expansivos, los discos porosos deben usarse en condiciones de humedad nula), éstos cumplirán la función de permitir la recirculación del agua; entre cada una de las superficies de la muestra y las piedras porosas; se usaron papeles filtros, cuyo objetivo fue restringir el paso de partículas de suelo hacia los discos porosos.

Procediendo con el montaje de la célula para el desarrollo de la prueba, sobre el tubo tomamuestras se hará encajar el anillo portaprobeta del consolidometro el cual tendrá la función de impedir que el espécimen se desplace horizontalmente sobre la base de la célula durante el tiempo en que dura la ejecución total del ensayo.

Como se mencionó con anterioridad, se coloca una primera piedra porosa en el fondo de la célula y sobre ella se sitúa un papel filtro. Sobre la piedra porosa se coloca el espécimen junto con el anillo portaprobeta y se hace encajar dentro del consolidometro asegurando los tornillos.

A continuación, sobre el espécimen se coloca otro papel filtro y luego una segunda piedra porosa; sobre ésta se sitúa una placa metálica, la cual cubre el área total de la muestra.

Realizado lo anterior se acomoda la célula en el edómetro de tal modo que quede en una posición fija y sobre la misma placa se ajusta el vástago del edómetro el cual

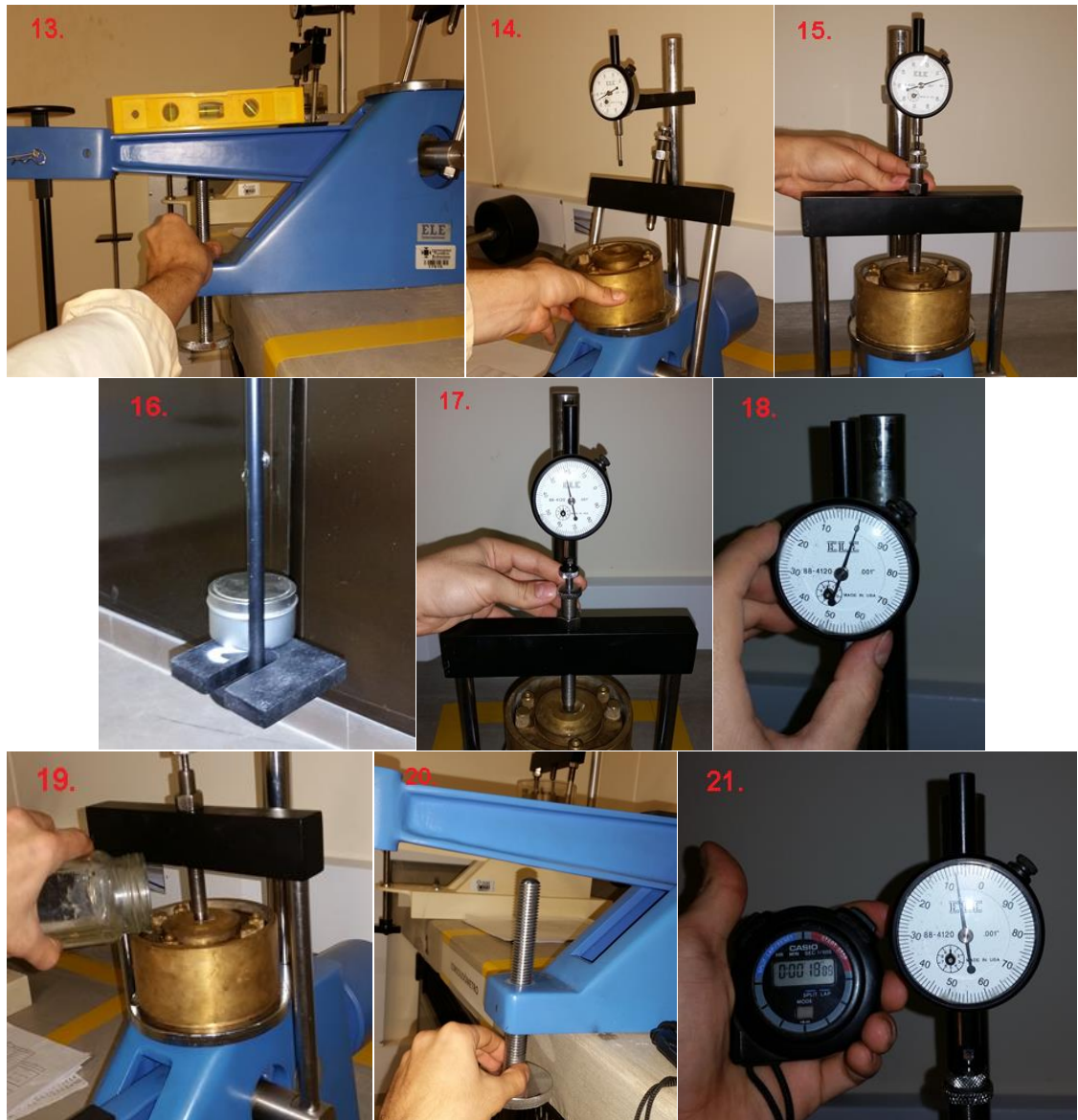
* Nota: La muestra de suelo puede fijarse en un anillo, el cual puede estar fijo en el consolidometro o estar flotante; en caso de estar fijo el dispositivo, se debe presentar algún mecanismo para sumergir el suelo.

transmitirá el esfuerzo al espécimen generado a partir de las cargas que se apliquen axialmente.

Una vez hecho lo anterior se nivela el brazo del edómetro y se ajusta en cero la aguja del dial, con la cual se medirán las deformaciones que experimentará el suelo durante la realización del ensayo. Se añade agua a la célula para incrementar la presión del agua en los poros.

Figura 29. Infograma correspondiente al procedimiento del ensamble del conjunto del consolidometro





Fuente: Conjunto de fotografías tomadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana por autor.

4.1.1.1.2 Límites de Atterberg

En la figura que se tiene a continuación se observa la curva de fluidez múltiple con la cual se determinó el límite líquido de una muestra areno arcillosa en su estado virgen; seguido a esto se tienen los resultados de los porcentajes correspondientes al límite plástico e índice de plasticidad y por último se presentan los resultados del porcentaje del límite de contracción (sw), la relación de contracción y la gravedad específica para el mismo suelo mencionado.

Figura 31. Curva de fluidez múltiple del ensayo de limite líquido para una Arena Arcillosa en estado Virgen

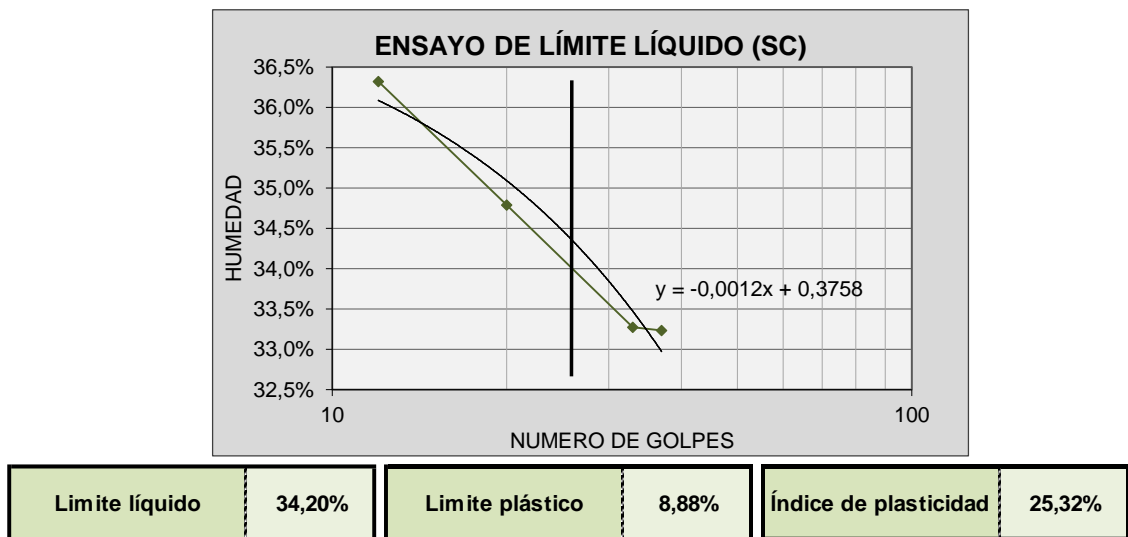


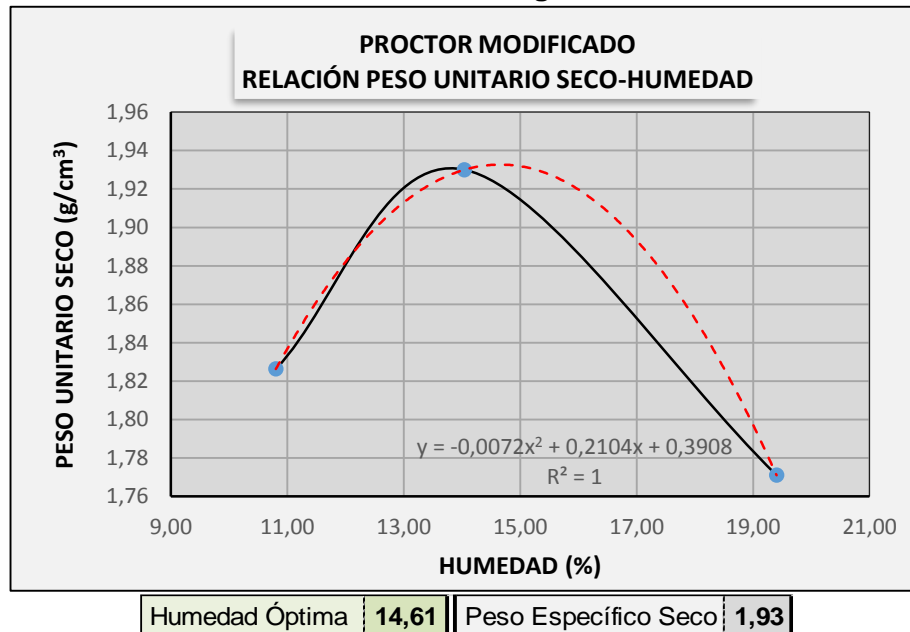
Tabla 9. Resultados obtenidos a partir del ensayo de límite de contracción para una muestra de suelo Areno Arcillosa

Cápsula	Límite de contracción SW (%)	Relación de contracción SR	Gravedad específica
13	5,98	1,73	1,93
14	37,44	1,32	2,60
Promedio	21,71	1,53	2,27

4.1.1.2 Ensayo de próctor modificado

A continuación se expone el resultado correspondiente a la prueba de Próctor Modificado realizada a una muestra de un suelo areno arcilloso en su estado virgen con el fin de la determinar su Humedad Óptima y su Peso Específico Seco.

Figura 32. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Arcillosa en estado Virgen



4.1.1.3 Ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos areno arcillosos en su estado virgen con el fin de determinar el Coeficiente de permeabilidad a temperatura estándar de 20° C.

Tabla 10. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos en su estado Virgen

ARENA ARCILLOSA NO CONTAMINADA			
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE			
	K_t (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)
ENSAYO I	6,373E-08	8,770E-01	5,589E-08
ENSAYO II	6,519E-08	8,750E-01	5,704E-08
ENSAYO III	6,844E-08	8,750E-01	5,989E-08
ENSAYO IV	3,626E-08	8,750E-01	3,173E-08
ENSAYO V	3,332E-08	8,730E-01	2,909E-08
ENSAYO VI	4,319E-08	8,730E-01	3,770E-08
ENSAYO VII	5,039E-08	8,750E-01	4,409E-08
ENSAYO VIII	4,190E-08	8,750E-01	3,666E-08
PROMEDIO	5,030E-08	8,748E-01	4,401E-08

4.1.1.4 Ensayos de consolidación unidimensional

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos areno arcillosos en su estado Virgen con el fin de determinar el Coeficiente de Consolidación.

Tabla 11. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Arcillosos en estado Virgen

ARENA ARCILLOSA VIRGEN				
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL				
Cv (m ² /seg)				
	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
ENSAYO I	2,310E-06	2,271E-06	2,250E-06	3,377E-06
ENSAYO II	2,277E-06	3,492E-06	3,396E-06	3,276E-06
ENSAYO III	3,616E-06	3,602E-06	3,564E-06	3,516E-06
PROMEDIO	2,734E-06	3,122E-06	3,070E-06	3,390E-06

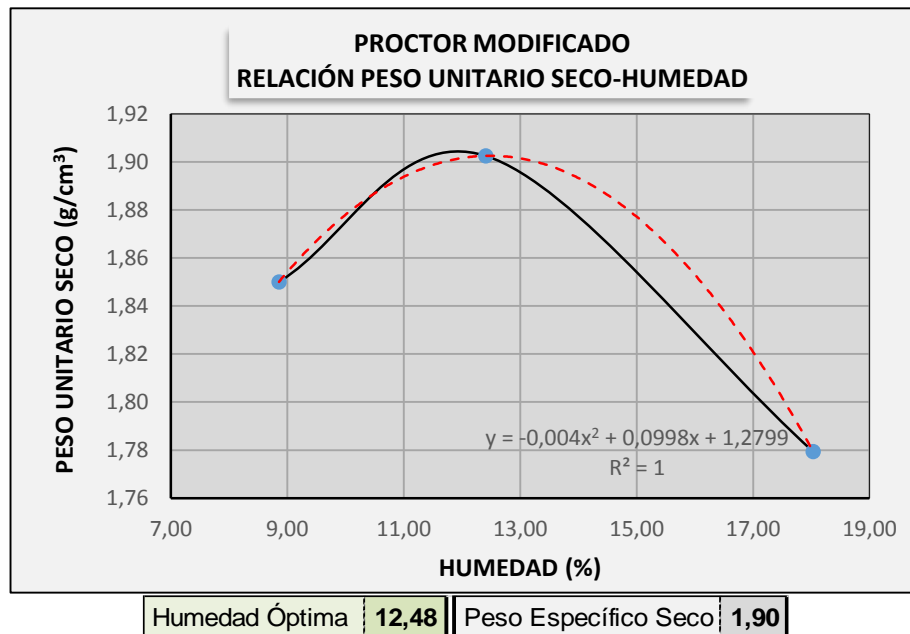
4.1.2 Especímenes contaminados

4.1.2.1 Especímenes contaminados con concentraciones del 20%

4.1.2.1.1 Ensayo de próctor modificado

A continuación se expone el resultado correspondiente a la prueba de Próctor Modificado realizada a una muestra de un suelo areno arcilloso contaminado con una concentración del 20% de la porosidad con el fin de la determinar su Humedad Óptima y su Peso Específico Seco.

Figura 33. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Arcillosa Contaminada con el 20% de la Porosidad



4.1.2.1.2 Ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos areno arcillosos contaminados con una concentración del 20% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Permeabilidad a temperatura estándar de 20° C.

Tabla 12. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 20% de la porosidad

ARENA ARCILLOSA CONTAMINADA - 20%			
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE			
	K_t (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)
ENSAYO I	2,177E-08	8,750E-01	1,905E-08
ENSAYO II	2,019E-08	8,750E-01	1,766E-08
ENSAYO III	3,733E-08	8,750E-01	3,266E-08
ENSAYO IV	2,881E-08	8,770E-01	2,527E-08
ENSAYO V	1,976E-08	8,770E-01	1,733E-08
ENSAYO VI	2,452E-08	8,750E-01	2,145E-08
ENSAYO VII	2,951E-08	8,750E-01	2,582E-08
ENSAYO VIII	3,022E-08	8,750E-01	2,644E-08
PROMEDIO	2,651E-08	8,755E-01	2,321E-08

4.1.2.1.3 Ensayos de consolidación unidimensional

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos areno arcillosos contaminados con una concentración del 20% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Consolidación.

Tabla 13. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 20% de la porosidad

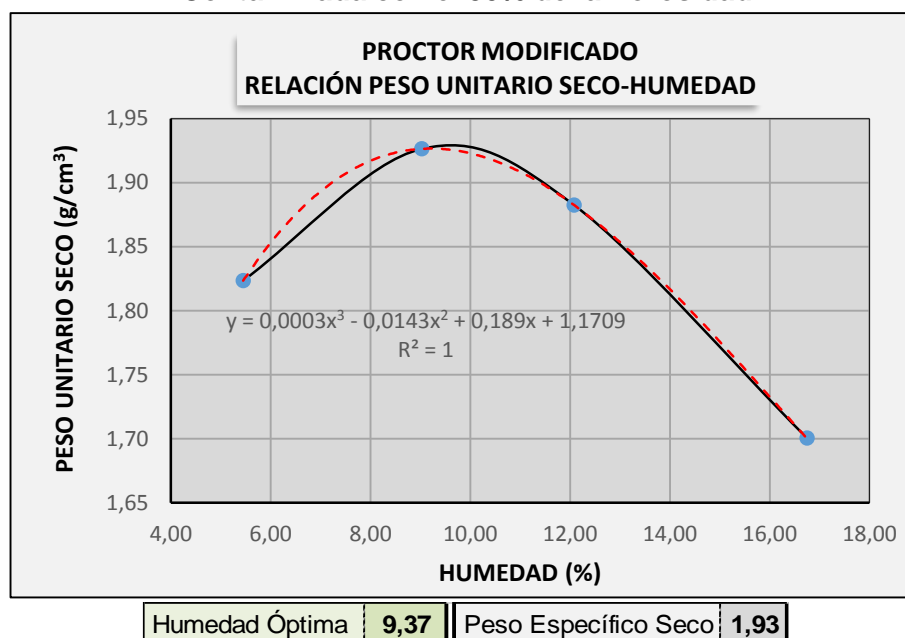
ARENA ARCILLOSA CONTAMINADA - 20%								
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL								
Cv (m ² /seg)								
ENSAYO I	0,26 (kgf/cm ²) 2,297E-06	0,51 (kgf/cm ²) 3,560E-06	1,02 (kgf/cm ²) 1,394E-05	2,04 (kgf/cm ²) 2,653E-06	4,08 (kgf/cm ²) 2,560E-06	8,15 (kgf/cm ²) 2,459E-06	16,31 (kgf/cm ²) 1,896E-06	32,62 (kgf/cm ²) 2,224E-06
ENSAYO II	0,26 (kgf/cm ²) 2,321E-06	0,51 (kgf/cm ²) 4,706E-06	1,02 (kgf/cm ²) 2,812E-06	2,04 (kgf/cm ²) 3,502E-06	4,08 (kgf/cm ²) 3,425E-06	8,15 (kgf/cm ²) 3,327E-06	16,31 (kgf/cm ²) 3,180E-06	
ENSAYO III	0,14 (kgf/cm ²) 1,614E-06	0,25 (kgf/cm ²) 4,711E-06	0,48 (kgf/cm ²) 6,335E-06	0,93 (kgf/cm ²) 4,570E-06	1,84 (kgf/cm ²) 4,477E-06	3,65 (kgf/cm ²) 5,979E-06	7,27 (kgf/cm ²) 4,370E-06	
ENSAYO IV	0,08 (kgf/cm ²) 1,167E-06	0,24 (kgf/cm ²) 1,400E-06	0,56 (kgf/cm ²) 2,151E-06	1,20 (kgf/cm ²) 2,109E-06	2,81 (kgf/cm ²) 2,691E-06	6,01 (kgf/cm ²) 2,576E-06	12,43 (kgf/cm ²) 2,433E-06	
PROMEDIO	0,26 (kgf/cm ²) 2,309E-06	0,51 (kgf/cm ²) 4,867E-06	1,02 (kgf/cm ²) 7,108E-06	2,04 (kgf/cm ²) 3,077E-06	4,08 (kgf/cm ²) 2,992E-06	8,15 (kgf/cm ²) 2,893E-06	16,31 (kgf/cm ²) 2,538E-06	32,62 (kgf/cm ²) 4,950E-07

4.1.2.2 Especímenes contaminados con concentraciones del 30%

4.1.2.2.1 Ensayo de próctor modificado

A continuación se expone el resultado correspondiente a la prueba de Próctor Modificado realizada a una muestra de un suelo areno arcilloso contaminado con una concentración del 30% de la porosidad con el fin de la determinar de su Humedad Óptima y su Peso Específico Seco.

Figura 34. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Arcillosa Contaminada con el 30% de la Porosidad



4.1.2.2.2 Ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos areno arcillosos contaminados con una concentración del 30% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Permeabilidad a temperatura estándar de 20° C.

Tabla 14. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 30% de la porosidad

ARENA ARCILLOSA CONTAMINADA - 30%			
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE			
	K_t (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)
ENSAYO I	1,272E-08	8,990E-01	1,143E-08
ENSAYO II	1,308E-08	8,990E-01	1,176E-08
ENSAYO III	1,534E-08	8,970E-01	1,376E-08
ENSAYO IV	1,750E-08	8,970E-01	1,569E-08
ENSAYO V	1,340E-08	9,010E-01	1,208E-08
ENSAYO VI	1,235E-08	9,010E-01	1,112E-08
PROMEDIO	1,406E-08	8,990E-01	1,264E-08

4.1.2.2.3 Ensayos de consolidación unidimensional

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos areno arcillosos contaminados con una concentración del 30% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Consolidación.

Tabla 15. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 30% de la porosidad

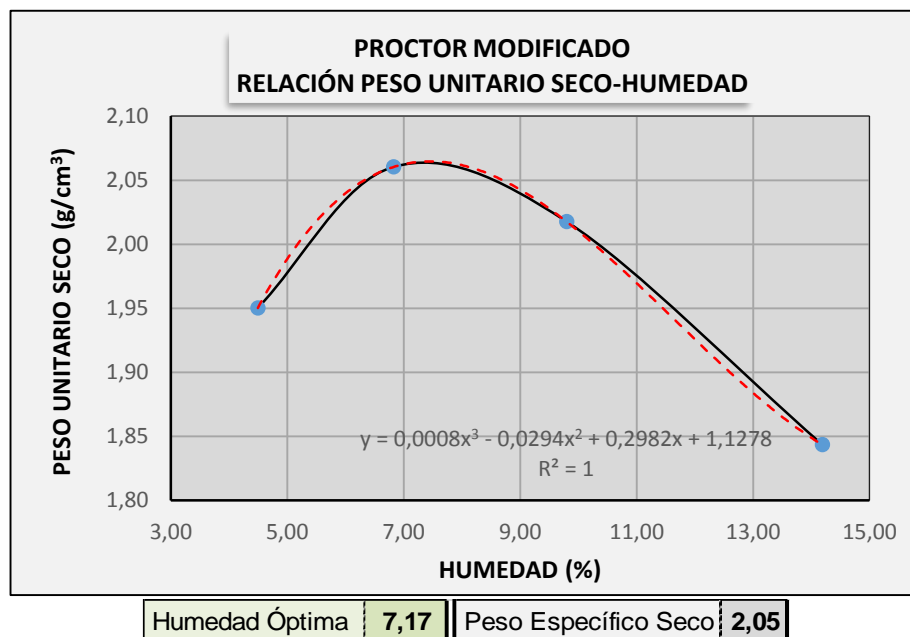
ARENA ARCILLOSA CONTAMINADA - 30%								
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL								
Cv (m ² /seg)								
ENSAYO I	0,26 (kgf/cm ²)	0,51 (kgf/cm ²)	1,02 (kgf/cm ²)	2,04 (kgf/cm ²)	4,08 (kgf/cm ²)	8,15 (kgf/cm ²)	16,31 (kgf/cm ²)	32,62 (kgf/cm ²)
	1,301E-06	2,470E-06	1,124E-06	1,027E-06	1,464E-06	5,343E-06	1,230E-06	7,749E-07
ENSAYO II	0,26 (kgf/cm ²)	0,51 (kgf/cm ²)	1,02 (kgf/cm ²)	2,04 (kgf/cm ²)	4,08 (kgf/cm ²)	8,15 (kgf/cm ²)	16,31 (kgf/cm ²)	32,62 (kgf/cm ²)
	1,439E-06	1,328E-06	1,210E-06	1,105E-06	1,035E-06	4,677E-08	6,885E-07	3,923E-06
ENSAYO III	0,14 (kgf/cm ²)	0,25 (kgf/cm ²)	0,48 (kgf/cm ²)	0,93 (kgf/cm ²)	1,84 (kgf/cm ²)	3,65 (kgf/cm ²)	7,27 (kgf/cm ²)	
	2,193E-06	2,842E-06	3,818E-06	3,713E-06	3,553E-06	3,328E-06	3,143E-06	
PROMEDIO	0,14 (kgf/cm ²)	0,26 (kgf/cm ²)	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)		
	2,193E-06	1,860E-06	2,539E-06	2,016E-06	1,895E-06	1,250E-06		

4.1.2.3 Especímenes contaminados con concentraciones del 40%

4.1.2.3.1 Ensayo de próctor modificado

A continuación se expone el resultado correspondiente a la prueba de Próctor Modificado realizada a una muestra de un suelo areno arcilloso contaminado con una concentración del 40% de la porosidad con el fin de la determinar de su Humedad Óptima y su Peso Específico Seco.

Figura 35. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Arcillosa Contaminada con el 40% de la Porosidad



4.1.2.3.2 Ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos areno arcillosos contaminados con una concentración del 40% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Permeabilidad a temperatura estándar de 20° C.

Tabla 16. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 40% de la porosidad

ARENA ARCILLOSA CONTAMINADA - 40%			
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE			
	K_t (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)
ENSAYO I	6,395E-09	8,790E-01	5,621E-09
ENSAYO II	6,730E-09	8,790E-01	5,916E-09
ENSAYO III	8,077E-09	8,790E-01	7,100E-09
ENSAYO IV	7,148E-09	8,770E-01	6,269E-09
ENSAYO V	8,917E-09	8,770E-01	7,820E-09
ENSAYO VI	7,253E-09	8,790E-01	6,375E-09
ENSAYO VII	8,507E-09	8,790E-01	7,478E-09
ENSAYO VIII	7,601E-09	8,750E-01	6,650E-09
PROMEDIO	7,578E-09	8,780E-01	6,654E-09

4.1.2.3.3 Ensayos de consolidación unidimensional

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos areno arcillosos contaminados con una concentración del 40% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Consolidación.

Tabla 17. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 40% de la porosidad

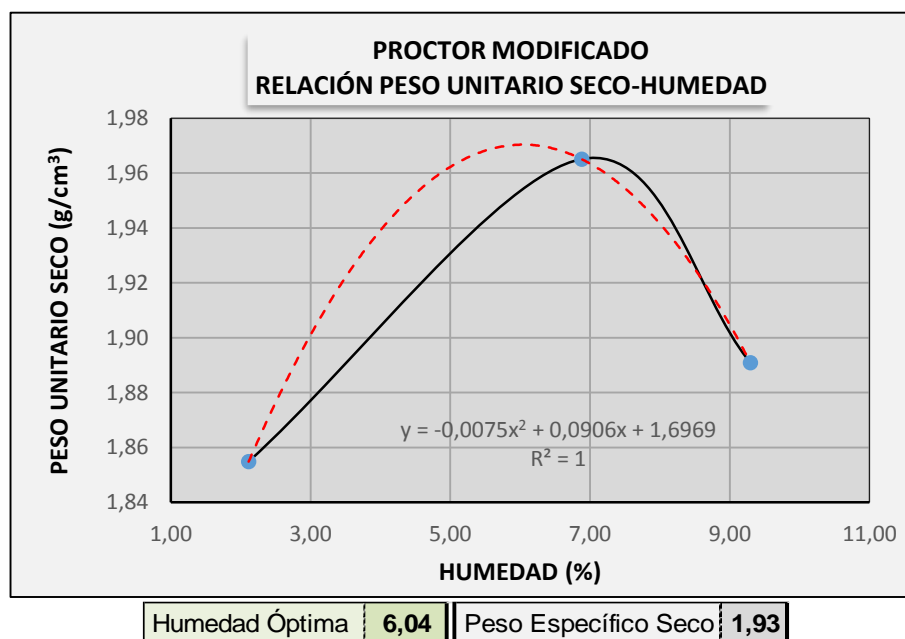
ARENA ARCILLOSA CONTAMINADA - 40%				
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL				
C_v (m²/seg)				
ENSAYO I	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	2,322E-06	3,607E-06	3,561E-06	3,486E-06
ENSAYO II	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	3,528E-06	3,516E-06	3,504E-06	6,171E-06
ENSAYO III	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	2,319E-06	2,307E-06	3,555E-06	3,475E-06
PROMEDIO	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	2,723E-06	3,143E-06	3,540E-06	4,377E-06

4.1.2.4 Especímenes contaminados con concentraciones del 50%

4.1.2.4.1 Ensayo de próctor modificado

A continuación se expone el resultado correspondiente a la prueba de Próctor Modificado realizada a una muestra de un suelo areno arcilloso contaminado con una concentración del 50% de la porosidad con el fin de la determinar de su Humedad Óptima y su Peso Específico Seco.

Figura 36. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Arcillosa Contaminada con el 50% de la Porosidad



4.1.2.4.2 Ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos areno arcillosos contaminados con una concentración del 50% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Permeabilidad a temperatura estándar de 20° C.

Tabla 18. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 50% de la porosidad

ARENA ARCILLOSA CONTAMINADA - 50%			
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE			
	K_t (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)
ENSAYO I	8,389E-09	8,770E-01	7,357E-09
ENSAYO II	7,151E-09	8,770E-01	6,272E-09
ENSAYO III	6,041E-09	8,770E-01	5,298E-09
ENSAYO IV	6,121E-09	8,790E-01	5,381E-09
ENSAYO V	9,545E-09	8,790E-01	8,390E-09
ENSAYO VI	9,696E-09	8,790E-01	8,523E-09
ENSAYO VII	5,637E-09	8,770E-01	4,944E-09
ENSAYO VIII	6,966E-09	8,770E-01	6,110E-09
PROMEDIO	7,443E-09	8,778E-01	6,534E-09

4.1.2.5 Ensayos de consolidación unidimensional

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos areno arcillosos contaminados con una concentración del 50% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Consolidación.

Tabla 19. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 50% de la porosidad

ARENA ARCILLOSA CONTAMINADA - 50%				
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL				
C_v (m ² /seg)				
ENSAYO I	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	2,310E-06	3,489E-06	6,050E-06	5,865E-06
ENSAYO II	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	3,585E-06	3,499E-06	3,421E-06	3,326E-06
ENSAYO III	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	2,298E-06	3,549E-06	3,460E-06	5,877E-06
PROMEDIO	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	2,731E-06	3,513E-06	4,310E-06	5,023E-06

4.2 SUELOS ARENO LIMOSO

Se comprenden los resultados obtenidos a partir de los ensayos para especímenes del suelo areno limoso en su estado virgen y especímenes contaminados con hidrocarburos con concentraciones del 20%, 30%, 40% y 50% de la porosidad.

4.2.1 Especímenes no contaminados

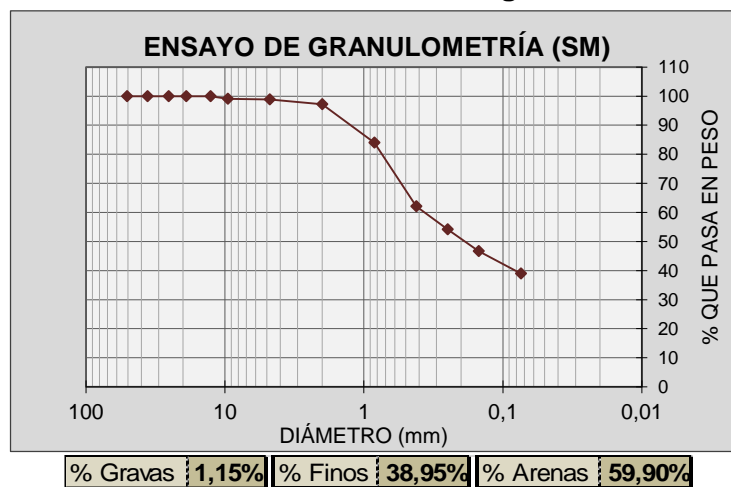
4.2.1.1 Ensayos de Clasificación de Suelos

A continuación se exponen los resultados correspondientes a los ensayos de clasificación de suelos tales como: ensayo de Granulometría, Límites de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico, Límite de Contracción) para suelos areno limosos en estado virgen. Según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), el material sin contaminar sería clasificado como una arena limosa (SM).

4.2.1.1.1 Ensayo de granulometría

En la figura que se tiene a continuación se observa la curva granulométrica de una arena limosa en su estado virgen; seguido a esto se tiene los porcentajes correspondientes al contenido de gravas, finos y arenas de la muestra representativa de suelo que se usó para la ejecución del ensayo.

Figura 37. Curva Granulométrica del ensayo de granulometría para una Arena Limosa en estado Virgen



4.2.1.1.2 Límites de Atterberg

En la figura que se tiene a continuación se observa la curva de fluidez múltiple con la cual se determinó el límite líquido de una muestra areno limosa en su estado virgen; seguido a esto se tienen los resultados de los porcentajes correspondientes al límite plástico e índice de plasticidad y por último se presentan los resultados del porcentaje del límite de contracción (sw), la relación de contracción y la gravedad específica para el mismo suelo mencionado.

Figura 38. Curva de fluidez múltiple del ensayo de límite líquido para una Arena Limosa en estado Virgen

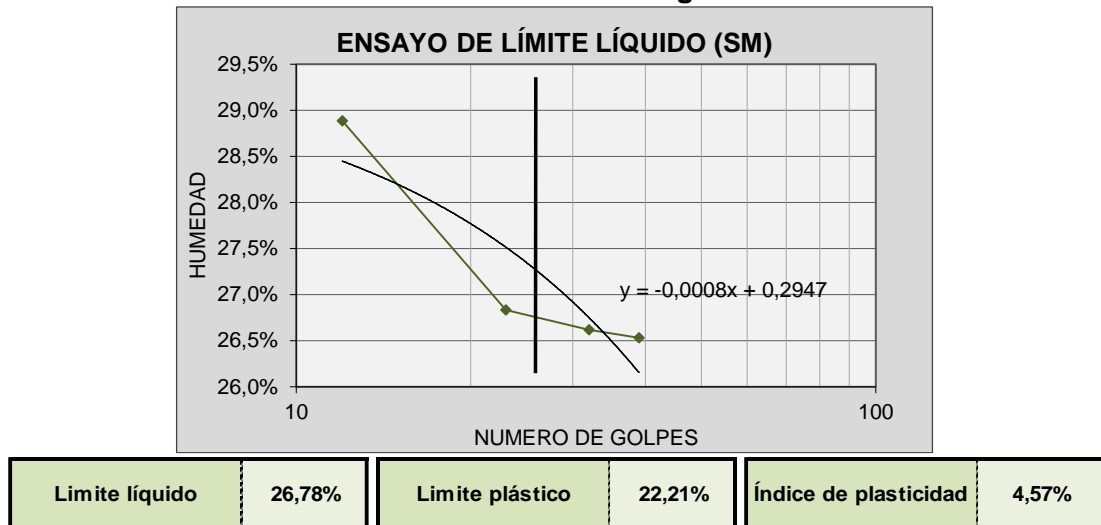


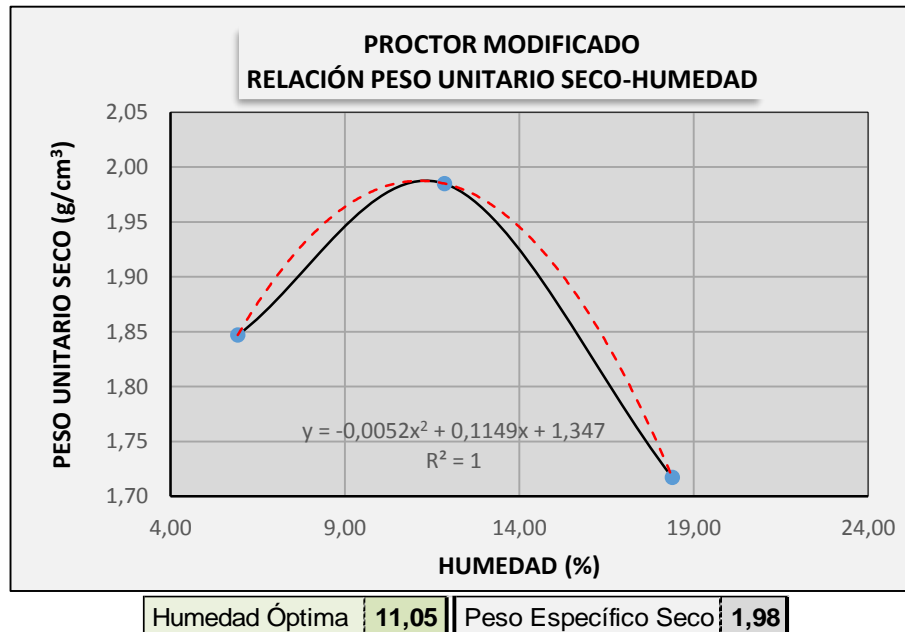
Tabla 20. Resultados obtenidos a partir del ensayo de límite de contracción para una muestra de suelo Areno Limosa

Cápsula	Límite de contracción SW (%)	Relación de contracción SR	Gravedad específica
4	25,07	1,61	2,70
1	25,51	1,59	2,67
Promedio	25,29	1,60	2,68

4.2.1.2 Ensayo de próctor modificado

A continuación se expone el resultado correspondiente a la prueba de Próctor modificado realizada a una muestra de un suelo areno limoso en su estado Virgen con el fin de la determinar de su Humedad Óptima y su Peso Específico Seco.

Figura 39. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Limosa en estado Virgen



4.2.1.3 Ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos areno limosos en su estado Virgen con el fin de determinar el Coeficiente de Permeabilidad a temperatura estándar de 20° C.

Tabla 21. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Arenos Limosos en estado Virgen

ARENA LIMOSA NO CONTAMINADA			
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE			
	K_t (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)
ENSAYO I	5,021E-08	8,770E-01	4,403E-08
ENSAYO II	9,506E-08	8,770E-01	8,337E-08
ENSAYO III	5,810E-08	8,730E-01	5,072E-08
ENSAYO IV	5,929E-08	8,770E-01	5,200E-08
ENSAYO V	6,785E-08	8,770E-01	5,951E-08
ENSAYO VI	5,708E-08	8,730E-01	4,983E-08
ENSAYO VII	8,220E-08	8,730E-01	7,176E-08
ENSAYO VIII	8,765E-08	8,750E-01	7,669E-08
PROMEDIO	6,968E-08	8,753E-01	6,099E-08

4.2.1.4 Ensayos de consolidación unidimensional

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos areno limosos en su estado Virgen con el fin de determinar el Coeficiente de Consolidación.

Tabla 22. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Arenos Limosos en estado Virgen

ARENA LIMOSA VIRGEN				
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL				
C_v (m^2/seg)				
	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
ENSAYO I	3,590E-06	6,341E-06	5,618E-07	3,377E-06
ENSAYO II	1,265E-06	1,210E-06	1,106E-06	9,528E-07
ENSAYO III	3,566E-06	3,506E-06	3,429E-06	2,098E-07
PROMEDIO	2,807E-06	3,686E-06	1,699E-06	1,513E-06

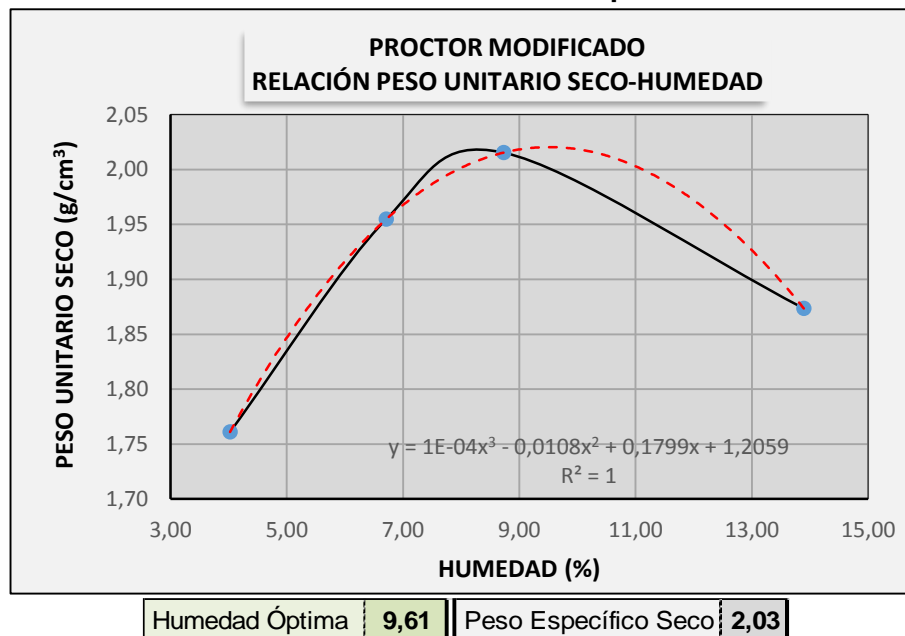
4.2.2 Especímenes contaminados

4.2.2.1 Especímenes contaminados con concentraciones del 20%

4.2.2.1.1 Ensayo de próctor modificado

A continuación se expone el resultado correspondiente a la prueba de Próctor Modificado realizada a una muestra de un suelo areno limoso contaminado con una concentración del 20% de la porosidad con el fin de la determinar de su Humedad Óptima y su Peso Específico Seco.

Figura 40. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Limosa Contaminada con el 20% de la porosidad



4.2.2.1.2 Ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos areno limosos contaminados con una concentración del 20% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Permeabilidad a temperatura estándar de 20° C.

Tabla 23. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Arcillosos Contaminados con el 20% de la porosidad

ARENA LIMOSA CONTAMINADA - 20%			
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE			
	K_t (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)
ENSAYO I	2,173E-08	9,030E-01	1,962E-08
ENSAYO II	1,529E-08	9,030E-01	1,381E-08
ENSAYO III	3,172E-08	9,030E-01	2,865E-08
ENSAYO IV	3,175E-08	9,010E-01	2,861E-08
ENSAYO V	3,198E-08	9,010E-01	2,882E-08
ENSAYO VI	2,158E-08	9,030E-01	1,948E-08
ENSAYO VII	4,265E-08	9,030E-01	3,852E-08
ENSAYO VIII	3,365E-08	8,970E-01	3,018E-08
PROMEDIO	2,879E-08	9,018E-01	2,596E-08

4.2.2.1.3 Ensayos de consolidación unidimensional

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos areno limosos contaminados con una concentración del 20% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Consolidación.

Tabla 24. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Limosos Contaminados con el 20% de la porosidad

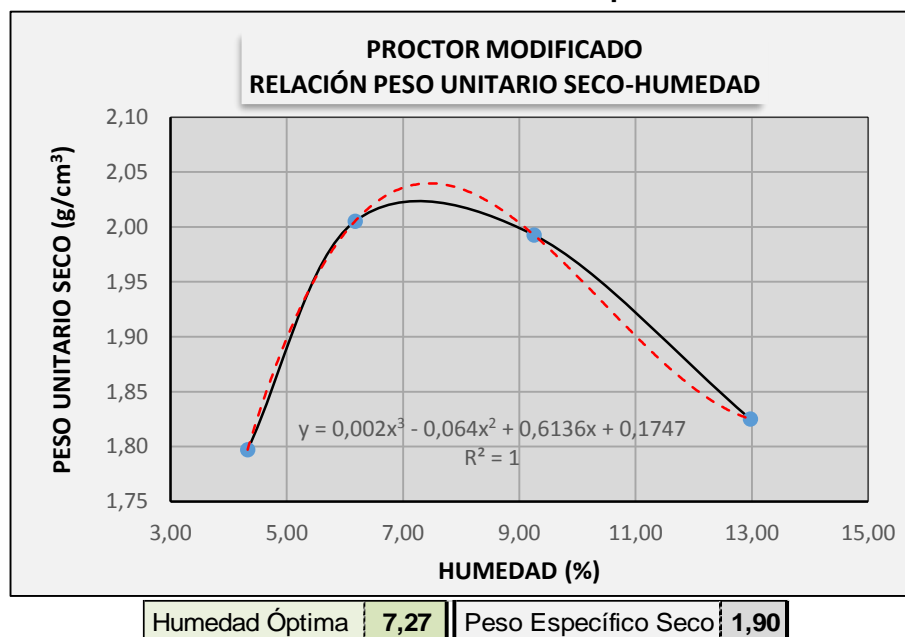
ARENA LIMOSA CONTAMINADA - 20%							
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL							
Cv (m ² /seg)							
ENSAYO II	0,14 (kgf/cm ²)	0,25 (kgf/cm ²)	0,48 (kgf/cm ²)	0,93 (kgf/cm ²)	1,84 (kgf/cm ²)	3,65 (kgf/cm ²)	7,27 (kgf/cm ²)
	2,869E-06	3,873E-06	3,698E-06	3,550E-06	4,911E-06	4,608E-06	4,325E-06
ENSAYO III	0,14 (kgf/cm ²)	0,25 (kgf/cm ²)	0,48 (kgf/cm ²)	0,93 (kgf/cm ²)	1,84 (kgf/cm ²)	3,65 (kgf/cm ²)	7,27 (kgf/cm ²)
	2,875E-06	1,552E-05	5,429E-06	5,242E-06	5,000E-06	4,737E-06	2,875E-06
PROMEDIO	0,14 (kgf/cm ²)	0,25 (kgf/cm ²)	0,48 (kgf/cm ²)	0,93 (kgf/cm ²)	1,84 (kgf/cm ²)	3,65 (kgf/cm ²)	7,27 (kgf/cm ²)
	2,872E-06	9,698E-06	4,563E-06	4,396E-06	4,955E-06	4,673E-06	3,600E-06

4.2.2.2 Especímenes contaminados con concentraciones del 30%

4.2.2.2.1 Ensayo de próctor modificado

A continuación se expone el resultado correspondiente a la prueba de Próctor Modificado realizada a una muestra de un suelo areno limoso contaminado con una concentración del 30% de la porosidad con el fin de la determinar de su Humedad Óptima y su Peso Específico Seco.

Figura 41. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Limosa Contaminada con el 30% de la porosidad



4.2.2.2.2 Ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos areno limosos contaminados con una concentración del 30% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Permeabilidad a temperatura estándar de 20° C.

Tabla 25. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Areno Limoso Contaminados con el 30% de la porosidad

ARENA LIMOSA CONTAMINADA - 30%			
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE			
	K_t (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)
ENSAYO I	1,458E-08	9,030E-01	1,317E-08
ENSAYO II	2,218E-08	9,030E-01	2,003E-08
ENSAYO III	1,438E-08	9,010E-01	1,295E-08
ENSAYO IV	1,261E-08	9,010E-01	1,136E-08
ENSAYO V	2,354E-08	9,010E-01	2,121E-08
ENSAYO VI	1,438E-08	8,990E-01	1,292E-08
PROMEDIO	1,694E-08	9,013E-01	1,527E-08

4.2.2.2.3 Ensayos de consolidación unidimensional

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos areno limosos contaminados con una concentración del 30% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Consolidación.

Tabla 26. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Areno Limosos Contaminados con el 30% de la porosidad

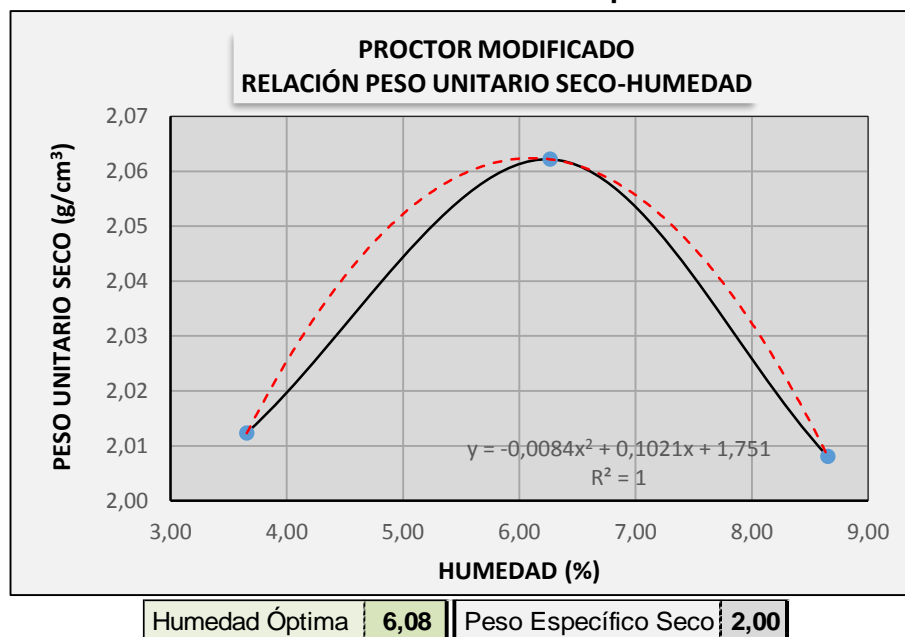
ARENA LIMOSA CONTAMINADA - 30%								
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL								
Cv (m ² /seg)								
ENSAYO I	0,26 (kgf/cm ²) 1,655E-06	0,51 (kgf/cm ²) 5,251E-06	1,02 (kgf/cm ²) 5,053E-06	2,04 (kgf/cm ²) 7,576E-06	4,08 (kgf/cm ²) 7,176E-06	8,15 (kgf/cm ²) 6,670E-06	16,31 (kgf/cm ²) 6,148E-06	32,62 (kgf/cm ²) 5,637E-06
ENSAYO II	0,14 (kgf/cm ²) 5,61735E-06	0,25 (kgf/cm ²) 5,57321E-06	0,48 (kgf/cm ²) 5,46397E-06	0,93 (kgf/cm ²) 5,29032E-06	1,84 (kgf/cm ²) 5,06904E-06	3,65 (kgf/cm ²) 4,80471E-06	7,27 (kgf/cm ²) 7,02115E-06	
ENSAYO III	0,19 (kgf/cm ²) 8,805E-06	0,51 (kgf/cm ²) 8,646E-06	1,15 (kgf/cm ²) 8,485E-06	2,76 (kgf/cm ²) 8,070E-06	5,97 (kgf/cm ²) 7,597E-06	12,38 (kgf/cm ²) 7,043E-06		
PROMEDIO	0,25 (kgf/cm ²) 3,614E-06	0,5 (kgf/cm ²) 6,454E-06	1,0 (kgf/cm ²) 6,276E-06	2,0 (kgf/cm ²) 6,322E-06	4,0 (kgf/cm ²) 5,990E-06			

4.2.2.3 Especímenes contaminados con concentraciones del 40%

4.2.2.3.1 Ensayo de próctor modificado

A continuación se expone el resultado correspondiente a la prueba de Próctor Modificado realizada a una muestra de un suelo areno limoso contaminado con una concentración del 40% de la porosidad con el fin de la determinar de su Humedad Óptima y su Peso Específico Seco.

Figura 42. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Limosa Contaminada con el 40% de la porosidad



4.2.2.3.2 Ensayos de permeabilidad por el método de cabeza variable

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos areno limosos contaminados con una concentración del 40% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Permeabilidad a temperatura estándar de 20° C.

Tabla 27. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Arena Limosa Contaminados con el 40% de la porosidad

ARENA LIMOSA CONTAMINADA - 40%			
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE			
	K_t (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)
ENSAYO I	8,973E-09	8,990E-01	8,067E-09
ENSAYO II	8,826E-09	8,990E-01	7,934E-09
ENSAYO III	9,408E-09	8,990E-01	8,458E-09
ENSAYO IV	8,986E-09	8,990E-01	8,079E-09
ENSAYO V	7,120E-09	8,970E-01	6,387E-09
ENSAYO VI	8,746E-09	8,970E-01	7,845E-09
ENSAYO VII	8,855E-09	8,970E-01	7,943E-09
ENSAYO VIII	8,954E-09	8,990E-01	8,050E-09
PROMEDIO	8,733E-09	8,983E-01	7,845E-09

4.2.2.3.3 Ensayo de consolidación unidimensional

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos arena limosa contaminados con una concentración del 40% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Consolidación.

Tabla 28. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Arena Limosa Contaminados con el 40% de la porosidad

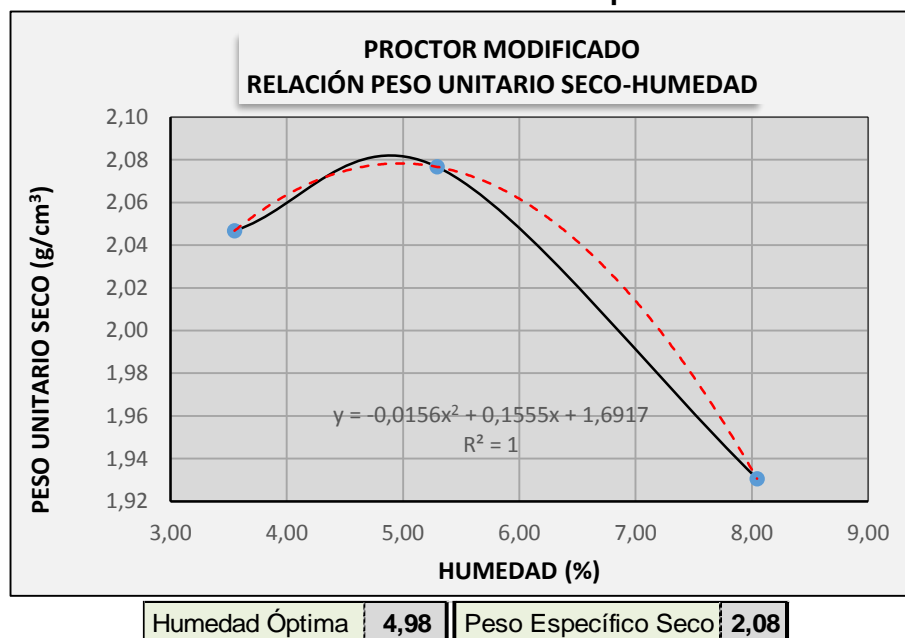
ARENA LIMOSA CONTAMINADA - 40%				
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL				
C_v (m²/seg)				
ENSAYO I	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	2,303E-06	2,274E-06	3,497E-06	3,408E-06
ENSAYO II	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	2,286E-06	3,541E-06	3,499E-06	3,426E-06
ENSAYO III	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	2,272E-06	3,522E-06	3,485E-06	3,410E-06
PROMEDIO	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
	2,287E-06	3,113E-06	3,494E-06	3,415E-06

4.2.2.4 Especímenes contaminados con concentraciones del 50%

4.2.2.4.1 Ensayo de próctor modificado

A continuación se expone el resultado correspondiente a la prueba de Próctor Modificado realizada a una muestra de un suelo areno limoso contaminado con una concentración del 50% de la porosidad con el fin de la determinar de su Humedad Óptima y su Peso Específico Seco.

Figura 43. Curva Parabólica del ensayo Próctor Modificado para una Arena Limosa Contaminada con el 50% de la porosidad



4.2.2.4.2 Ensayo de permeabilidad por el método de cabeza variable

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos areno limosos contaminados con una concentración del 50% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Permeabilidad a temperatura estándar de 20° C.

Tabla 29. Resultados de los ensayos de Permeabilidad por el método de Cabeza Variable para suelos Arena Limosa Contaminados con el 50% de la porosidad

ARENA LIMOSA CONTAMINADA - 50%			
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE			
	K_t (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)
ENSAYO I	1,060E-08	8,790E-01	9,320E-09
ENSAYO II	4,456E-09	8,790E-01	3,917E-09
ENSAYO III	8,874E-09	8,790E-01	7,801E-09
ENSAYO IV	4,396E-09	8,790E-01	3,864E-09
ENSAYO V	6,115E-09	8,790E-01	5,376E-09
ENSAYO VI	8,053E-09	8,790E-01	7,078E-09
ENSAYO VII	6,581E-09	8,790E-01	5,785E-09
ENSAYO VIII	5,811E-09	8,790E-01	5,108E-09
PROMEDIO	6,861E-09	8,790E-01	6,031E-09

4.2.2.4.3 Ensayo de consolidación unidimensional

En la tabla que se expone a continuación se pueden apreciar los resultados correspondientes a los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos arena limosa contaminados con una concentración del 50% de la porosidad con el fin de determinar el Coeficiente de Consolidación.

Tabla 30. Resultados de los ensayos de Consolidación Unidimensional para suelos Arena Limosa Contaminados con el 50% de la porosidad

ARENA LIMOSA CONTAMINADA - 50%				
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL				
C_v (m²/seg)				
	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)
ENSAYO I	3,606E-06	6,200E-06	6,029E-06	5,821E-06
ENSAYO II	2,254E-06	3,422E-06	3,328E-06	7,999E-07
ENSAYO III	3,560E-06	3,412E-06	3,380E-06	3,258E-06
PROMEDIO	3,140E-06	4,344E-06	4,246E-06	3,293E-06

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN

Para el desarrollo de una investigación en la que se pretende evaluar el comportamiento mecánico de los suelos a partir de los resultados obtenidos en la ejecución de ensayos tales como permeabilidad por el método de cabeza variable y consolidación unidimensional, es indispensable determinar la humedad óptima para el buen desarrollo del proceso.

Cumplido lo anterior y partir de los resultados obtenidos en la prueba se hizo un análisis detallado evaluando los parámetros de la humedad óptima y el peso específico seco en ambos suelos.

5.1.1 Suelos arenos arcillosos y areno limosos

A partir de los resultados arrojados por el ensayo modificado de compactación, se observó que tanto los suelos areno limosos como los suelos arenos arcillosos alterados por el contaminante presentan un comportamiento similar de acuerdo a la variación de la humedad óptima con respecto a los especímenes vírgenes. Por ello se optó por realizar de modo general para ambos suelos una explicación que cubriese el fenómeno apreciado.

5.1.1.1 Análisis de la humedad óptima para muestras de suelo areno arcillosas y arenos limosas

En la tabla que se muestra a continuación se pueden apreciar los porcentajes en que varían los resultados de la humedad óptima de los suelos arenos arcillosos y areno limosos contaminados con hidrocarburos, con respecto a los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con muestras de suelo vírgenes.

Tabla 31. Análisis comparativo de los porcentajes de variación de las humedades óptimas en muestras areno arcillosas y areno limosas contaminados con hidrocarburos respecto a los resultados de las muestras de suelo vírgenes.

Grado Contaminante	Humedad Optima		% de variación	
	Suelo Areno Arcilloso	Suelo Areno Limoso	Suelo Areno Arcilloso	Suelo Areno Limoso
0%	14,61	11,05	0,00	0,00
20%	12,48	9,61	14,62	13,00
30%	9,37	7,27	35,85	34,16
40%	7,17	6,08	50,93	44,99
50%	6,04	4,98	58,66	54,89

A partir de los resultados expuestos, se puede dar clara evidencia que la presencia del hidrocarburo en el suelo, altera sus propiedades mecánicas, lo que demuestra que a medida que se aumenta el grado contaminante en el suelo, la humedad óptima varía de forma decreciente con respecto a la del suelo virgen, éste, comportamiento observado probablemente se deba a que el hidrocarburo presenta un efecto envolvente en las partículas de suelo.

Adicionalmente se pueden apreciar las gráficas con los resultados correspondientes a las humedades óptimas de los ensayos de próctor modificado de acuerdo al tipo de suelo y concentración con que se contaminaron; en ellas se evidencia la línea de tendencia decreciente.

Figura 44. Coeficiente de Permeabilidad vs. Concentración del Contaminante en suelos Areno Limosos

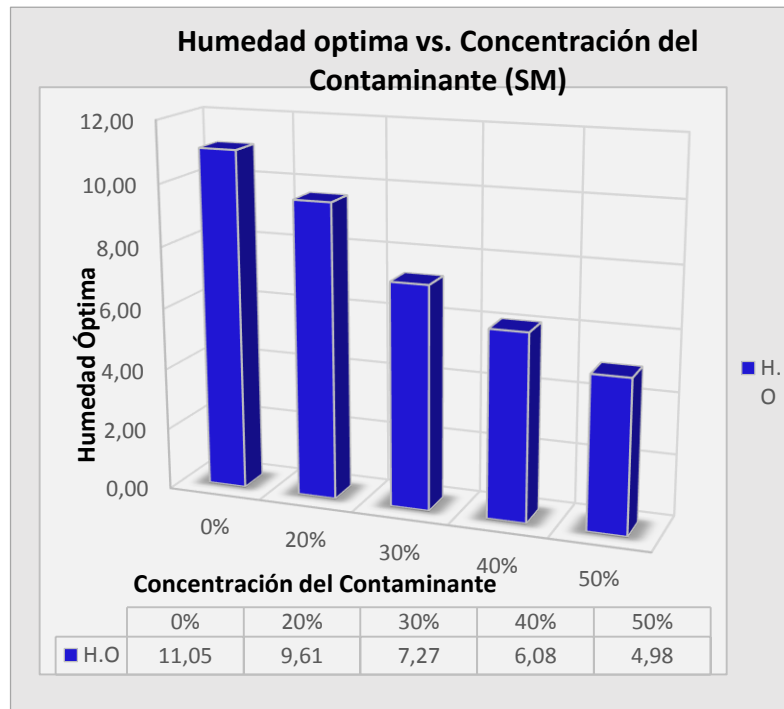
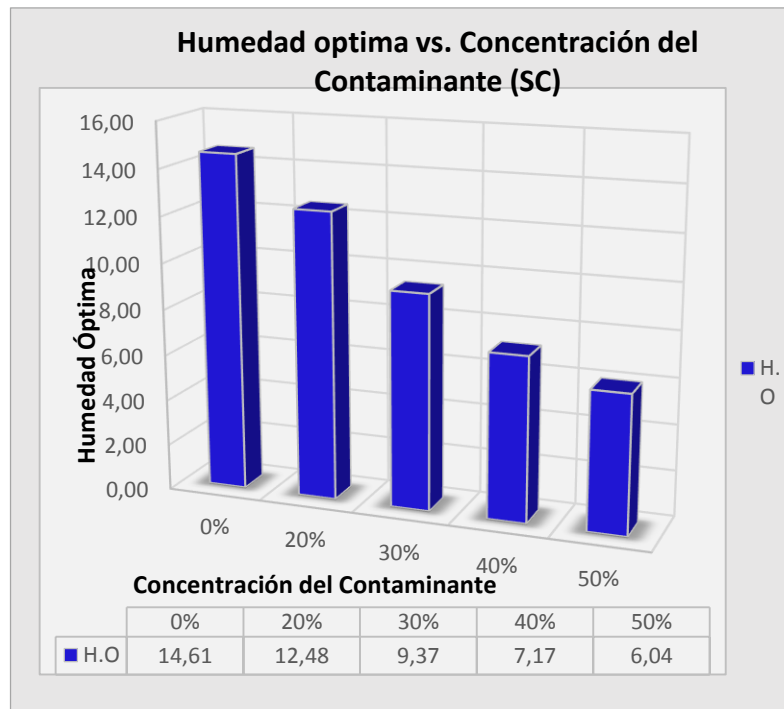


Figura 45. Coeficiente de Permeabilidad vs. Concentración del Contaminante en suelos Areno Arcillosos



5.2 DE PERMEABILIDAD POR EL METODO DE CABZA VARIABLE

5.2.1 Análisis de los coeficientes de permeabilidad para muestras de suelo areno arcillosas y arenas limosas

A partir de los resultados arrojados por el ensayo permeabilidad por el método de cabeza variable, se observó que tanto los suelos areno limosos como los suelos arenos arcillosos alterados por el contaminante presentan un comportamiento similar de acuerdo al coeficiente de permeabilidad con respecto a los especímenes vírgenes. Por ello se optó por realizar de modo general para ambos suelos una explicación que cubriese el fenómeno apreciado.

5.2.1.1 Suelos Areno Arcillosos

Se realizó el respectivo análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de permeabilidad por el método cabeza variable para los suelos areno arcillosos contaminados con concentraciones del 20% 30% 40% 50% de la porosidad con respecto a los resultados obtenidos en los ensayos con muestras vírgenes.

En la tabla que se muestra a continuación se pueden apreciar los porcentajes en que varían los resultados de los coeficientes de permeabilidad de los suelos arenos arcillosos contaminados con hidrocarburos, con respecto a los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con muestras de suelo vírgenes. En estos se evidencia que a mayor grado de contaminación, menor será la permeabilidad del espécimen.

Tabla 32. Análisis comparativo de los porcentajes de variación de los coeficientes de permeabilidad en muestras areno arcillosas contaminados con hidrocarburos respecto a los resultados de muestras de suelo vírgenes.

SUELO ARENO ARCILLOSO						
Porcentajes de Variación de los resultados en suelos contaminados con respecto a los resultados de las muestras de suelo virgen						
Parámetro	K_f (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)	Porcentajes de Variación (%)		
Suelo No Contaminado	5,030E-08	8,748E-01	4,401E-08	0,00	0,00	0,00
Suelo Contaminado al 20%	2,651E-08	8,755E-01	2,321E-08	47,29	0,09	47,26
Suelo Contaminado al 30%	1,406E-08	8,990E-01	1,264E-08	72,04	2,77	71,28
Suelo Contaminado al 40%	7,578E-09	8,780E-01	6,654E-09	84,93	0,37	84,88
Suelo Contaminado al 50%	7,443E-09	8,778E-01	6,534E-09	85,20	0,34	85,15

5.2.1.2 Suelos Areno Limosos

Se realizó el respectivo análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de permeabilidad por el método cabeza variable para los suelos areno limosos contaminados con concentraciones del 20% 30% 40% 50% de la porosidad con respecto a los resultados obtenidos en los ensayos con muestras vírgenes.

En la tabla que se muestra a continuación se pueden apreciar los porcentajes en que varían los resultados de los coeficientes de permeabilidad de los suelos arenos limosos contaminados con hidrocarburos, con respecto a los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con muestras de suelo vírgenes.

En estos se evidencia que a mayor grado de contaminación, menor será la permeabilidad del espécimen.

Tabla 33. Análisis comparativo de los porcentajes de variación de los coeficientes de permeabilidad en muestras areno limosas contaminados con hidrocarburos respecto a los resultados de muestras de suelo vírgenes.

SUELO ARENO LIMOSO						
Porcentajes de Variación de los resultados en suelos contaminados con respecto a los resultados de las muestras de suelo virgen						
Parámetro	K_f (cm/s)	n_t/n_{20}	K_{20} (cm/s)	Porcentajes de Variación (%)		
Suelo No Contaminado	6,968E-08	8,753E-01	6,099E-08	0,00	0,00	0,00
Suelo Contaminado al 20%	2,879E-08	9,018E-01	2,596E-08	58,68	3,03	57,44
Suelo Contaminado al 30%	1,694E-08	9,013E-01	1,527E-08	75,68	2,98	74,96
Suelo Contaminado al 40%	8,733E-09	8,983E-01	7,845E-09	87,47	2,63	87,14
Suelo Contaminado al 50%	6,861E-09	8,790E-01	6,031E-09	90,15	0,43	90,11

Según los resultados, se puede evidenciar que el efecto contaminante a medida que se aumenta la concentración del hidrocarburo tiende a alterar las propiedades mecánicas del suelo.

Esto se debe a que durante la realización de la etapa de mezclado, el hidrocarburo tiende a incorporarse en la microestructura del suelo actuando como una capa superficial en las partículas.

El agente aglutinante obstruye a mayor escala los vacíos en la medida en que se incrementa la concertación, como consecuencia también implica que la

permeabilidad al aire tiende a valores mínimos, pues para que haya un drene de las burbujas solo sería posible con la intervención del agua.

Adicionalmente se puede observar en las figuras los resultados correspondientes al coeficiente de permeabilidad por el método de cabeza variable de acuerdo a la concentración con que se contaminó.

Figura 46. Coeficiente de Permeabilidad vs. Concentración del Contaminante en suelos Areno Limosos

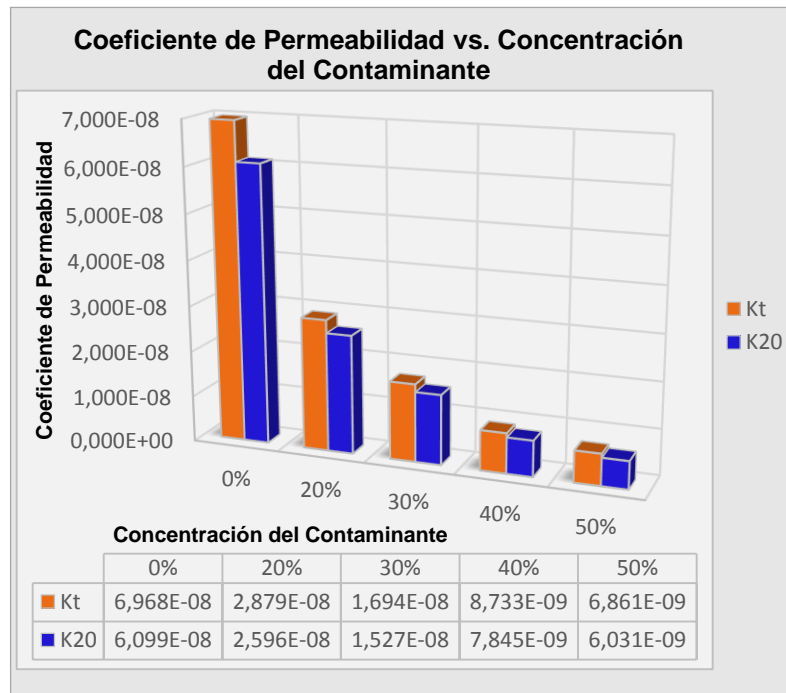


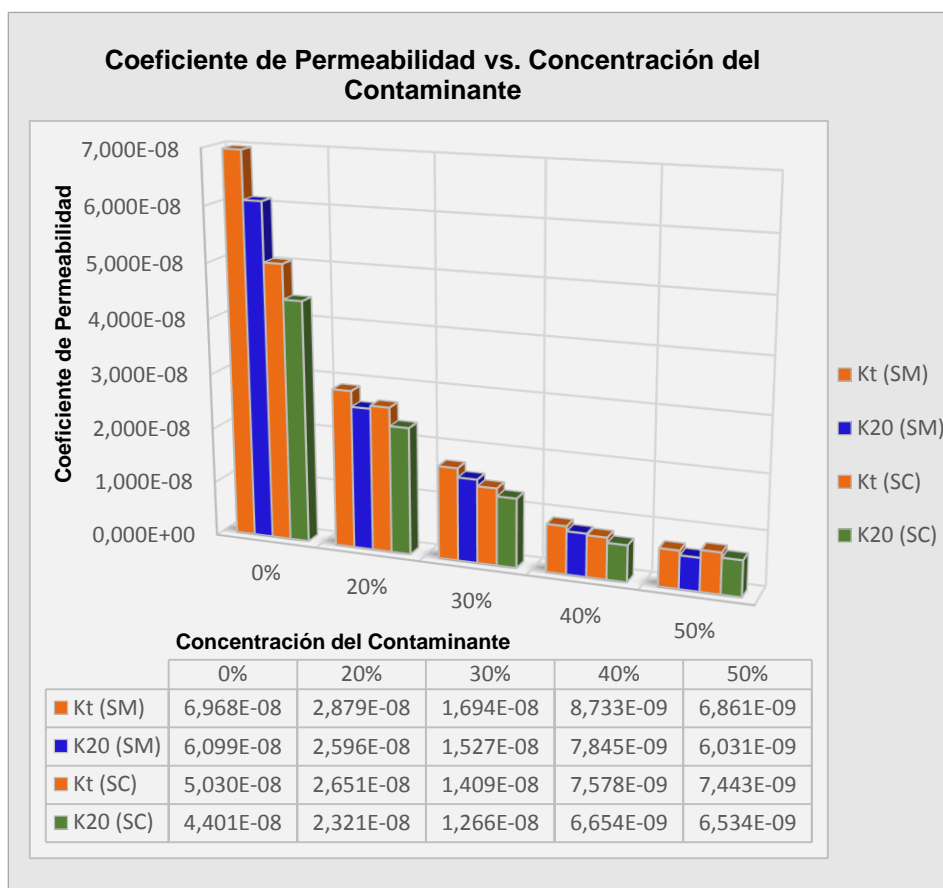
Figura 47. Coeficiente de Permeabilidad vs. Concentración del Contaminante en suelos Areno Arcillosos



5.3 RESULTADOS SUELO ARENO ARCILLOSO VS. SUELO ARENO LIMOSO

En la figura que se muestra a continuación se aprecia un esquema comparativo del coeficiente de permeabilidad vs. el grado del contaminante para suelos areno arcilloso y areno limosos.

Figura 48. Coeficiente de Permeabilidad vs. Concentración del Contaminante en suelos areno arcillosos y areno limosos



Al analizar cuidadosamente la gráfica anterior se puede observar que ambos suelos presentan la misma línea de tendencia, sin embargo durante el proceso investigativo la arena arcillosa demostró ser un suelo con un mayor grado de impermeabilidad que la arena limosa en cada uno de los grados contaminantes a excepción del último: concentración con el 50% de la porosidad en el cual la arena limosa se comportó mucho más impermeable que la arena arcillosa

Debido al componente arcilloso del suelo areno arcilloso, su microestructura porosa tendrá una permeabilidad mucho menor a la del suelo areno limoso, es por esta razón que el suelo areno arcilloso se comportó más impermeable.

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Partiendo de los resultados obtenidos correspondientes a las pruebas del ensayo de consolidación unidimensional, se evaluó el parámetro de coeficiente de consolidación para las muestras de suelo contaminadas respecto a las muestras sin contaminar. Para ello se plasmaron tablas en las que se muestran los porcentajes de variación de los coeficientes de consolidación de las muestras contaminadas respecto a las vírgenes. En todos los casos, los valores de esfuerzos empleados se aproximaron a 0,5 kgf/cm²; 1,0 kgf/cm²; 2,0 kgf/cm² y 4,0 kgf/cm²

5.4.1 Análisis de los coeficientes de consolidación para muestras de suelo areno arcillosas

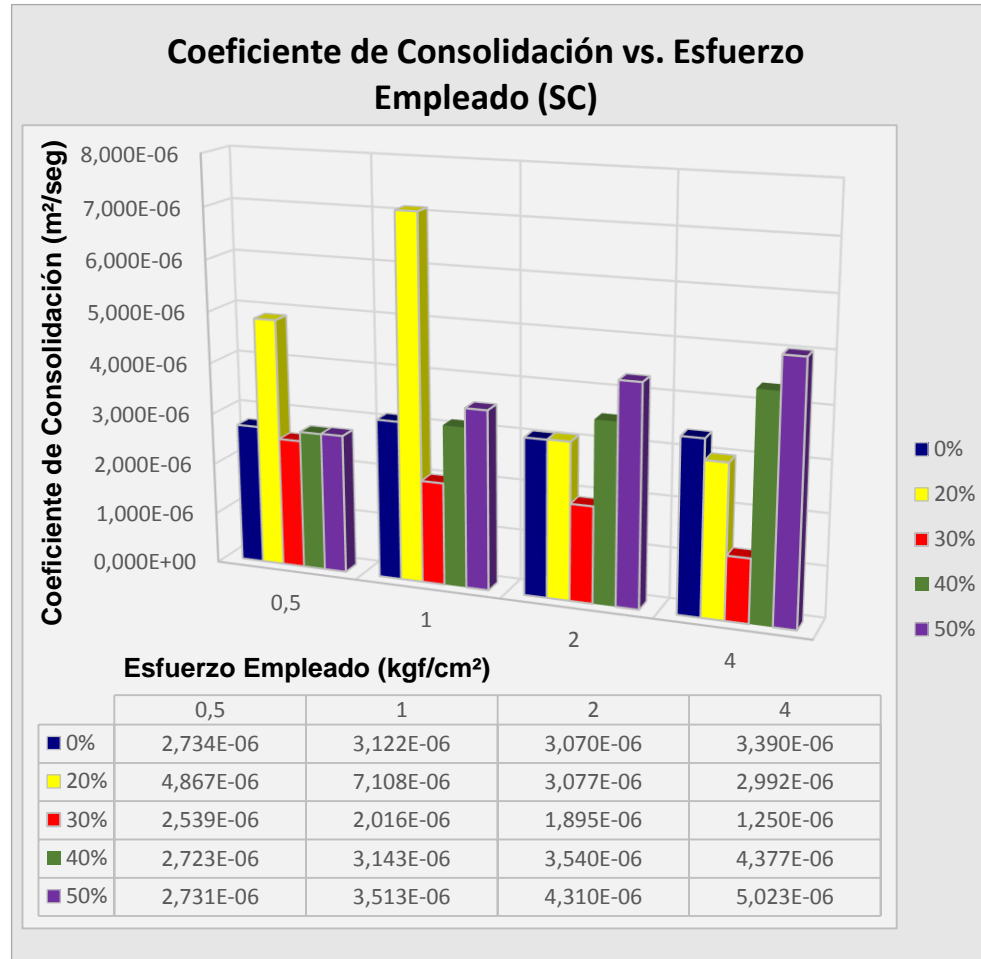
En la tabla que se muestra a continuación se pueden apreciar los porcentajes en que varían los resultados de los coeficientes de consolidación de los suelos arenos arcillosos contaminados con hidrocarburos, con respecto a los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con muestras de suelo vírgenes. Adicionalmente, se puede apreciar la variación del coeficiente de consolidación. Claramente se puede evidenciar que hay una gran variación del porcentaje de los resultados obtenidos de cada uno de los ciclos de carga.

Tabla 34. Análisis comparativo de los porcentajes de variación de los coeficientes de consolidación en muestras areno arcillosas contaminados con hidrocarburos respecto a los resultados de las muestras de suelo vírgenes.

SUELO ARENO ARCILLOSO								
Porcentajes de Variación de los resultados en suelos contaminados con respecto a los resultados de las muestras de suelo virgen								
Parámetro	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)	Porcentajes de Variación (%)			
Suelo No Contaminado	2,7341E-06	3,1217E-06	3,0700E-06	3,3898E-06	0,00	0,00	0,00	0,00
Suelo Contaminado al 20%	4,8670E-06	7,1076E-06	3,0772E-06	2,9923E-06	78,01	127,68	0,23	11,73
Suelo Contaminado al 30%	2,5389E-06	2,0158E-06	1,8949E-06	1,2499E-06	7,14	35,43	38,28	63,13
Suelo Contaminado al 40%	2,7230E-06	3,1431E-06	3,5401E-06	4,3773E-06	0,41	0,68	15,31	29,13
Suelo Contaminado al 50%	2,7307E-06	3,5127E-06	4,3101E-06	5,0229E-06	0,12	12,53	40,39	48,18

En la figura que se muestra a continuación se aprecia un esquema comparativo del coeficiente de Consolidación vs. el esfuerzo empleado para suelos areno arcillosos.

Figura 49. Coeficiente de Consolidación (m^2/s) vs. Esfuerzo Empleado en suelos Areno Arcillosos ($kgf/cm^2/s$)



En las muestras de suelo areno arcillosas no es posible inferir una línea de tendencia que tipifique el comportamiento del suelo areno limoso frente al coeficiente de consolidación, pues al analizar la gráfica se observa que los coeficientes para las muestras contaminadas con concentraciones del 20% y 30% tienden desviarse con respecto a las otras.

Sin embargo al analizar las muestras de suelo contaminadas con concentraciones del 40% y 50% de la porosidad con respecto a las muestras vírgenes, se observó en estas concentraciones la consolidación va en aumento a medida que se incrementa el esfuerzo

Los especímenes contaminados con concentración del 20% fueron los suelos, cuya consolidación fue la más rápida tras la aplicación de los dos primeros esfuerzos; luego de esto tiende a decrecer.

5.4.2 Análisis de los coeficientes de consolidación para muestras de suelo areno limosas

En la tabla que se muestra a continuación se pueden apreciar los porcentajes en que varían los resultados de los coeficientes de consolidación de los suelos arenos limosos contaminados con hidrocarburos, con respecto a los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con muestras de suelo vírgenes.

Tabla 35. Análisis comparativo de los porcentajes de variación de los coeficientes de consolidación en muestras areno limosas contaminados con hidrocarburos respecto a los resultados de las muestras de suelo vírgenes.

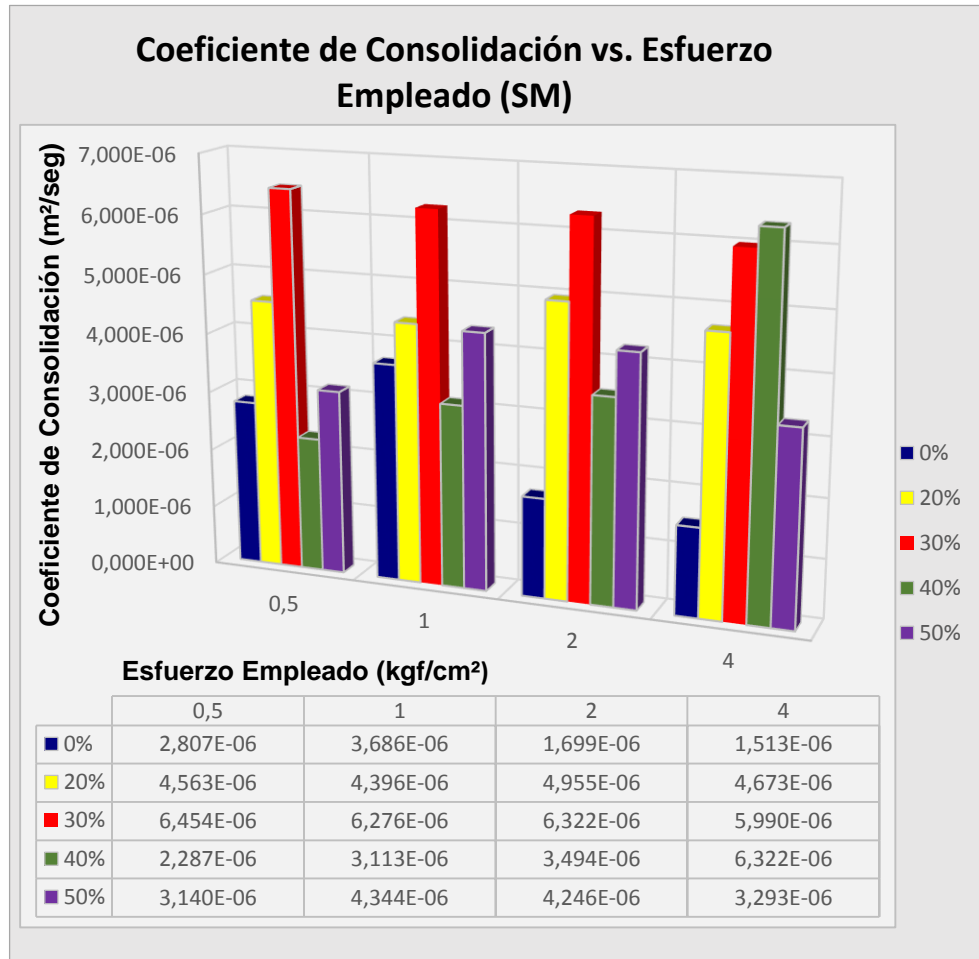
SUELO ARENO LIMOSO								
Porcentajes de Variación de los resultados en suelos contaminados con respecto a los resultados de las muestras de suelo virgen								
Parámetro	0,5 (kgf/cm ²)	1,0 (kgf/cm ²)	2,0 (kgf/cm ²)	4,0 (kgf/cm ²)	Porcentajes de Variación (%)			
Suelo No Contaminado	2,8072E-06	3,6858E-06	1,6990E-06	1,5133E-06	0,00	0,00	0,00	0,00
Suelo Contaminado al 20%	4,5635E-06	4,3957E-06	4,9554E-06	4,6728E-06	62,56	19,26	191,68	208,78
Suelo Contaminado al 30%	6,4538E-06	6,2759E-06	6,3224E-06	5,9904E-06	129,90	70,27	272,14	295,84
Suelo Contaminado al 40%	2,2872E-06	3,1125E-06	3,4937E-06	6,3224E-06	18,52	15,55	105,64	317,79
Suelo Contaminado al 50%	3,1401E-06	4,3445E-06	4,2456E-06	3,2929E-06	11,86	17,87	149,89	117,60

En la tabla que se expone arriba, se pueden apreciar los resultados correspondientes a los coeficientes de consolidación obtenidos para suelos areno limosos, tras la generación de esfuerzos de 0,5 kgf/cm²; 1,0 kgf/cm²; 2,0 kgf/cm² y 4,0 kgf/cm². Junto a estos se observan los porcentajes en que varían los resultados de los especímenes contaminados con respecto a los vírgenes.

Claramente se puede evidenciar que hay una gran variación del porcentaje de los resultados obtenidos de cada uno de los ciclos de carga.

En la figura que se muestra a continuación se aprecia un esquema comparativo del coeficiente de Consolidación vs. el esfuerzo empleado para suelos areno limosos.

Figura 50. Coeficiente de Consolidación vs. Esfuerzo Empleado en suelos Arena Limosos



En las muestras de suelo arena limosas no es posible inferir una línea de tendencia que tipifique el comportamiento del suelo arena limoso frente al coeficiente de consolidación, pues según se puede evidenciar que la velocidad en que se consolida el suelo tiende a ser cada vez mayor a medida que se incrementan los esfuerzos para los especímenes vírgenes, y contaminados con concentración del 20% y 30% de la porosidad; sin embargo la velocidad en que se deforma el suelo tiende a decrecer sustancialmente para los suelos contaminados con concentración del 40% y 50% de la porosidad.

Los suelos areno limosos contaminados con concentraciones del 40% y 50% de la porosidad tienden a ser menos susceptibles a deformarse que los especímenes contaminados con concentraciones del 20% y 30%.

6. CONCLUSIONES

6.1 CON RELACIÓN AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS CON RESPECTO AL ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN

Un requisito previo para entrar en forma en el análisis respecto a los ensayos de permeabilidad y consolidación es la realización del ensayo de compactación mediante la energía del Próctor modificada.

Cabe resaltar que si se tiene claridad acerca del concepto del Próctor modificado, esto hará más fácil la comprensión de su procedimiento. Durante la experimentación se observó que a medida que se aumentaba el contenido de humedad en un suelo, se incrementaba el peso volumétrico seco, sin embargo éste llegó a un punto en el que decreció en la medida en que su contenido de agua aumentó.

Para los suelos contaminados con concentraciones del 40% y 50% se observó que el peso volumétrico disminuyó sustancialmente, Se puede concluir que con la presencia de hidrocarburos como la glicerina en concentraciones mayores o iguales al 40% de la porosidad, la capacidad del agua para hidratar el suelo en el ensayo de próctor modificado resulta ser nula puesto a que el efecto de la glicerina sobresatura a tal punto la masa seca del suelo llegando a ocasionar la separación de las partículas. Por ende las compactaciones serán regulares debido a que el hidrocarburo absorbe la energía del próctor.

Para el proceso de compactación se concluye en los suelos contaminados con el 50% de la porosidad son totalmente descartables y no se les puede dar uso alguno a la hora de planificar un proyecto constructivo. Las concentraciones del 40% no tienen un efecto tan negativo como las anteriores, pero su uso en la cimentación podría traducirse posteriormente en deformaciones a los elementos estructurales de una edificación.

Pero, por otro lado si se quiere aprovechar un suelo alterado por la presencia de hidrocarburos, los resultados demuestran que las concentraciones comprendidas entre 30% y 40% de la porosidad, puede llegar a representar una opción factible para este propósito. Sin embargo, es recomendable replicar los estudios para concentraciones del 35% para corroborar esta afirmación.

Para el caso de las concentraciones del 20%, siendo este el menor grado con el que se contaminaron ambos suelos, no tendría mucha incidencia en procesos

ingenieriles si lo que se requiere es hacerlo rendir en una cimentación; esto se debe a que la glicerina al igual que el agua presenta densidades mucho menores a la de los suelos y sus comportamientos son similares cuando se requiere aumentar la humedad, con la diferencia de que es más pronunciado en el hidrocarburo (el peso volumétrico disminuiría más rápido en el suelo contaminado que en el suelo virgen), y a pesar de que una concentración del 30% de la porosidad es un grado más alejado al 20% no se puede asegurar con total certeza de que se han mejorado las propiedades mecánicas del suelo al aumentar su resistencia y disminuir su capacidad deformante.

A medida que se aumentó el grado contaminante (20%, 30%, 40%, 50%) en los dos tipos de suelos (areno limosos y areno arcillosos) se requirió una reducción mayor del contenido de humedad para la compactación de cada una de las cinco (5) capas del Próctor modificado.

En este caso, una opción de secado al aire libre por varios días, podría resultar inefectiva para la reducción de la humedad del suelo, esto se debe a que durante la noche el suelo está expuesto a fuertes cambios de temperatura que impiden que el suelo mantenga una humedad constante. Para dar solución a este problema, se propone exponer el suelo a periodos de tiempo prolongados de tres (3) horas como mínimo bajo la luz del sol y una vez que se considere que ya esté lo suficientemente seco, se proceda a la realización del ensayo lo antes posible.

Se puede concluir que con la presencia de hidrocarburos como la glicerina, en concentraciones mayores o iguales al 50% de la porosidad, la capacidad del agua para hidratar el suelo en el ensayo de Próctor modificado resulta ser nula, puesto que, el efecto de la glicerina sobresatura la masa porosa llegando a ocasionar la separación de las partículas; por ende las compactaciones serán regulares debido a que el hidrocarburo absorbe la energía del martillo una vez que este lo compacte.

6.2 CON RELACIÓN AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS CON RESPECTO A LA PERMEABILIDAD POR EL MÉTODO DE CABEZA VARIABLE

Para dar un análisis muy minucioso de este ensayo y poder concluir apropiadamente, se debe conocer con claridad el concepto de homogeneidad de un suelo, pues no sería muy conveniente ignorarlo, y es por el simple hecho de que un suelo no siempre se comporta de la misma manera. Por lo tanto en algunos ensayos se obtuvieron resultados bastante incoherentes con respecto a otros.

Se puede concluir a partir de los cuatro grados de contaminación empleados para el desarrollo de esta investigación (20%, 30%, 40% y 50%) que a mayores concentraciones de contaminante en los suelos, la permeabilidad comienza a decrecer de manera progresiva. La justificación a esto es muy simple, pues una vez se realice la mezcla entre el suelo y el hidrocarburo, el aceite va a tender a incorporarse en los espacios de vacíos de la microestructura del suelo actuando como un agente aglutinante que dará cohesividad a las partículas de suelo.

Ahora bien una conclusión significativa que puede realizarse a partir de las observaciones fue la disminución de su permeabilidad; es decir, que a pesar de que el suelo aumentaba su impermeabilidad a medida que se incrementaba el porcentaje de contaminación su mejoría se demostraba de una manera decreciente, los márgenes de referencia comprendidos entre los mayores grados de concentración tales como el 40% y el 50% fueron mucho menores que los comprendidos entre 30% y 40%, a su vez estos fueron menores a los que estaban comprendidos entre las concentraciones del 20% y el 30%. Esto puede deberse como un producto al escape del hidrocarburo durante la ejecución del ensayo.

Esto se ve mucho mejor evidenciado en el caso de las arenas arcillosas que en el de las arenas limosas de acuerdo a los resultados que se obtuvieron, pues su decrecimiento se observó mucho más retardado, esto es debido a que las arenas limosas son suelos mucho más porosos que en las arenas arcillosas, por ende el aceite del hidrocarburo podrá ocupar mucho mejor los espacios de vacíos o poros.

Con base a lo anterior es fácil concluir que en concentraciones mayores al 50% podrán obtenerse resultados con un aumento de su permeabilidad, sin embargo los resultados para la manipulación de los suelos contaminados hasta niveles mayores al especificado, no tendrían mucha relevancia como bien se explicó con anterioridad, investigaciones previas a estas, revelan que ensayos realizados con suelos contaminados con hidrocarburos con concentraciones del 75% y 100% no fueron posibles. Va a verse reflejado en una permeabilidad decreciente.

6.3 CON RELACIÓN AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS CON RESPECTO A LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Una vez culminaron los ensayos de consolidación, se procedió a analizar los resultados a partir de un comparativo entre los parámetros obtenidos al final del ensayo con respecto a los parámetros que se calcularon al principio de la prueba. Entre estos se determinaron las humedades de las pastillas de suelo y se observó

que la humedad final para cada uno de los especímenes contaminadas con hidrocarburos con concentraciones del 20%, 30%, 40%, 50% de la porosidad, disminuyó con respecto a su humedad inicial. Para dar una mayor precisión al análisis de este suceso se debe comprender el concepto de compresibilidad de un suelo que experimenta al estar sometidos a distintos esfuerzos.

Si bien se conoce adecuadamente el procedimiento, se debe saber que para realizar este ensayo se requirió una muestra de suelo en condiciones de confinamiento lateral, sometida a una serie de esfuerzos; estos obviamente se produjeron por incrementos constantes de cargas que se aplicaron axialmente concentrados principalmente en el área del espécimen. Ahora para entrar con mayor detalle se debe destacar que durante cada incremento de carga, la consolidación del suelo experimento tres diferentes etapas.

Cada una de estas tres etapas sería la causante del reacomodo de las partículas, lo cual trae como consecuencia la disminución del espesor del espécimen de suelo. Sin embargo, si se analizan los especímenes vírgenes antes y después de la prueba, se observa que éstos no resultaron ser tan compresibles debido tal vez a que la composición de ambos no era netamente arcillosa o limosa sino arenosa; por ende, sus pesos volumétricos no disminuyeron, sino que por el contrario, aumentaron aunque no de forma significativa.

Lo anterior conduce a señalar que las muestras de suelo areno arcillas y areno limosas en estado virgen, tienden comprimirse durante las etapas en las que se da la aplicación de esfuerzos, pero, una vez se ha cumplido con los ciclos de carga y se procede a realizar los ciclos de descarga, los suelos tienden recuperarse progresivamente aunque no en su totalidad, pues durante el proceso, en la muestra se genera el reintegro de agua a la microestructura del espécimen, ocupando la mayor parte de los espacios vacíos.

Esta conclusión permite entender el comportamiento de este tipo de suelos, aunque no se descartan que estas modificaciones puedan ser producidas en razón de otros factores.

Siguiendo la idea anterior ahora si es posible examinar más fondo el comportamiento de los suelos alterados por el hidrocarburo a medida que se aumenta el grado del contaminante con respecto a los especímenes vírgenes.

El concepto de compresibilidad *-aplicado tanto a las arenas arcillosas como a las arenas limosas contaminadas-*, se evidenció de forma clara a partir de la observación sistemática que se llevó a cabo durante la investigación. Según pudo observarse las muestras de suelo contaminadas con glicerina, con concentraciones del 20%, 30%, 40% y 50% disminuyeron su espesor a medida que se iba incrementando el esfuerzo; esto, debido principalmente a que el contaminante aplicado sobre el suelo lo lubricó, haciéndolo más susceptible a deformarse. Ahora dicha deformación, lógicamente era mayor en la medida que el grado del contaminante iba en aumento.

De lo anteriormente señalado puede concluirse que a mayor grado de concentración del contaminante aplicado en el suelo, más propenso será el mismo a deformarse con la aplicación de cargas, por la reorientación y deslizamiento de unas partículas sobre otras.

Sabido es que el coeficiente de consolidación es un parámetro que describe la velocidad en que un suelo tras aplicársele a una serie de esfuerzos se somete al fenómeno de consolidación.

Durante la investigación se analizó dicho parámetro y se compararon las velocidades en que el suelo se deformaba tanto en especímenes vírgenes como en contaminados y se pudo observar, que a medida que se incrementaban los esfuerzos tras la aplicación de cargas cada vez mayores la velocidad tendía a aumentar.

Del análisis comparativo del comportamiento de ambos suelos una vez culminada la ejecución de los ensayos en su totalidad, es decir en muestras contaminadas y no contaminadas, se concluyó:

Que la arena arcillosa con respecto a la arena limosa es más susceptible a generar mayores deformaciones por cada escalón de carga aplicada. Por lo tanto los especímenes de arena arcillosa serán aquellas cuya reducción del volumen será más notable al estar sometidas a esfuerzos cada vez aún mayores.

El contenido de arcilla existente en el suelo areno arcilloso, le otorga propiedades expansivas; por ende éste tiende a recuperarse mucho más que el suelo areno limoso presente en la arena arcillosa luego de iniciar los ciclos de descarga.

En las muestras de suelo estudiado no es posible inferir una línea de tendencia que tipifique el comportamiento del suelo areno arcilloso y areno limoso frente al coeficiente de consolidación, sin embargo se observó que la muestra clasificada como arena arcillosa presenta un coeficiente de consolidación menor, por lo tanto aparentemente es menos susceptible de sufrir deformaciones al consolidarse

7. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones en las que se pretenda analizar el comportamiento de la mecánica de un suelo que se encuentre contaminado con hidrocarburos, se recomienda seleccionar adecuadamente las concentraciones con las que se pretende realizar la mezcla, pues al ser estas, al estar muy cercanas, no darán un margen de referencia lo suficientemente extenso y apropiado para un análisis más profundas y detallados pues sus resultados fueron un tanto similares en muchas ocasiones tanto en los ensayos de consolidación unidimensional y permeabilidad mediante el métodos de cabeza variable.

Los resultados pueden llegar a ver drásticamente afectados por la presencia de burbujas de aire que queda atrapadas en la boquilla de entrada del agua del permeámetro una vez que este se ha bloqueado, para eliminar estos defectos se observó que el uso de una jeringa, mediante la cual se inyectara a agua a presión hasta eliminar los espacios de aire.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] López Peláez JD. Estudio y Control de la Erosión Hídrica [Internet]. Medellín, 2001. Disponible en http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregado/cap%201%20y%202%20libro%20erosion.pdf, consultado el 2 de septiembre de 2014
- [2] EFSUPS. El ABC del suelo [Internet]. España, 2007. Disponible en http://www.teaching-soil.eu/es/toolbox_abcsoil.php, consultado el 2 de septiembre de 2014
- [3] Crosaria A. Práctico 4: Estructura del Suelo [Internet]. Uruguay, s.f. Disponible en <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Practico%204.pdf>, consultado el 2 de septiembre de 2014
- [4] FAGRO. Procesos de formación del suelo [Internet]. Uruguay, 2014. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/~edafologia/curso/Curso%202014/Material/procesos.pdf>, consultado el 8 de septiembre de 2014
- [5] La Guía. El suelo [Internet]. S.f. Disponible en <http://geografia.laguia2000.com/biogeografia/el-suelo#ixzz37ah1KyTP>, consultado el 12 de septiembre de 2014
- [6] iArasol. Procesos formadores de suelo [Internet]. S.f. Disponible en <http://www.suelosdearagon.com/contenido.php?padre=7&IDContenido=7>
- [7] Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Agentes Ecológicos I – 3º ESO [Internet]. Disponible en http://recursostic.educacion.es/ciencias/biosfera/web/alumno/3ESO/Agentes_1/contenidos4.htm
- [8] Muelas Rodríguez A. Manual de Mecánica del suelo y cimentaciones [Internet]. España, S.f. Disponible en http://www.uned.es/dpto-icf/mecanica_del_suelo_y_cimentaciones/images/mecansueloycimentacionescap_1.pdf, consultado el 22 de septiembre de 2014

- [9] Astromia. La meteorización química [Internet]. S.f. Disponible en <http://www.astromia.com/tierraluna/meteoriza2.htm>, consultado el 12 de agosto de 2014
- [10] UNAD. Manejo y Conservación de Suelos: Factores y Procesos de Formación del suelo [Internet]. Bogotá, Colombia. S.f. Disponible en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/30160/leccin_2_factores_y_procesos_de_formacin_del_suelo.html, consultado el 2 de septiembre de 2014
- [11] Microrespuestas. ¿Cuáles son los nutrientes del suelo? [Internet]. S.f. Disponible en <http://microrespuestas.com/como-se-llaman-las-capas-del-suelo>, consultado el 29 de julio de 2014
- [12] alcuza. Horizontes del suelo [internet]. S.f. Disponible en http://www.revistaalcuza.com/REVISTA/articulos/GestionNoticias_376_ALCUZA.asp, consultado el 1 de agosto de 2014
- [13] Profesor en línea. Horizontes del suelo [Internet]. Chile, s.f. Disponible en <http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/SueloHorizonte.htm>
- [14] Ecured. Suelo [Internet]. S.f. Disponible en <http://www.ecured.cu/index.php/Suelo>, consultado el 20 de agosto de 2014
- [15] Universidad Católica del Norte. Mecánica de suelos [Internet]. Laboratorio, UNC, s.f. Disponible en <http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/tiposM2.htm>, consultado el 2 de septiembre de 2014
- [16] Bioygeo. Qué es el suelo [Internet]. S.f. Disponible en http://www.bioygeo.info/pdf/13_El_Suelo.pdf, consultado el 1 de septiembre de 2014
- [17] Izquierdo RP, Venegas Yuste S. La materia orgánica del suelo. Papel de los microorganismos [Internet]. Universidad de Granada, España, s.f. Disponible en <http://www.ugr.es/~cjl/MO%20en%20suelos.pdf>
- [18] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible [Internet]. Washington, s.f. Disponible en http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sf/soil_fertility.pdf, consultado el 2 de noviembre de 2014

- [19] Asociación Española de Toxicología (AETOX). Hidrocarburos clorados [Internet]. España, 2009. Disponible en <http://www.aetox.es/wp-content/uploads/2009/04/H.Clorados.pdf>, consultado el 15 de septiembre de 2014
- [20] Hidrocarburos clorados [Internet]. S.f. Disponible en <https://sites.google.com/site/medioambienteactivo/hidrocarburos-clorados>, consultado el 10 de agosto de 2014
- [21] Universidad de Extremadura. Programa de Edafología, Primer Curso de Ciencias Ambientales [Internet]. Facultad de Ciencias. España, s.f. Disponible en <http://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/CAEdProgTeor.html>, consultado el 2 de septiembre de 2014
- [22] Fundación Produce Veracruz A.C. Propiedades físicas del suelo [Internet]. México, s.f., p. 83. Disponible en <http://www.funprover.org/formatos/manual Tomate/Propiedades%20Fisica%20del%20Suelo.pdf>, consultado el 5 de agosto de 2014
- [23] Perú Ecológico. Propiedades físicas del suelo [Internet]. S.f. Disponible en http://www.peruecologico.com.pe/lib_c18_t03.htm, consultado el 5 de julio de 2014
- [24] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Propiedades físicas del suelo [Internet]. Disponible en <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>, consultado el 3 de octubre de 2014
- [25] Monte Ayarco. Importancia de un buen estudio de suelos [Internet]. 2011. Disponible en <http://www.monteayarco.com/blog/importancia-de-un-buen-estudio-de-suelos>, consultado el 21 de octubre de 2014
- [26] Apuntes de Ingeniería Civil. Estudio del suelo en la construcción de edificios [Internet]. S.f. Disponible en <http://www.monteayarco.com/blog/importancia-de-un-buen-estudio-de-suelos>, consultado el 2 de noviembre de 2014
- [27] Malagón Castro D. Los suelos de Colombia [Internet]. 2005. Disponible en <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/05loss.pdf>, consultado el 6 de agosto de 2014

- [28] Tafur CA, Zúñiga EA, Velandia JC, Sánchez Rodríguez C, Merchán DL. Actividad investigativa interdisciplinaria de la facultad de ingeniería civil. <http://www.umng.edu.co/documents/63968/74805/art5_1.pdf>, disponible en la red. Consultado el 13 de agosto de 2014.
- [29] González Caballero M. El Terreno. Primera edición. Ediciones UPC. Septiembre, 2001.
- [30] Quesada Guerrero S. Determinación del coeficiente de permeabilidad [Internet]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, S.f. Disponible en http://www.tecdigital.itcr.ac.cr/file/3505687/informe_6_steven Consultado el 30 de agosto de 2014.
- [31] Juárez Badillo E, Rico Rodríguez A. Fundamento de mecánica de suelos. Editorial Limusa. Tomo I. del año 1947. Consultado el 18 de agosto de 2014.
- [32] FAO. Permeabilidad del suelo [Internet]. Washington, S.f. Disponible en ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm#top, Consultado el 06 de septiembre de 2014
- [33] Higuera P y Oyarzun P. Minería y suelo I. Caracteres generales de los suelos [Internet]. Curso de Minería y Medio Ambiente, Universidad de Castilla-La Mancha, España, s.f. Disponible en <http://www.uclm.es/users/higuera/mam/MMAM4.htm>, consultado el 1 de diciembre de 2014
- [34] Sánchez San Román FJ. Conceptos fundamentales de Hidrogeología [Internet]. Universidad de Salamanca, España. Septiembre de 2014, Disponible en http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf, consultado el 6 de noviembre de 2014
- [35] Angarita Coronel JN. Estudio Numérico de Asentamientos en un suelo estratificado, Capítulo 1: Compresibilidad de los suelos [Internet]. Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Bucaramanga, 2012. Disponible en <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/10762/Capitulo1.pdf>, Consultado el 26 de octubre de 2014.

- [36] FAO. Textura del suelo [Internet]. Washington, S.f. Disponible en ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s10.htm, Consultado el 25 de octubre de 2014
- [37] Ingeniero Civil. Consistencia, Límites de Atterberg: Limite Líquido, Plástico, de Retracción [Internet]. 2011. Disponible en <http://uningenierocivil.blogspot.com/2011/03/consistencia-limites-de-atterberg.html>, consultado el 12 de diciembre de 2014
- [38] Wikivia. Límites de Atterberg [Internet]. S.f. Disponible en http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/L%C3%ADmites_de_Atterberg, consultado el 12 de julio de 2014
- [39] Geotecnia. Consistencia del Suelo - Límites de Atterberg – Índices [Internet]. 2010. Disponible en http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_2498.html, consultado el 1 de noviembre de 2014
- [40] Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Manual de Laboratorio Geotecnia [Internet]. Escuela de Ingeniería en Construcción, Chile. s.f. Disponible en http://icc.ucv.cl:8080/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/limites.pdf, consultado el 3 de octubre de 2014
- [41] Universidad de Granada. Suelos contaminados por hidrocarburos [Internet]. S.f. Disponible en http://www.pomif.com/pages/practicas/micro_ambiental/suelos_hidrocarburos, consultado el 28 de agosto de 2014
- [42] Riojas H, Torres L, Mondaca I, Balderas JJ, Gortáres P. Efectos de los surfactantes en la biorremediación de los suelos contaminados con hidrocarburos. En: Revista Química Viva, No. 3(9), Universidad de Buenos Aires, Argentina. Diciembre de 2010. Disponible en <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/v9n3/riojas.pdf>, consultado el 2 de diciembre de 2014
- [43] Benavidez J, Quintero G, Guevara A, Jaimes DC, Gutiérrez S, Miranda J. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo [Internet]. Tesis. En: NOVA publ. cient;4(5):82-90, jun. 2006.

- [44] Hernández R. ¿Qué es la Glicerina? [Internet]. S.f. Disponible en <http://manualidades.innatia.com/c-jabon-de-glicerina/a-glicerina-jabon-artesanal.html>, consultado el 7 de octubre de 2014
- [45] Botanical-Online. Glicerina [Internet]. 2014. Disponible en <http://www.botanical-online.com/glicerina.htm>, consultado el 17 de octubre de 2014
- [46] Revermann S. Usos de la glicerina [Internet]. Traducido por Builes F., s.f. disponible en http://www.ehowenespanol.com/usos-glicerina-info_180219/, consultado el 20 de octubre de 2014
- [47] Ecured. Glicerol [Internet]. S.f. Disponible en <http://www.ecured.cu/index.php/Glicerol>, consultado el 5 de octubre de 2014
- [48] Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Noticias [Internet], 2013. Disponible en <http://www.unicolmayor.edu.co>, consultado el 20 de noviembre de 2014
- [49] Montañéz JC, Chaparro JC. Ensayo de permeabilidad cabeza variable INV E-130 [Internet]. Universidad Militar Nueva Granada, Laboratorio de Mecánica de Suelos. Bogotá, 2012. Disponible en http://www.academia.edu/4727189/Permeabilidad_cabeza_variable, consultado el 16 de noviembre de 2014
- [50] Vargas Castillo C, Vélez L. Informe de Práctica de Laboratorio sobre Permeabilidad cabeza constante y variable [Internet]. Universidad La Gran Colombia, Facultad de Ingeniería civil. Bogotá, 2012. Disponible en <http://www.buenastareas.com/ensayos/Permeabilidad-Cabeza-Constante-y-Variable/3410217.html>, consultado el 2 de diciembre de 2014