

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

**DETERMINACIÓN DE LA MATRIZ DE SUCCIÓN DE SUELOS FINOS
PARCIALMENTE SATURADOS EN CONDICIÓN REMOLDEADA Y SU
CORRELACIÓN CON EL POTENCIAL DE COLAPSO.**

DUQUE CENTENO JÉSSICA STEFANÍA

MARTÍN CRUZ LIZMARY

Trabajo previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil

QUITO, 2019

DEDICATORIA

A nuestros padres Johanna, Nestor, Marianela y Onel

A mi hermana Paola Duque

AGRADECIMENTOS

A nuestros padres por su apoyo y cariño.

A mi familia por estar alentándome constantemente.

A Jorge Albuja por su tiempo, dedicación y sobre todo su confianza en nosotras.

A Guillermo Realpe y Juan Carlos Montero por su aporte.

*A los amigos que están y a los que la distancia no les permitió estar durante este
proceso.*

A Issam Saif por toda su ayuda.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCTORIO	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivo General	3
1.3. Objetivos específicos	3
1.4. Alcance	4
1.5. Metodología	5
CAPÍTULO 2: APLICACIONES Y ESTADO DEL ARTE DE LOS SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS	8
2.1. Aplicaciones en Ingeniería Civil y Geotécnica	8
2.2. Estado del arte: investigaciones y teorías actuales en suelos parcialmente saturados	10
CAPÍTULO 3: NATURALEZA, PROPIEDADES Y VARIABLES DE UN SUELO FINO PARCIALMENTE SATURADO	15
3.1. Análisis de mineralogía	15
3.2. Clasificación de los suelos	16
3.2.1. Determinación de la humedad	22
3.2.2. Granulometría	23
3.2.3. Granulometría por hidrómetro	25
3.2.4. Límite líquido	28
3.2.5. Límite plástico	30
3.2.6. Índice de plasticidad	32
3.3. Determinación de la Humedad Óptima mediante el ensayo Proctor	32
CAPÍTULO 4: SUCCIÓN MATRICIAL	38
4.1. Definición de la succión del suelo	38
4.2. Técnicas de medida	42
4.3. Medida de la succión del suelo en laboratorio	46
4.3.1. Implementación del ensayo	46
4.3.2. Succión real del suelo	50
CAPÍTULO 5: DEFORMACIÓN POR HUMECTACIÓN	65
5.1. Definición de colapso	65
5.2. Determinación del índice de colapso	66
CAPÍTULO 6: CORRELACIONES	79
6.1. Correlación entre la humedad y succión matricial	79
6.2. Deformación y humedad	79

6.3. Deformación y succión matricial	80
CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN	81
8.1. Conclusiones	93
8.2. Recomendaciones	95
BIBLIOGRAFÍA	97
ANEXOS	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa Ubicación Extracción del Suelo	5
Figura 2: Flujograma para la clasificación de suelos de grano fino (50% o más pasa el tamiz No.200)	17
Figura 3: Flujograma para la clasificación de suelos orgánicos de grano fino (50% o más pasa el tamiz No.200)	18
Figura 4: Flujograma para la clasificación de suelos de grano grueso (más del 50% se retiene en el tamiz No.200).....	18
Figura 5: Carta de plasticidad	19
Figura 6: Curva granulométrica acumulada.....	20
Figura 7: Carta de Plasticidad Clasificación SUCS	21
Figura 8: Curva Granulométrica Clasificación SUCS	25
Figura 9: Curva Granulométrica por Hidrometría.	28
Figura 10: Tiempo de reposo requerido.....	34
Figura 11: Secuencia de compactación.....	35
Figura 12: Curva de Compactación Ensayo Proctor.....	36
Figura 13: Radio de curvatura del menisco para diferentes espacios entre partículas.....	40
Figura 14: Tubos capilares que muestran la interfaz aire-agua.....	40
Figura 15: Desecador	44
Figura 16: Tallado de la muestra.....	51
Figura 17: Muestra parcialmente tallada y colocada posteriormente en el desecador	51
Figura 18: Cálculo de la humedad en papeles filtros	52
Figura 19: Muestra en el anillo para colapso	67
Figura 20: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 9% humedad.....	69
Figura 21: Esfuerzo Vs Deformación 9%	69
Figura 22: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 11% humedad.....	70
Figura 23: Esfuerzo Vs Deformación 11%	70
Figura 24: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 13% humedad.....	71
Figura 25: Esfuerzo Vs Deformación 13%	71
Figura 26: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 15.03% humedad.....	72
Figura 27: Esfuerzo Vs Deformación 15.03%	72
Figura 28: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 17% humedad.....	73
Figura 29: Esfuerzo Vs Deformación 17%	73
Figura 30: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 19% humedad.....	74
Figura 31: Esfuerzo Vs Deformación 19%	74
Figura 32: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 21% humedad.....	75
Figura 33: Esfuerzo Vs Deformación 21%	75
Figura 34: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 0% humedad.....	76
Figura 35: Esfuerzo Vs Deformación 0%	77
Figura 36: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 4% humedad.....	78
Figura 37: Esfuerzo Vs Deformación 4%	78
Figura 38: Curva SWCC para diferentes autores.....	79
Figura 39: Relación entre la Deformación y la Humedad.....	79
Figura 40: Relación entre la deformación y la Succión en kPa	80

Figura 41: Comprobación Implementación según Bicalho et al. (2006)	82
Figura 42: Valores de succión para 9% de humedad en Bicalho et al. (2006).....	83
Figura 43: Valores de succión para 11% de humedad en Bicalho et al. (2006).....	84
Figura 44: Valores de succión para 13% de humedad en Bicalho et al. (2006).....	85
Figura 45: Valores de succión para 15.03% de humedad en Bicalho et al. (2006).....	86
Figura 46: Valores de succión para 17% de humedad en Bicalho et al. (2006).....	87
Figura 47: Valores de succión para 19% de humedad en Bicalho et al. (2006).....	88
Figura 48: Valores de succión para 21% de humedad en Bicalho et al. (2006).....	89
Figura 49: Valores típicos de valores de porosidad, vacíos y densidad seca	90
Figura 50: Valores de succión comparados con diferentes autores	91
Figura 51: Valores de succión comparados con diferentes tipos de suelo	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados principales mineralogía	16
Tabla 2: Clasificación del suelo	21
Tabla 3: Contenido de humedad	23
Tabla 4: Granulometría	24
Tabla 5: Datos Hidrometría	26
Tabla 6: Humedad Higroscópica.....	26
Tabla 7: Tamizado	27
Tabla 8: Lectura de datos.....	27
Tabla 9: Resultados hidrometría.....	27
Tabla 10: Límite Líquido	30
Tabla 11: Límite Plástico	32
Tabla 12: Datos para el ensayo Proctor	36
Tabla 13: Resultados de Densidad máxima seca y Humedad óptima.....	36
Tabla 14: Datos tomados para la Implementación del Ensayo del Papel Filtro.....	48
Tabla 15: Cálculos contenido de agua Implementación Ensayo Papel Filtro	48
Tabla 16: Cálculo Succión Calibración Ensayo Papel Filtro	49
Tabla 17: Resumen Resultados Implementación.....	49
Tabla 18: Datos tomados muestra 9% humedad Ensayo del Papel Filtro.....	53
Tabla 19: Cálculo contenido agua muestra 9% humedad Ensayo Papel Filtro.....	53
Tabla 20: Cálculo de Succión muestra 9% humedad Ensayo Papel Filtro	54
Tabla 21: Datos obtenidos muestra 11% Ensayo Papel Filtro	54
Tabla 22: Cálculo contenido de agua muestra 11% humedad Ensayo Papel Filtro.....	55
Tabla 23: Cálculo Succión muestra 11% humedad Ensayo Papel Filtro	55
Tabla 24: Datos tomados muestra 13% humedad Ensayo Papel Filtro.....	56
Tabla 25: Cálculo contenido de agua muestra 13% humedad Ensayo Papel Filtro	56
Tabla 26: Cálculo Succión muestra 13% humedad Ensayo Papel Filtro	57
Tabla 27: Datos tomados muestra 15.03% humedad Ensayo Papel Filtro.....	57
Tabla 28: Cálculo contenido de agua muestra 15.03% humedad Ensayo Papel Filtro.	58
Tabla 29: Cálculo Succión muestra 15.03% humedad Ensayo Papel Filtro	58
Tabla 30: Datos tomados muestra 17% humedad Ensayo Papel Filtro.....	59
Tabla 31: Cálculos Contenido de Agua muestra 17% humedad Ensayo Papel Filtro	59
Tabla 32: Succión calculada muestra 17% humedad Ensayo Papel Filtro	60
Tabla 33: Datos tomados muestra 17% humedad Ensayo Papel Filtro.....	60
Tabla 34: Cálculos contenido de agua muestra 19% humedad Ensayo Papel Filtro	61
Tabla 35: Succión calculado muestra 19% humedad Ensayo Papel Filtro	61
Tabla 36: Datos tomados muestra 21% humedad Ensayo Papel Filtro.....	62
Tabla 37: Cálculos contenido de agua muestra 21% humedad Ensayo Papel Filtro	62
Tabla 38: Succión calculada muestra 21% humedad Ensayo Papel Filtro	63
Tabla 39: Resumen de Resultados Succión	64
Tabla 40: Resultados del colapso para 9% de humedad	69
Tabla 41: Resultados del colapso para 11% de humedad	70
Tabla 42: Resultados del colapso para 13% de humedad	71
Tabla 43: Resultados del colapso para 15.03% de humedad	72

Tabla 44: Resultados del colapso para 17% de humedad	73
Tabla 45: Resultados del colapso para 19% de humedad	74
Tabla 46: Resultados del colapso para 21% de humedad	75
Tabla 47: Resultados del colapso para 0% de humedad	76
Tabla 48: Resultados del colapso para 4% de humedad	77

CAPÍTULO 1: INTRODUCTORIO

1.1. Introducción

La mecánica de suelos clásica clasifica a los suelos en estado seco y en estado saturado. Un suelo seco es aquel donde no existe la presencia de agua y sus espacios vacíos están ocupados por aire. Mientras que uno saturado, está bajo el nivel freático y sus espacios vacíos están ocupados por agua (Lambe y Whitman, 1972).

Los suelos generalmente no se encuentran en un estado totalmente saturado ni totalmente seco y es aquí donde radica la importancia de una caracterización de aquellos que están en estado parcialmente saturado, en los que los espacios vacíos están ocupados por agua y aire.

Los primeros estudios de la mecánica de suelos ya considerando los suelos parcialmente saturados, fueron realizados alrededor de los años 70 donde se determinó que estos son una extensión de la mecánica de suelos saturados (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012).

Se comenzó a formular conceptos e implementaron teorías fundamentales, sin embargo, estos están mínimamente aplicados en la práctica profesional y no han sido históricamente incluidos en los programas estudiantiles o cátedras universitarias de la carrera de ingeniería civil ni carreras afines. Se considera que su inclusión es muy importante ya que si se tienen bases teóricas definidas el siguiente paso es llevarlas a la práctica (Elena & Ochoa, 2012).

Uno de los autores principales quien dedicó y aportó significativamente a los estudios sobre estos suelos fue Delwyn Fredlund quien ya realizaba estudios

desde los años 50 aproximadamente. A finales de esta época, ensayos experimentales señalaron la posibilidad de medir o controlar la presión de poros a través del uso de discos cerámicos de entrada de aire (Fredlund et al., 2012), sin embargo, fueron necesarias algunas décadas más de estudios hasta que se pudiera llegar a comprender las diferencias entre suelos saturados y parcialmente saturados.

Por otro lado, al realizar investigaciones se observa que en libros antiguos de los años 70 como es el de George B. Sowers y George F. Sowers se indica que estas teorías no deben considerarse. Mencionan que no es necesario usar la resistencia de las arcillas que se encuentren en un estado parcialmente saturado cuando se tenga un problema práctico y especifican que puede tenerse en cuenta si el suelo se encuentra en estas condiciones permanentemente (Sowers & Sowers, 1972). Es decir, todos los diseños ingenieriles están basados en la mecánica de suelos clásica.

En el material de estudio, la cohesión le otorga un cierto nivel de estabilidad en un estado no saturado, pero cuando este se inunda los aglutinantes pierden su resistencia y experimentan un colapso estructural (Das, 2012). Siendo este un problema que puede comprometer o afectar la estabilidad de una estructura.

Es por lo que en la actualidad este es un tema muy novedoso y en auge, y ya se han realizado varios estudios principalmente en institutos como el Imperial College de Inglaterra y el MIT de Estados Unidos.

Sin embargo, a pesar del avance de las investigaciones, en la práctica ingenieril estos no son tomados en cuenta por completo. El primer paso para que todos los

conceptos e investigaciones al respecto sean aplicados, radica en su implementación en las cátedras universitarias. Sólo de esta manera se podrá llegar a sistematizar, organizar, el conocimiento con el propósito de mejorar el tratamiento de los suelos parcialmente saturados. Al buscar en varias bases de datos como son: Scopus, Web of Science, Engineering Village, Researchgate, Google académico, la biblioteca de la PUCE, entre otras, se pudo evidenciar que dentro del país no existen suficientes investigaciones o publicaciones sobre el tema anteriormente mencionado por lo que mediante esta disertación se busca una mayor inclusión de estas en el Ecuador a través de estudios de laboratorio que permitan determinar su comportamiento real.

Mediante estos ensayos, se encontrarán características de los suelos como son su granulometría, plasticidad, se determinará la succión matricial, un rango de humedades y el probable índice de colapso o deformaciones propias para el suelo fino en estudio, con los que se puedan realizar modelos futuros con correlaciones que ayudarán a resolver los problemas de estabilidad.

1.2. Objetivo General

Determinar la matriz de succión de un suelo fino parcialmente saturado y su correlación con el potencial de colapso.

1.3. Objetivos específicos

- Describir breve los fundamentos básicos de la mecánica de suelos parcialmente saturada y revisar el estado del arte
- Verificar sobre la base de la composición mineralógica del suelo a estudiarse, el comportamiento potencial colapsable

- Clasificar y caracterizar el material, según SUCS para identificar su granulometría y plasticidad.
- Determinar la succión matricial mediante el método de papel filtro.
- Determinar el rango de humedades mediante el ensayo Proctor para correlacionarla con la succión matricial.
- Determinar de la magnitud del colapso o expansión unidimensional por inundación para su correlación con la succión matricial.

1.4. Alcance

Inicialmente se analizarán estudios exploratorios ya que el tema en análisis no ha sido suficientemente abordado en Ecuador y, como se especificó anteriormente, pocos países han incursionado en el tema, siendo los principales Inglaterra y Estados Unidos a nivel mundial y Colombia y Brasil cuentan con varios estudios a nivel de Latinoamérica.

Posteriormente, después de investigar la teoría referente a los suelos parcialmente saturados, mediante ensayos de laboratorio SUCS, Proctor y ensayo del papel filtro se van a especificar las propiedades características del suelo en análisis como son la densidad máxima, succión matricial e índice de colapso. Para poder obtener resultados que se acerquen más a la realidad y poder reducir el error obtenido, el tamaño de la muestra será de 7, el cual está basado en el artículo científico *Filter paper method of soil suction measurement* de Bicalho, Correia, Ferreira, Fleureau, & Marinho (2006).

Finalmente se correlacionarán variables para poder tener un mejor entendimiento del comportamiento del suelo en estudio, por ejemplo, se correlacionará la

succión matricial con la humedad del suelo y su potencial de colapso bajo saturación.

1.5. Metodología

El suelo a ser utilizado en esta investigación va a ser extraído de la parroquia de Calacalí, en el Distrito Metropolitanono de Quito. La ubicación exacta de la extracción está en la vía Manuel Cordova Galarza y calle A, en la siguiente figura se muestra un pequeño mapa.

Figura 1: Mapa Ubicación Extracción del Suelo



Fuente: Elaboración Propia

Se realizará el muestreo según la norma D5633. Se obtendrán 6 sacos con el suelo del lugar para realizar los ensayos requeridos. Se utiliza sacos con fundas plásticas dentro, para evitar perder finos.

Lo primero que se realizará es una clasificación SUCS con el material, mediante este ensayo se va a obtener datos de granulometría, límites plástico y líquido, contenido de humedad y principalmente se determinará el tipo de suelo con el que está trabajando.

Se llevará a cabo un ensayo proctor, con el cual se obtendrán una densidad máxima y una humedad óptima, este valor servirá únicamente como punto de referencia para la determinación del rango de humedades requerido, tomando 3 valores superiores y 3 inferiores variando en un 2% cada vez.

Como fue explicado en el alcance, se determinó que se puede obtener una curva representativa con 7 puntos por lo que se va a realizar 7 muestras moldeadas en una probeta de 6" con un procedimiento de proctor estándar por cada humedad dada manteniendo como constante la energía utilizada.

Para realizar la medición de la succión, se hará la repetición del procedimiento normado para verificar la repetitividad de los resultados comprobando que se esté haciendo bien el ensayo ya que este no ha sido implementado en el laboratorio de la PUCE.

Una vez obtenidos los resultados anteriores, se procederá a realizar el ensayo en las muestras de suelo remoldeadas. Se realizarán 3 ensayos para cada humedad dada para lo cual con cada muestra se tallarán 6 especímenes de suelo de un diámetro no

menor a 5,5 cm para que el papel esté siempre en contacto. En total se realizarán 21 ensayos para la medición de la succión matricial.

Con el sobrante de las muestras remoldeadas, se tallará una pastilla de suelo para la realización del ensayo de colapso. En total se llevarán a cabo 7 ensayos, uno para cada humedad dada bajo un solo esfuerzo de 800 kPa.

Por último, con los resultados obtenidos se encontrarán correlaciones y tendencias válidas para el suelo en estudio bajo sus condiciones específicas.

CAPÍTULO 2: APLICACIONES Y ESTADO DEL ARTE DE LOS SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

2.1. Aplicaciones en Ingeniería Civil y Geotécnica

La mecánica de suelos clásica se ha basado esencialmente en el estudio de suelos que tienen su origen en ambientes sedimentarios siendo estos los granulares y cohesivos. Para ellos se consideran dos estados, seco y saturado. En la realidad los estados son situaciones extremas donde además se toma al suelo como un sistema de dos fases (Lambe & Whitman, 1972).

Un suelo en estado seco es aquel donde no existe la presencia de agua, bajo esta condición se presentan dos fases, la sólida y la gaseosa es decir sus espacios vacíos están ocupados por aire. Mientras que un suelo en estado saturado es aquel que está bajo el nivel freático, el cual tiene una fase líquida y una sólida y sus espacios vacíos están ocupados por agua (Lambe y Whitman, 1972).

Un estado de saturación parcial puede depender de diferentes variables ambientales como son el clima, las tasas de evaporación, el régimen de lluvias, la topografía, la transpiración, entre otras. Por lo que, las condiciones y comportamientos de estos varían de forma significativa con relación a aquellos que se encuentran en un estado seco o saturado. Los suelos que tienen esta condición de saturación parcial pueden llegar a tener más de tres fases, pero sobre los estudios realizados se puede considerar que están conformados principalmente por estas tres, una fase sólida, una líquida y una gaseosa, eso significa que sus espacios vacíos están ocupados por agua y aire a la vez (Fredlund et al., 2012).

Como fue mencionado anteriormente, los suelos parcialmente saturados son considerados una extensión de los saturados. Esto sucede cuando aparece la posibilidad de medir o controlar la presión de poros del agua y la presión de poros del aire en los vacíos del suelo (Fredlund et al., 2012).

Uno de los factores determinantes para la condición de saturación, es el clima. El contenido de agua que tiene el suelo es removido mediante la evaporación en la superficie de este o mediante la evapotranspiración de la capa vegetal. Estas dos condiciones producen un flujo ascendente en el vapor de agua que se genera. Por el otro lado la lluvia es la responsable de provocar un flujo descendente en el suelo. De esta forma la diferencia en los sentidos de los flujos liberados va a ser fundamental para la presión de poros (Fredlund et al., 2012).

Los suelos que se encuentran en un estado parcialmente saturado no pueden ser clasificados ni comparten el comportamiento mecánico clásico de los suelos saturados (Fredlund et al., 2012). Estos cuentan con más de dos fases y la presión de poros que genera el agua es negativa si se la relaciona con la presión que genera el aire. Una característica importante de estos suelos es la interfaz agua-aire, que puede ser considerada como su cuarta fase (Lambe & Whitman, 1972).

Cuando existe aire en un suelo parcialmente saturado este puede estar en forma de burbujas, de esta manera se lo considera como saturado pues evita que exista aire en la superficie de contacto; o se formen canales de aire. En este último caso debe considerarse el aire para determinar las fuerzas, a través de la presión intersticial equivalente (Fredlund et al., 2012).

La succión matricial puede ser utilizada para identificar alteraciones en las muestras durante su transportación; estimar el promedio de los esfuerzos efectivos in situ una vez que las alteraciones hayan sido cuantificadas; aplicar controles más rigurosos en la compactación de rellenos sobre suelos expansivos; así como evaluar la estabilidad en pendientes naturales y artificiales. Estudios recientes han demostrado que la succión en los suelos puede ser incorporada en el análisis de la estabilidad de taludes (A. M. Ridley, Dineen, Burland, & Vaughan, 2003)

Al ser el suelo un material fundamental para el diseño estructural es muy importante que se consideren sus propiedades y comportamiento real, los cuales van a diferir de los conceptos y las teorías impartidas en la mecánica de suelos clásica. Con el paso de los años se ha tomado conciencia de la relevancia que tiene este tema a nivel mundial por lo que se han realizado varias investigaciones y se han publicado artículos científicos. En la actualidad se han logrado avances significativos en otros países donde se muestran resultados veraces sobre la deformación, la resistencia y el flujo de agua que tienen estos suelos.

2.2. Estado del arte: investigaciones y teorías actuales en suelos parcialmente saturados

Al ser este un tema tan importante como novedoso, con el paso de los años se han realizado varias investigaciones alrededor del mundo sobre los suelos parcialmente saturados. Varios autores, los cuales se citan y referencian en esta tesis, han publicado valiosos artículos que contribuyen a tener un mejor entendimiento y a ahondar en el tema.

En el 2008 Alfaro Soto publicó su investigación llamada *Geotecnia en Suelos no Saturados* en la Revista Académica Colombiana de Ciencias de la Tierra, la cual es un resumen que muestra los aspectos más importantes de los suelos no saturados para así incentivar su inclusión en la Geotecnia. Entre los temas más importantes a los cuales se refiere están las características de los suelos, su succión, propiedades mecánicas como su resistencia al corte y la variación de volumen y propiedades hidráulicas como la permeabilidad.

En el 2012 varios autores PhD entre ellos Rainwater, Mcdowell, y Drumm publicaron un artículo llamado *Measurement of Total Soil Suction Using Filter Paper: Investigation of Common Filter Papers, Alternative Media, and Corresponding Confidence* en el diario Geotechnical Testing Journal, la cual es una investigación mucho más profunda sobre la succión en suelos parcialmente saturados, específicamente en las maneras de medir la misma mediante la utilización del papel filtro, determinando cuales son los más recomendados y la confiabilidad de los resultados con cada uno.

De igual manera en el año 2012, Meza Ochoa publicó su investigación llamada *Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria* en el boletín colombiano Ciencias de la Tierra, se habla de los conceptos introductorios necesarios para el entendimiento de la teoría de los suelos parcialmente saturados. Muestra las variables de estado de los esfuerzos y la resistencia al corte, así como menciona los métodos para medir su succión. Su enfoque principal es el hacer énfasis en incluir estas teorías en las cátedras universitarias y pasarlas a la práctica.

En el 2013, Landris T. publicó un artículo denominado *Expansive Clay Suction Measurements Using Filter Paper and Polymer-Capacitance Sensor Methods* en el periódico *Journal of Testing and Evaluation*. En esta investigación se realizaron ensayos de laboratorio en los cuales se obtuvo valores para la succión del suelo mediante el método del papel filtro y con sensores miniatura de polímero. Se consiguió una curva característica contenido de humedad vs succión y se correlacionaron las variables de expansión o contracción con la succión para afirmar la aplicabilidad de los dos métodos y estimar la variación de volumen del suelo.

En el 2017, varios autores entre los cuales están Alejandro García-Elías, Armando Aguilar Melendez, Alejandro Córdova-Ceballos, José L. Sánchez-Amador, etc, publicaron su investigación *Estimación de la succión total en arcilla expansiva* en la Revista Iberoamericana de Ciencias. En esta se muestran los resultados de estudios de laboratorio realizados en un suelo de la ciudad de Veracruz, México, y se determinó que la succión afecta a la rigidez y a las deformaciones del suelo, se tomó una muestra específica del suelo y se explicó el procedimiento seguido para encontrar la succión.

De igual manera en el 2017, Greg A. Siemens, publicó un artículo llamado *Unsaturated Soil Mechanics: Bridging the Gap Between Research and Practice* en la versión N°39 del *Canadian Geotechnical Colloquium*. Este hace un énfasis especial en las aplicaciones de la ingeniería en las que deberían considerarse los conceptos y teorías de los suelos parcialmente saturados. Las características más importantes mencionadas son: la presión de poros de agua que es negativa en

estos suelos y además la variación de las propiedades del material como es su contenido de humedad. En el coloquio principalmente se busca explicar e ilustrar los fenómenos de estos suelos para que se vayan aplicando en la práctica ingenieril, tomando en cuenta factores como el cambio climático en un diseño. Se asegura que la utilización de estos principios de suelos parcialmente saturados irá aumentando.

Una investigación muy actual realizada en el 2018 es la de *A Simplified Direct Shear Testing Procedure to Evaluate Unsaturated Shear Strength* de Chien-Ting Tang, Roy H. Borden, y Mohammed A. Gabr publicado en el diario *Geotechnical Testing Journal*. Esta presenta mediante la utilización de ensayos triaxiales no saturados un procedimiento simplificado y conveniente que permite evaluar la resistencia al corte no saturado utilizando la prueba de corte directo convencional con succiones medidas por tensiómetro. Se realizaron ensayos de laboratorio en suelos tipo MH y ML de Carolina del Norte. Se muestran los resultados, encuentran correlaciones y demostró la aplicabilidad de los procedimientos descritos.

De esta manera con la ayuda de los artículos mencionados anteriormente se han podido destacar varias teorías que ayudaran al entendimiento y explicación de los temas a tratarse a continuación.

Cuando se trata con suelos parcialmente saturados, es muy importante hacer énfasis en los efectos adversos que se pueden generar en estructuras de tierra. Se producen cambios en el contenido de agua que tiene el suelo y se dan fenómenos como la expansión y contracción, los cuales pueden afectar la estabilidad de los

terraplenes y además poner en riesgo la seguridad de las personas (Ricardo & Arango, 2017).

Para poder estudiar estos suelos, es de gran relevancia saber su origen geológico y su composición mineralógica ya que la relación de vacíos y la granulometría son propiedades importantes que pueden ser heredadas (Ricardo & Arango, 2017).

La cuarta fase propuesta por Fredlund y Morgenstern en 1977 se conoce como la interfase aire-agua o también se la puede encontrar como membrana contráctil ya que el espesor de dicha membrana tiene de referencia unas pocas moléculas (Ricardo & Arango, 2017).

La presión capilar es la diferencia de presión que se produce cuando se separan el gas y el agua que están en un suelo. Esta presión está relacionada con la tensión superficial, el grado de saturación y el tamaño de los espacios del suelo, de esta manera cuando existen espacios pequeños, la presión capilar es mayor y viceversa (Ricardo & Arango, 2017).

Es muy importante tomar en cuenta dos variables que pueden llegar a afectar el comportamiento del suelo, estos son el colapso y la succión, por su lado se puede definir al colapso como una deformación volumétrica negativa, se produce una disminución del índice de poros cuando existe un aumento en la humedad. Por el otro lado, la succión que es la diferencia entre la presión de poros de aire y la presión de poros de agua, es importante ya que si esta tiene un valor considerable de igual manera sus deformaciones serán significativas (García-Elías et al., 2017).

CAPÍTULO 3: NATURALEZA, PROPIEDADES Y VARIABLES DE UN SUELO FINO PARCIALMENTE SATURADO

3.1. Análisis de mineralogía

Un análisis mineralógico es aquel que ayuda a determinar cuáles son los minerales resultantes que tiene el suelo después de un proceso de meteorización, se puede conocer además los porcentajes y tipos de arcillas existentes en el mismo. Esto se puede realizar mediante ensayos Termogravimétricos, Escaneado con Electro Microscopio, Microscopio Óptico y Difracción de Rayos X (Suarez Diaz, 1998).

Para un mejor entendimiento, la meteorización es considerada una parte muy importante en el sistema de la Tierra, este proceso es fundamental en las rocas, pero al requerir mucho tiempo y no ser tan evidente puede llegar a pasar desapercibo. Cuando una roca se desintegra o se altera químicamente se produce la meteorización. La meteorización mecánica se entiende por la ruptura de la roca en partes más pequeñas pero sin modificar su composición mineral y la química es una transformación química de la roca para la formación de uno o más compuestos nuevos (J.Tarbuck & Lutgens, 2005).

Mediante la meteorización de rocas y de cenizas volcánicas, a medida que pasa el tiempo, en el inicio se puede llegar a formar Montmorillonitas, Halloysitas, óxidos de hierro y aluminio, y en su etapa final pueden existir formaciones de Caolinitas, Esmeclitas y Gibsitas (Suarez Diaz, 1998).

De esta manera, se considera muy importante la determinación de los minerales y porcentajes de arcillas presentes en el suelo de estudio ya que así se puede

entender mejor su comportamiento. El ensayo que fue realizado es el espectro de difracción de Rayos X que según Fresneda, Navarro, & Valencia (2013) en su artículo de investigación científica *Caracterización Geotécnica de un Suelo Tropical Laterítico* es el método más utilizado, el cual por medio de un difractograma, permite identificar los minerales por los que está compuesto el suelo.

El ensayo se realizó en el laboratorio de Metalurgia Extractiva Demex de la EPN, Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 1: Resultados principales mineralogía

Nombre del Mineral	% Contenido en la Muestra
Caolinita	45
Grupo Plagioclasas	26
Cuarzo	10

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que el mineral predominante es la caolinita por lo que según la literatura de Suarez Díaz el suelo debería presentar un comportamiento normal ante los ensayos cuando este tiene de baja a media plasticidad, lo que concuerda con el suelo en cuestión, además también se menciona que el aumento de la humedad en suelos de esta naturaleza no tendrá un efecto significativo.

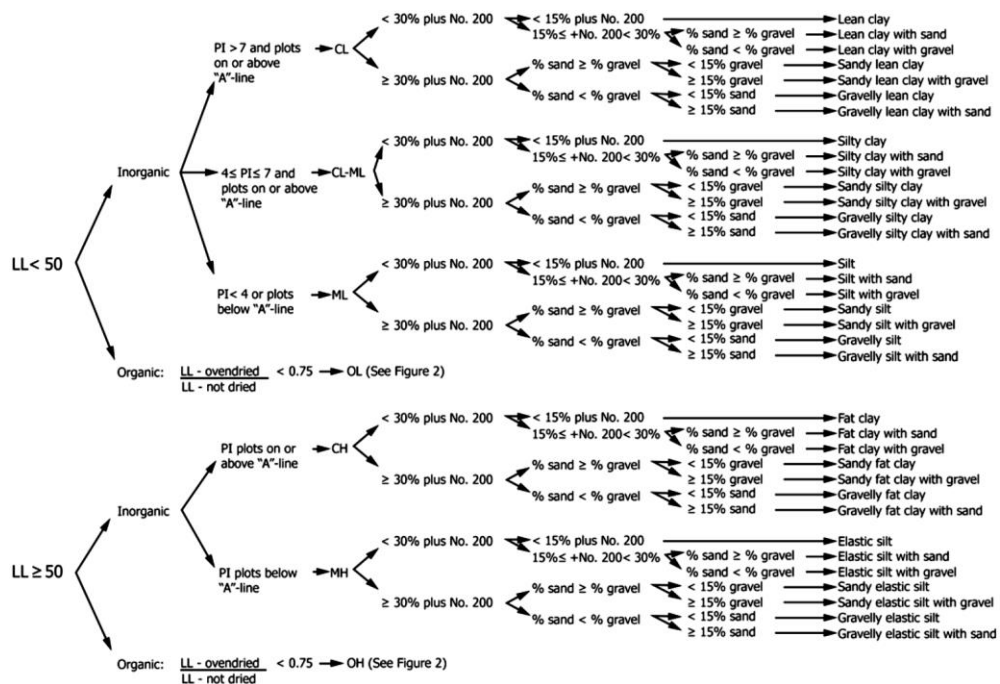
3.2. Clasificación de los suelos

Para la clasificación del suelo se utiliza la norma ASTM: D 2487-17: Clasificación de suelos para propósitos ingenieriles (Sistema Unificado De

Clasificación De Suelos: SUCS) basada en la determinación de las características del tamaño de las partículas, límite líquido e índice de plasticidad.

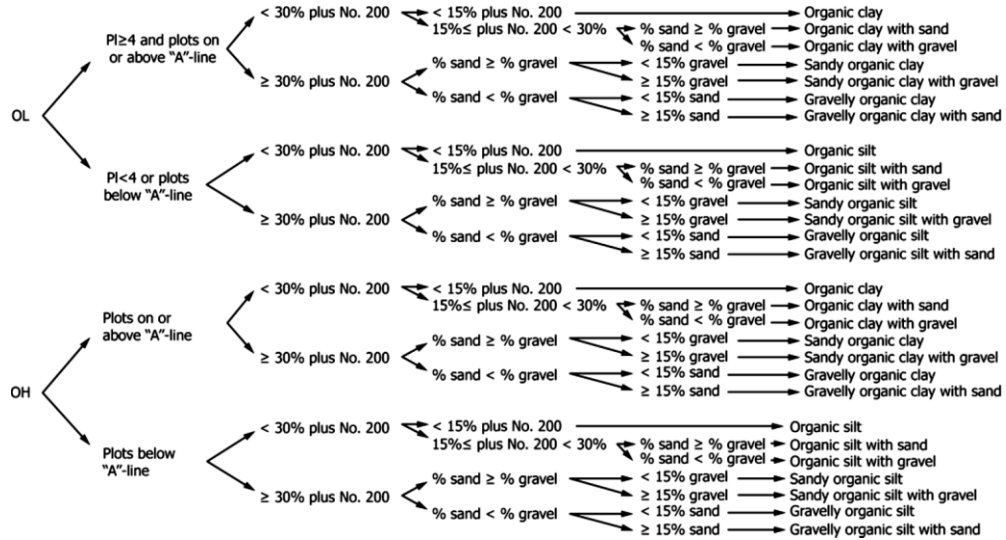
Esta clasificación se basa en tres grandes divisiones: suelos de grano grueso, de grano fino y suelos altamente orgánicos. Luego de una observación visual y ciertos ensayos de laboratorio, se asigna un símbolo de grupo y un nombre al suelo de acuerdo con las siguientes graficas:

Figura 2: Flujograma para la clasificación de suelos de grano fino (50% o más pasa el tamiz No.200)



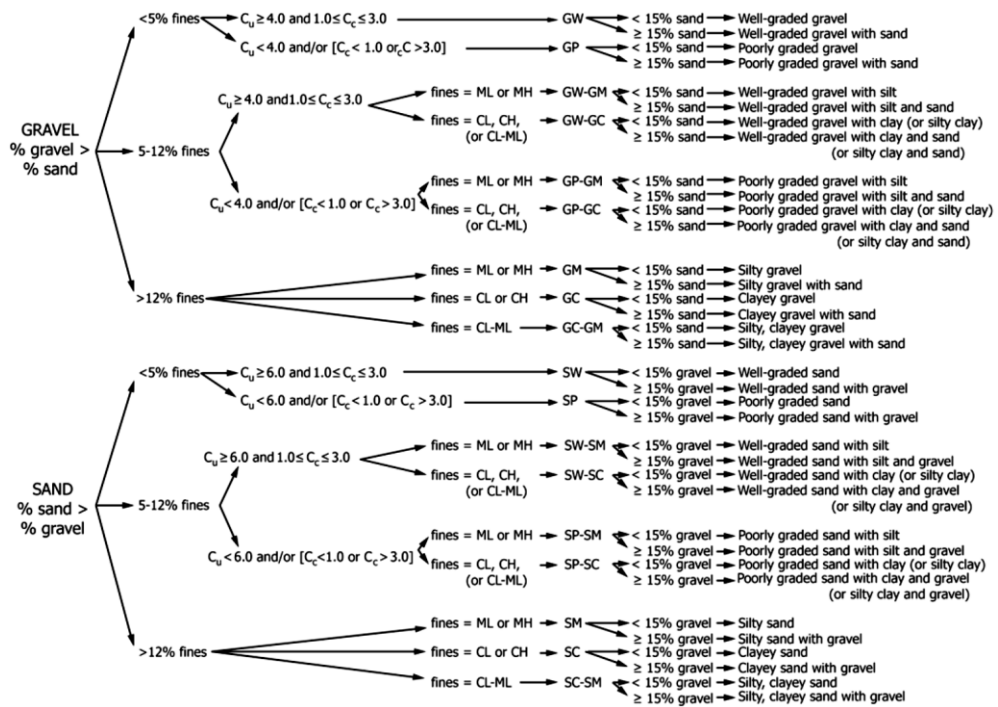
Fuente: ASTM: D 2487-17., 2018a, fig. 1

Figura 3: Flujograma para la clasificación de suelos orgánicos de grano fino (50% o más pasa el tamiz No.200)



Fuente: ASTM: D 2487-17., 2018a, fig.2

Figura 4: Flujograma para la clasificación de suelos de grano grueso (más del 50% se retiene en el tamiz No.200)



Fuente: ASTM: D 2487-17., 2018a, fig. 3

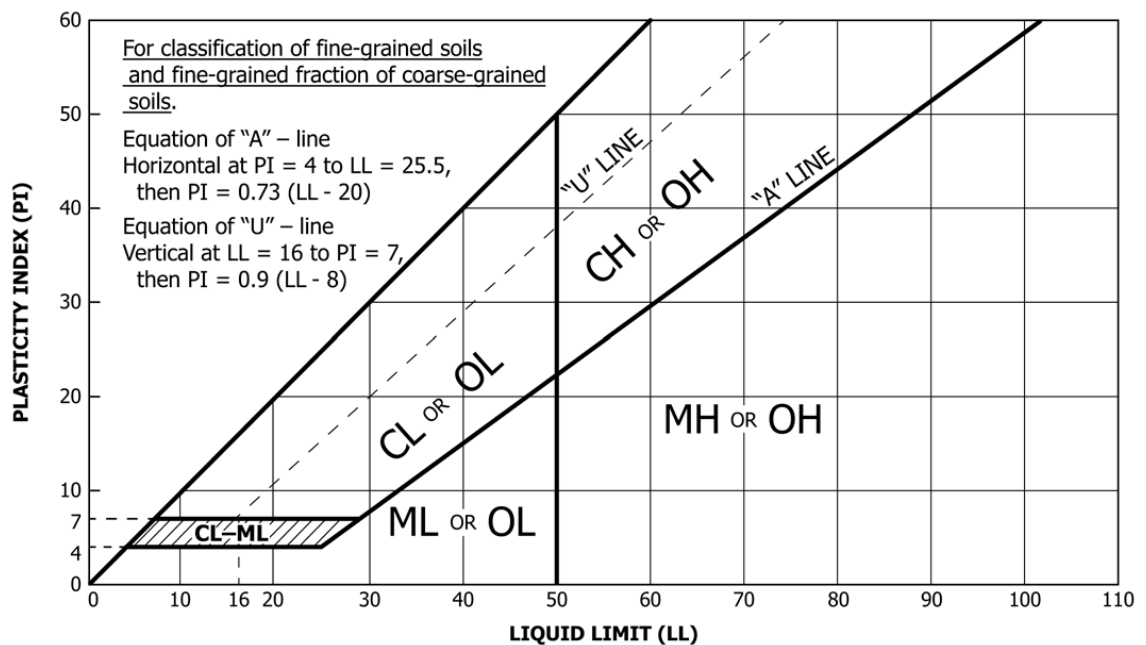
Es necesaria la construcción de una curva granulométrica acumulativa de la fracción de suelo retenida en el tamiz No. 200 para estimar contenidos de finos menores al 5%.

En caso de que el contenido de finos se encuentre entre el 5 y 15%, adicionalmente a la curva granulométrica acumulada es necesario encontrar el límite líquido e índice de plasticidad de la muestra.

Para contenidos de finos mayores al 15% se debe conocer el porcentaje presente de arenas y gravas, límite líquido e índice de plasticidad.

Los suelos se clasifican de grano fino cuando el 50% o más pasa el tamiz No.200. En este caso es necesario el uso de la carta de plasticidad la cual utiliza como entrada el límite líquido y el índice de plasticidad.

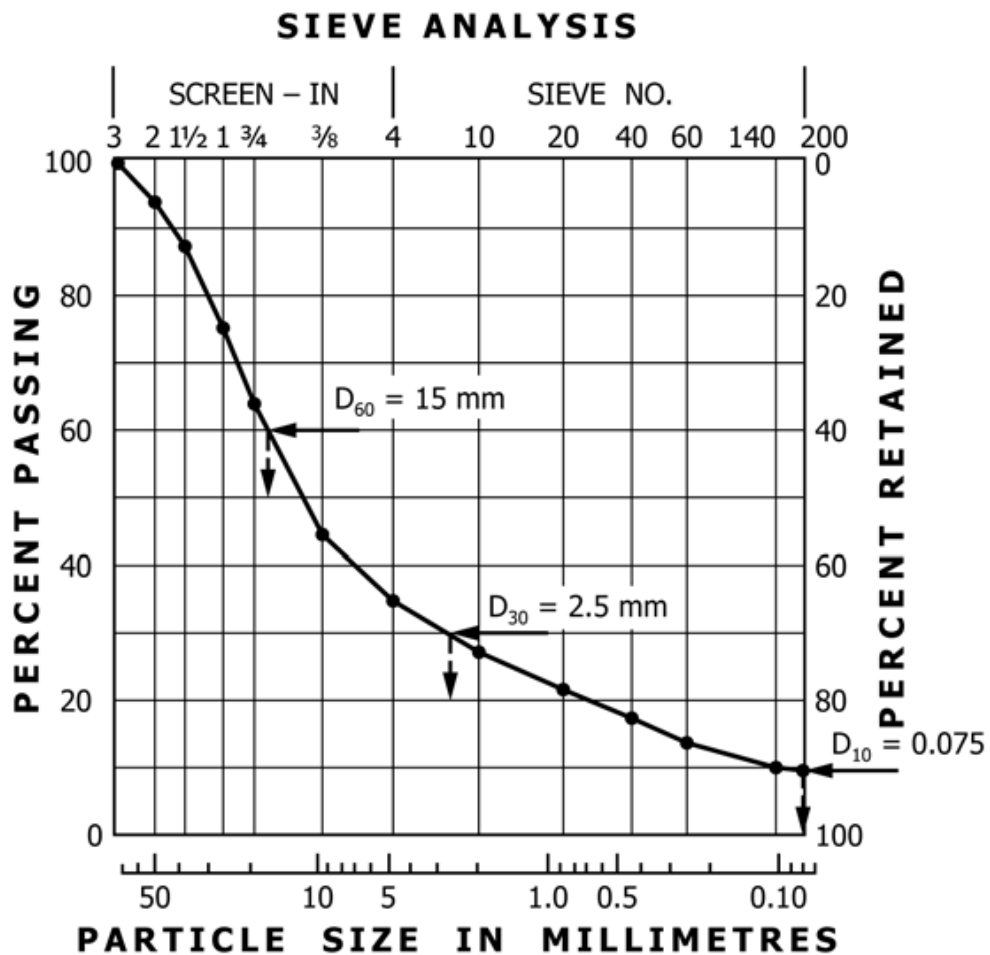
Figura 5: Carta de plasticidad



Fuente: ASTM: D 2487-17., 2018a, fig. 4

Para porcentajes mayores al 50% de material retenido en el tamiz No. 200, el suelo se clasifica como de grano grueso y es necesario la determinación del coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc), los cuales dependen del D10, D30 y D60 que son los diámetros de las partículas correspondientes al 10,30 y 60% de pasante en la curva granulométrica acumulada.

Figura 6: Curva granulométrica acumulada



$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{15}{0.075} = 200 \quad Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(2.5)^2}{0.075 \times 15} = 5.6$$

Fuente: ASTM: D 2487-17., 2018a, fig. 5

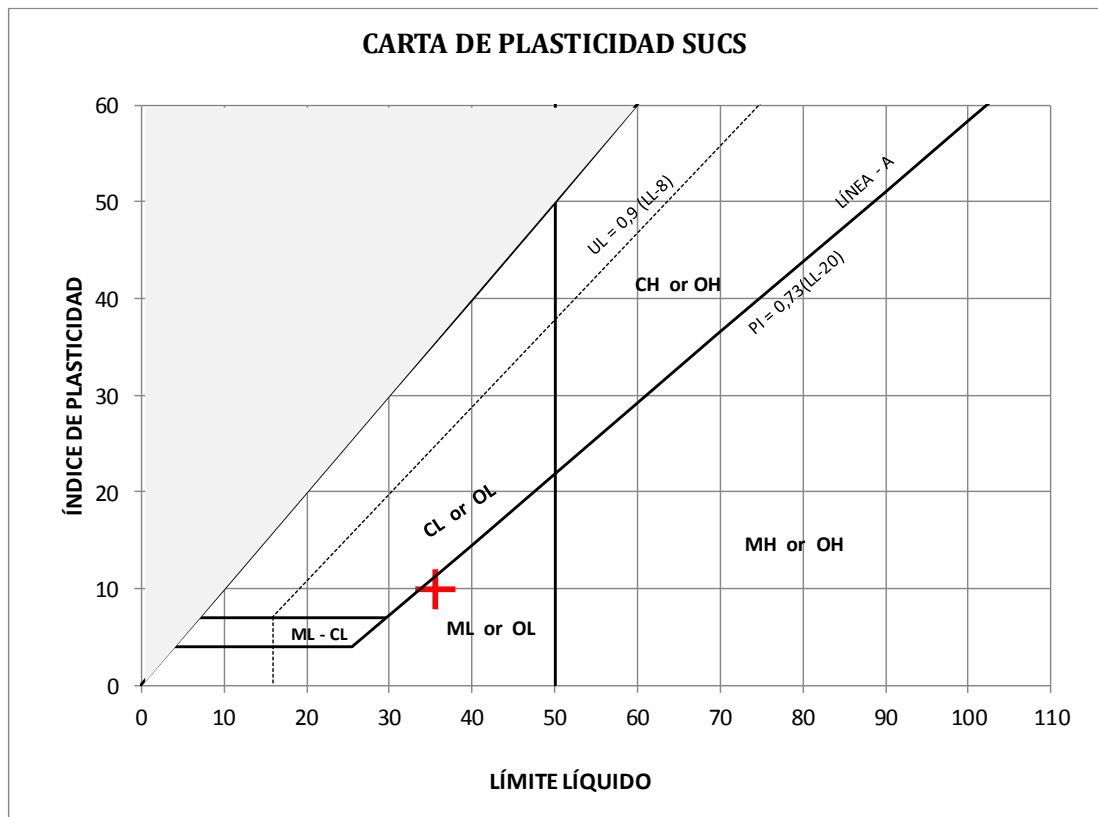
A continuación, se muestran los resultados finales obtenidos en la clasificación del suelo en estudio y un breve análisis del significado de estos.

Tabla 2: Clasificación del suelo

RESUMEN DE RESULTADOS SUCS			
Humedad Natural	11.08	% Grava	1
Límite Líquido (LL)	36	% Arena	18
Límite Plástico (LP)	26	% Finos	81
Índice de Plasticidad (IP)	10	Nombre	Limo baja plasticidad
Casificación SUCS	ML	Típico	

Fuente: Elaboración propia

Figura 7: Carta de Plasticidad Clasificación SUCS



Fuente: Laboratorio de Suelos y Resistencia de Materiales PUCE.

De acuerdo con los valores de límite líquido e índice de plasticidad, el suelo se encuentra por debajo de la Línea A, lo que lo clasifica como un limo con arena o de baja plasticidad. Adicionalmente se conoce que tiene un alto contenido de finos, por lo que es necesario la realización de una granulometría por hidrómetro para poder clasificar la fracción fina de una mejor manera y tener un buen entendimiento del material ya que el efecto de la succión en materiales arcillosos es más significativo.

3.2.1. Determinación de la humedad

El procedimiento descrito a continuación es extraído de la norma ASTM D2216-19: Método estándar para la determinación en el laboratorio del contenido de humedad de suelos y rocas a través de la masa.

Lo primero que se debe hacer es determinar la masa del tarro y registrar este valor. Se coloca la muestra de suelo en estado natural en el tarro y se registra la masa del tarro más el suelo. Se introduce la muestra en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 12 a 16 horas. Al término de este período se pesa la muestra fría y se registra su valor.

Durante la realización de todos los ensayos es necesario determinar el contenido de humedad que tiene en ese momento la muestra. A continuación, se muestra el valor correspondiente al suelo utilizado para la clasificación SUCS.

Tabla 3: Contenido de humedad

CONTENIDO DE HUMEDAD				
Peso Cápsula	Peso Cápsula + Suelo Humedo	Peso Cápsula + Suelo Seco	% Humedad	% Humedad Promedio
17.06	72.46	66.87	11.22	11.08
18.12	74.32	68.78	10.94	

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Granulometría

El procedimiento descrito a continuación se basa en la norma ASTM D6913-17: Método estándar para el análisis de la distribución del tamaño de las partículas del suelo utilizando tamices.

Se debe homogenizar cuidadosamente el total de la muestra en estado natural (desmenuzándola con un mazo), tratando de evitar romper sus partículas individuales. Posteriormente se reduce por cuarteo una cantidad de muestra levemente superior a la mínima recomendada según el tamaño máximo de partículas del árido.

Es importante tener una muestra representativa de aproximadamente 500 gr. Se debe secar el material ya sea al aire a temperatura ambiente o bien dentro del horno. Cuando esté seca, se obtiene la cantidad mínima recomendada del material para ensayar.

Se debe remojar el suelo en un recipiente con agua hasta que las partículas más finas se suelten, enseguida se lava el suelo colocando como filtro el tamiz No.200 ASTM (75 μ m), hasta observar que el agua utilizada esté

limpia. El material retenido en la malla se deposita en una bandeja y se coloca a horno durante 24 horas.

Se deposita el material en la criba superior del juego de tamices, los que deberán encontrarse limpios y ordenados en forma decreciente hasta el N°200. El juego deberá contar de una tapa en la parte superior y una bandeja de residuos en la inferior. Se hace vibrar el conjunto durante 5 a 10 minutos tiempo después del cual se retira del vibrador y se registra el peso del material retenido en cada tamiz.

Si existe material que pase el tamiz N°200 se debe realizar una hidrometría.

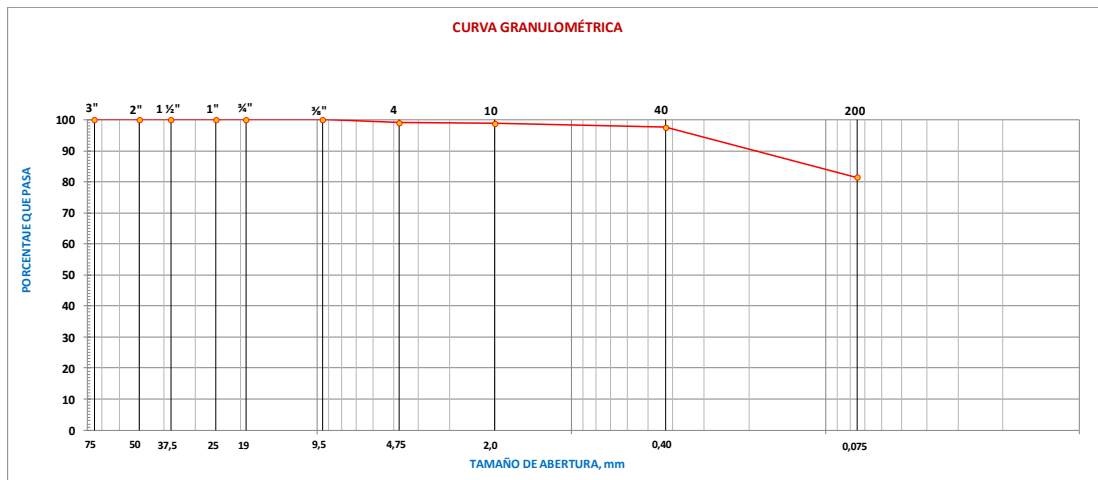
La tabla siguiente muestra los valores de porcentaje tanto retenido como pasante de cada tamiz utilizado para la realización del ensayo granulométrico.

Tabla 4: Granulometría

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
Tamiz N°	Abertura (mm)	% Retenido	% Que Pasa
3"	75	0.00	100.00
2"	50	0.00	100.00
1 1/2"	37.5	0.00	100.00
1"	25	0.00	100.00
3/4"	19	0.00	100.00
3/8"	9.5	0.00	100.00
4	4.75	0.95	99.05
10	2	1.23	98.77
40	0.425	2.37	97.63
200	0.075	18.61	81.39

Fuente: Elaboración propia

Figura 8: Curva Granulométrica Clasificación SUCS



Fuente: Laboratorio de Suelos y Resistencia de Materiales PUCE.

Con la granulometría es posible conocer la distribución del suelo de acuerdo con el tamaño de las partículas. El suelo en estudio tiene un alto contenido de finos ya que el 81.39% pasa el tamiz No.200 y la otra fracción está compuesta fundamentalmente de arena fina.

3.2.3. Granulometría por hidrómetro

El procedimiento descrito a continuación se extrajo de la norma ASTM D7928-17: Método estándar para la determinación de la distribución del tamaño de las partículas de suelo de grano fino por sedimentación.

Lo primero que se debe hacer es mezclar 5 g de sodio hexametáfosfato con la muestra de suelo o disolver esa cantidad de un agente dispersante (también denominado agente defloculante) en 100 ml de agua destilada y mezclarla con el suelo.

A continuación, se agita la solución dentro de una mezcladora y se vacía a otra probeta de 1000 cc. de capacidad que se encuentre apoyada sobre una

base firme. Se puede además agitar manualmente la probeta. Es importante tener en cuenta que las partículas de suelo no se queden pegadas en las paredes de la probeta donde no llega el agua.

Se debe accionar el cronómetro o tomar en cuenta la hora exacta hasta con segundos e insertar el hidrómetro. Cada lectura debe ir acompañada con la hora exacta en la que fue tomada.

Las tablas expuestas a continuación muestran los datos utilizados para la realización del ensayo, así como el porcentaje correspondiente a cada uno de los tamaños de partículas que permiten clasificar la fracción fina del suelo.

Tabla 5: Datos Hidrometría

DATOS HIDROMETRÍA			
Gravedad específica de sólidos (GS)	2,60	Agente dispersante	NaPO ₃
Hidrómetro Tipo ASTM	152 H	Cantidad del agente dispersante (gr/lit)	40
Masa inicial de suelo seco (g)	51,09	Corrección del menisco	1
Masa inicial del suelos seco corregido (g)	50,75	Corrección de cero	5
Temperatura del ensayo (°C)	20,04	Corrección de temperatura	0,16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: Humedad Higroscópica

HUMEDAD HIGROSCÓPICA			
Peso Cápsula	Peso Cápsula + Suelo Humedo	Peso Cápsula + Suelo Seco	% Humedad
6.23	18.36	18.28	0.66

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Tamizado

GRANULOMETRÍA TAMIZADO			
Tamiz N°	N° 10	N° 40	N° 200
% Que Pasa	100	100	72.42

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Lectura de datos

GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO									
Hora de la lectura	Tiempo (min)	Lectura Real	Lectura Corregida	Porcentaje más fino	Hidrometro corregido	L	L / t	D (mm)	Porcentaje Pasa Corregido
08:00:00	0	----	----	----	----	----	----	----	----
8:00:15	0.25	42	37.16	74.1	43.0	9.2	36.97	0.0843	74.1
8:00:30	0.50	39	34.16	68.1	40.0	9.7	19.47	0.0612	68.1
8:01:00	1	37	32.16	64.1	38.0	10.1	10.06	0.0440	64.1
8:02:00	2	35	30.16	59.7	36.0	10.4	5.20	0.0316	59.7
8:04:00	4	33	28.16	55.8	34.0	10.7	2.68	0.0227	55.8
8:08:00	8	31	26.16	51.8	32.0	11.0	1.38	0.0163	51.8
8:15:00	15	28	23.16	45.9	29.0	11.5	0.77	0.0122	45.9
8:30:00	30	23	18.16	36.0	24.0	12.4	0.41	0.0089	36.0
9:00:00	60	20	15.16	30.0	21.0	12.9	0.21	0.0064	30.0
10:00:00	120	16	11.16	22.1	17.0	13.5	0.11	0.0047	22.1
12:00:00	240	13	8.16	16.2	14.0	14.0	0.06	0.0033	16.2
16:00:00	480	11	6.16	12.2	12.0	14.3	0.03	0.0024	12.2
8:00:00	1440	8	3.16	6.3	9.0	14.8	0.01	0.0014	6.3
8:00:00	2880	7	2.16	4.3	8.0	15.0	0.01	0.0010	4.3

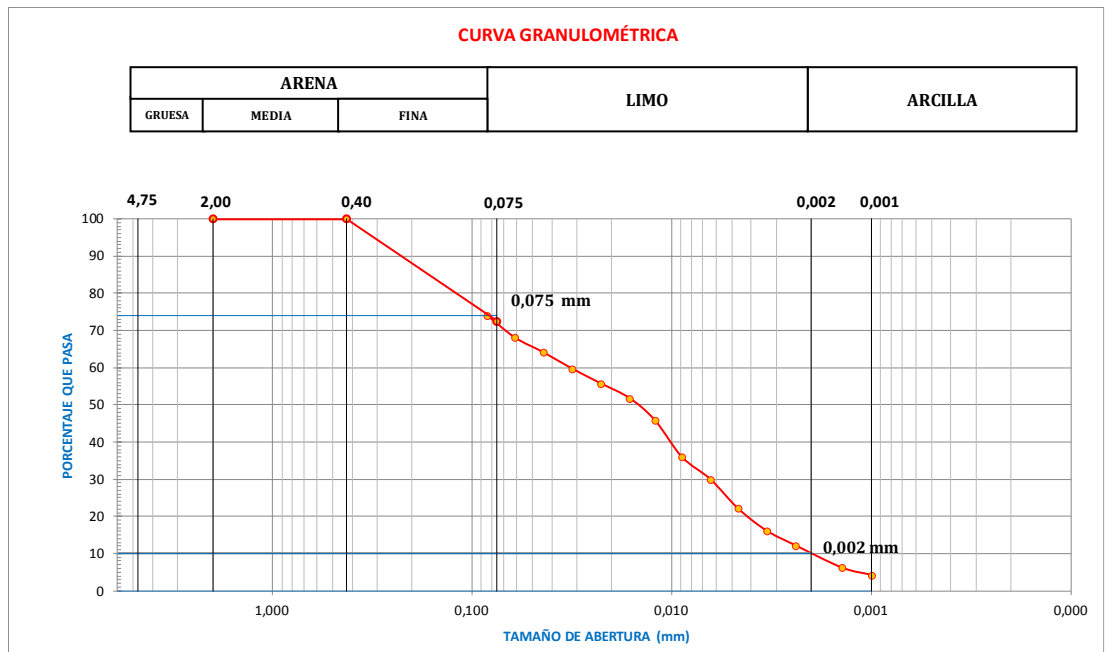
Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Resultados hidrometría

RESUMEN RESULTADOS HIDROMETRÍA			
Partículas menores a 0,075 mm	74.08%	TAMIZ N° 10 :	100.00%
Partículas menores a 0,005 mm	23.88%	TAMIZ N° 40 :	100.00%
Partículas menores a 0,002 mm	10.07%	TAMIZ N° 200 :	72.42%

Fuente: Elaboración propia

Figura 9: Curva Granulométrica por Hidrometría.



Fuente: Laboratorio de Suelo y Resistencia de Materiales PUCE

Como se esperaba el mayor porcentaje de la fracción fina del suelo corresponde a partículas con tamaños entre 0.075 y 0.002 mm, por lo que principalmente se cuenta con limos.

3.2.4. Límite líquido

Este parámetro se refiere al contenido de humedad, en porcentaje, de un suelo en los límites arbitrarios entre los estados semilíquido y plástico (ASTM:D4318-10, 2014).

El procedimiento descrito a continuación es extraído de la norma ASTM D4318-10: Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo.

Una vez obtenida la mezcla se coloca en el plato de mezclado y se ajusta su contenido de humedad agregándole la suficiente cantidad de agua destilada

hasta que su consistencia requiera de 25 a 35 golpes para cerrar la abertura. Esta muestra debe curarse durante el tiempo que sea necesario para lograr una adecuada distribución de la humedad.

Se coloca el aparato de límite líquido sobre una base firme (verificando que esté limpia y seca) y se deposita en la taza con una espátula porciones del material preparado previamente. Se debe alisar la superficie con la espátula, tal que la altura en el centro sea de 10 mm. Con la menor cantidad de movimientos posibles se debe formar una superficie horizontal lisa. Para mantener la humedad de la mezcla no usada se puede colocar una toalla húmeda que la cubra.

Una vez enrasado, se pasa el acanalador para dividir la mezcla en dos partes, con el borde biselado hacia adelante se realiza una línea sobre el suelo que une el punto más alto y el más bajo de la copa. La línea se dibuja como un arco, pero siempre se debe mantener la herramienta vertical a la superficie. Si se presentan desprendimientos de la pasta en el fondo de la taza, se debe retirar todo el material y reiniciar el procedimiento.

Cuando se tiene el surco, se gira la manivela del aparato con una frecuencia de 1.9 a 2.1 golpes por segundo y se cuenta el número de golpes necesarios para que la ranura cierre en una longitud de 13 mm en el fondo de la taza y las mitades de la esa mezcla entren en contacto.

Es importante verificar que una burbuja de aire no haya causado que la ranura se cierre prematuramente, se debe observar que las mitades de mezcla hayan

fluido juntas con aproximadamente la misma forma. Si la mezcla fue alterada se debe reformar agregando suelo o agua según sea necesario.

Si después de modificar la mezcla varias veces el número de golpes siempre es menor a 25, se debe registrar que el límite líquido no se pudo determinar y el suelo no es plástico, por lo que ya no sería necesario realizar la prueba de plasticidad.

Finalmente, se debe tomar una muestra del material que se junta en el fondo del surco para determinar la humedad. Con el material sobrante se debe repetir el procedimiento por lo menos 2 veces más, de modo de obtener tres puntos que varíen en un rango de 15 a 35 golpes.

En la tabla siguiente se muestra el resultado final del ensayo realizado para la determinación del Límite líquido de la muestra.

Tabla 10: Límite Líquido

LÍMITE LÍQUIDO (Método Multipunto)					
N° de Golpes	Peso Cápsula	Peso Cápsula + Suelo Humedo	Peso Cápsula + Suelo Seco	% Humedad	Límite Líquido
31	5.99	22.23	18.14	33.66	35.63
22	5.78	24.05	19.10	37.16	
17	9.23	24.48	20.24	38.51	

Fuente: Elaboración propia

3.2.5. Límite plástico

Este parámetro se refiere al contenido de humedad, en porcentaje, de un suelo en los límites entre los estados plástico y semisólido (ASTM:D4318-10, 2014).

El procedimiento descrito a continuación es extraído de la norma ASTM D4318-10: Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo.

La muestra de ensayo es la misma que la del límite líquido, la mezcla debe estar en un estado en el que la pasta de suelo se vuelva lo suficientemente plástica para moldearla como una esfera.

Se toma una porción de suelo de aproximadamente 1.5 a 2 gramos, se amasa entre las manos y se hace rodar con la palma de la mano o la base del pulgar sobre una superficie de amasado, es recomendable que sea de vidrio para conservar su contenido de humedad y no perder parte de la muestra. Se forma un cilindro que debe alcanzar un diámetro aproximado a 3.2 mm en no más de 2 minutos.

Se debe doblar y amasar nuevamente, para volver a formar el cilindro, lo que se repite hasta que el cilindro se disgregue al llegar al diámetro de 3.2 mm. El contenido de humedad que tiene el suelo en ese momento representa el límite plástico, el cual se determina colocando las fracciones de suelo en un recipiente y secándose al horno.

A continuación, se muestra el resultado correspondiente al ensayo en cuestión.

Tabla 11: Límite Plástico

LÍMITE PLÁSTICO				
Peso Cápsula	Peso Cápsula + Suelo Humedo	Peso Cápsula + Suelo Seco	% Humedad	% Humedad Promedio
8.63	15.53	14.12	25.68	25.79
6.20	14.27	12.61	25.90	

Fuente: Elaboración propia

3.2.6. Índice de plasticidad

Se refiere al rango de contenido de humedad sobre el cual el suelo se comporta como plástico. Numéricamente es la diferencia entre el límite líquido y plástico (ASTM:D4318-10, 2014).

$$PI = LL - PL$$

Donde:

LL = límite líquido y plástico en números enteros

PL = límite plástico en números enteros

3.3. Determinación de la Humedad Óptima mediante el ensayo Proctor

Para la determinación del contenido de humedad óptimo y la densidad máxima seca de un suelo se realiza el ensayo de Proctor Estándar o Modificado. Estos se diferencian principalmente en la energía de compactación que se aplica. En general, permiten determinar, mediante la compactación en laboratorio, la relación entre contenido de humedad y peso unitario seco del suelo.

Para la compactación tanto por el ensayo Proctor estándar como por el modificado se debe realizar el mismo procedimiento, pero se deben tomar en

cuenta las diferencias que tienen según lo indican las normas ASTM D698-12, compactación estándar y ASTM D1557-12, compactación modificada.

Una de las recomendaciones más importantes es no usar suelo previamente compactado. Se debe preparar la muestra pasándola por el tamiz adecuado según el método deseado, los cuales serán descritos a continuación.

Método A: se debe usar un molde de 4 pulg cuando el 25% o menos se retiene en el tamiz N°4.

Método B: se debe usar un molde de 4 pulg cuando el 25% o menos se retiene en el tamiz $\frac{3}{8}$ ".

Método C: se debe usar un molde de 6 pulg cuando el 30% o menos se retiene en el tamiz $\frac{3}{4}$ ".

En el caso del material con el cual se está trabajando se aplica el método A.

Una vez escogido el método, se debe determinar el contenido de agua del suelo tamizado. Se lleva la muestra a su contenido de humedad óptimo y este debe ser menor al límite plástico. Es necesario obtener 2 muestras con contenido de humedad superior y 2 muestras con contenido de humedad inferior a partir del límite óptimo y su variación puede estar alrededor del 2%.

Las masas de suelo tamizado que se deben usar son aproximadamente de 2.3 kg para el método A para cada punto.

Si se quiere modificar el contenido de agua para aumentarlo se debe rociar sobre el suelo durante el mezclado y para retirarla se debe dejar secar a temperatura ambiente o en un horno que no supere los 60°C.

Se mezcla completamente cada muestra para asegurar una distribución uniforme del agua y posteriormente dejar reposar en un recipiente cubierto antes de que sea compactada según la siguiente tabla:

Figura 10: Tiempo de reposo requerido

Tabla 1. Tiempo de reposo requerido para muestras humedecidas

<i>Clasificación</i>	<i>Tiempo mínimo de reposo</i>
GW	No tiene ningún requisito
GP	No tiene ningún requisito
SW	No tiene ningún requisito
SP	No tiene ningún requisito
GM	3h
Clasificación	Tiempo mínimo de reposo
SM	3h
Todos los demás suelos	16h

Fuente: ASTM: D 1557-12.1.3.1.3, 2018

Al ser el suelo un ML se lo debe dejar reposar durante 16 horas siguiendo la tabla anterior.

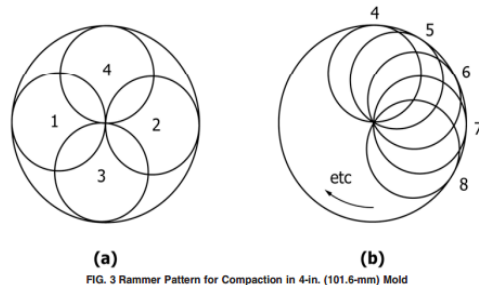
Para la compactación se debe registrar primero la masa del molde y la base. Según lo especifica la norma D698 y la D1557 el molde que se va a utilizar debe descansar sobre una base rígida que sea mayor a 91 kg. Se debe ensamblar el molde a la base, es importante que sea fácil asegurar y remover el molde una vez terminada la compactación.

Se debe ir llenando el molde con suelo suelto por capas (el número depende del ensayo que se esté realizando) e ir compactándolas. Cada capa debe esparcirse uniformemente. Estas después de la compactación deben tener aproximadamente el mismo espesor.

Dependiendo del método se debe compactar de la siguiente forma cada capa:

Método A con el molde 4 pulg y 25 golpes

Figura 11: Secuencia de compactación



Fuente: ASTM: D 1557-12.1.3.1.3, 2018

Es importante considerar que si al llegar a la quinta capa esta sobrepasa los 6 mm por encima del borde superior del molde la muestra será descartada.

El martillo para la compactación debe tener una posición vertical durante todo el ensayo y como se mencionó anteriormente el número de golpes depende del método. Una vez compactadas las capas se debe retirar el collar del molde, enrasar el material y con una brocha limpiar o remover el suelo sobrante. Luego de esto se procede a pesar la muestra más el molde.

Con la ayuda de un gato extraer el suelo del molde y extraer dos muestras de la mitad del cilindro para obtener el contenido de humedad.

Se utilizó el ensayo proctor modificado debido a que emplea una mayor energía y de esta manera se pueden simular mejor las condiciones de la cimentación que se quiere representar. Las tablas siguientes muestran tanto los datos de entrada para la realización del ensayo, como los resultados finales obtenidos.

Tabla 12: Datos para el ensayo Proctor

DATOS ENSAYO PROCTOR			
Método	A	N° de Capas	5
Peso Martillo	44.48 N	N° de Golpes por Capa	25
N° del Molde	7	Altura Caida Martillo	457.20 mm
Vol. del Molde	938.61 cm ³	Peso del Molde	3899.00 g

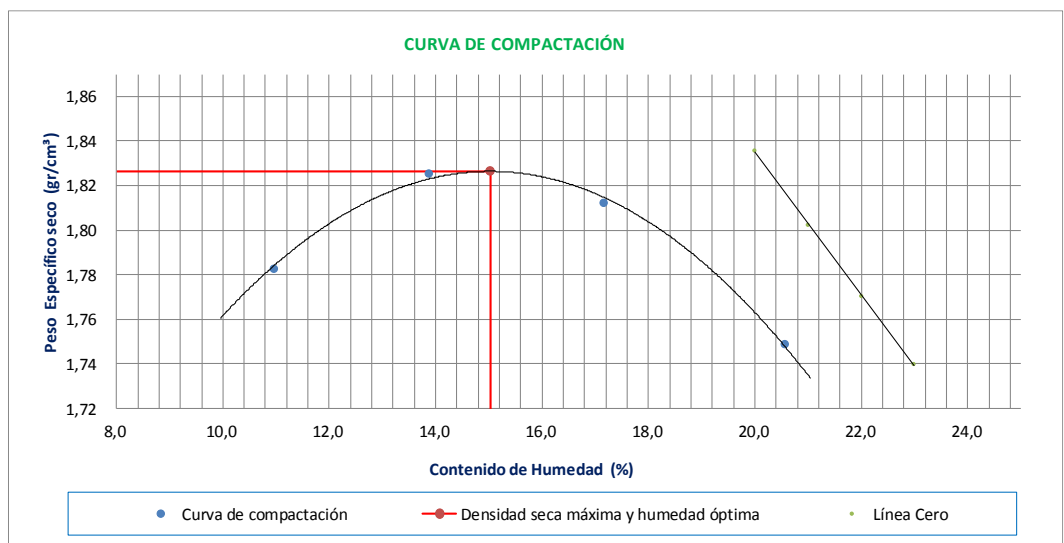
Fuente: Elaboración propia

Tabla 13: Resultados de Densidad máxima seca y Humedad óptima

PRUEBA N°	1		2		3		4	
Peso molde + suelo húmedo, g	5850		5892		5878		5756	
Peso molde, g	3899		3899		3899		3899	
Peso suelo húmedo, g	1951		1993		1979		1857	
DENSIDAD HUMEDA, g/cm ³	2.08		2.12		2.11		1.98	
Peso cápsula, g	18.05	16.96	16.25	17.07	18.11	18.46	18.22	17.30
Peso cap. + suelo húmedo, g	78.96	88.72	76.55	71.73	73.33	86.87	66.39	68.21
Peso cap. + suelo seco, g	71.61	79.90	67.60	63.85	63.86	75.28	61.57	63.25
Contenido de Humedad, %	13.72	14.01	17.43	16.84	20.70	20.40	11.12	10.79
HUMEDAD PROMEDIO, %	13.87		17.14		20.55		10.96	
DENSIDAD SECA, g/cm ³	1.83		1.81		1.75		1.78	
Densidad seca máxima =			1.83 g/cm ³		% Humedad Óptima =			15.03

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12: Curva de Compactación Ensayo Proctor



Fuente: Laboratorio de Suelos y Resistencia de Materiales PUCE,

El método A, para la elaboración de un ensayo Proctor, corresponde al tamaño del molde utilizado, tamaño máximo de las partículas y el número de puntos que se van a utilizar para la determinación de la densidad máxima seca y la humedad óptima de la muestra. El valor de humedad óptima fue utilizado como referencia para elaborar las curvas características de retención del suelo. Se utilizó un GS de 2,6 que fue obtenido previamente en los ensayos.

CAPÍTULO 4: SUCCIÓN MATRICIAL

4.1. Definición de la succión del suelo

Una de las características de los suelos parcialmente saturados es que la succión está presente en ellos, esta puede ser entendida mediante un estado de tensiones que se produce por una presión de agua negativa presente en los poros. Cuando el suelo está por debajo del nivel freático, las presiones de poros son positivas, así, cuando el suelo está por encima del nivel freático y exista en este un grado de humedad que esté por debajo la saturación, las presiones que se van a presentar serán negativas o de succión (Carrasco, 2017).

Al considerar las variaciones de volumen la principal variable que se debe tomar en cuenta es la succión, cuanto mayor sea el valor de esta las deformaciones existentes en el suelo de igual manera serán mucho mayores (García-Elías et al., 2017).

Por la succión se ven afectadas las propiedades del suelo tanto mecánicas como hidráulicas y además es importante mencionar que está altamente relacionada con la capacidad del suelo de absorber agua cuando se encuentra a presión atmosférica (Carrasco, 2017).

La succión puede ser expresada en diferentes unidades como en energía por unidad de masa como por ejemplo J/kg, en energía por unidad de volumen como J/m³ o Pa, o energía por unidad de peso J/N (Likos & Lu, 2004). La más utilizada por la literatura y por la tanto en la disertación va a ser la energía por unidad de volumen, así como la unidad pF que representa el logaritmo de

kilopascal. Para poder manejarse de una unidad a otra se deben utilizar los conceptos logarítmicos.

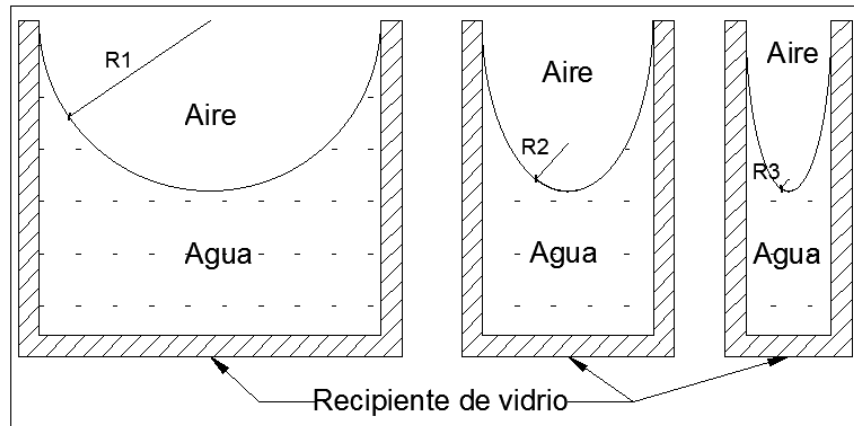
La succión total es definida por la Sociedad Internacional de Ciencias del Suelo (ISSS, 1963) como “la cantidad de trabajo por unidad de cantidad de agua pura, que debe realizarse por fuerzas externas para transferir reversible e isotérmicamente una cantidad infinitesimal de agua hasta un punto dentro del suelo”.

De igual manera podemos definir a la succión total como la suma de la succión matricial y la succión osmótica (Carrasco, 2017). Así, para poder llegar a un entendimiento pleno se debe definir cada componente.

A la succión matricial se la puede definir como la diferencia que existe entre la presión de aire de poros y la presión de agua de poros (Ricardo & Arango, 2017). A esta succión se la puede relacionar con el grado de absorción del suelo y además con las presiones que se forman en el menisco capilar, al aplicarse fuerzas sobre las partículas. De esta manera la succión depende del tamaño que tienen tanto las partículas como los poros, así como de la saturación (Carrasco, 2017).

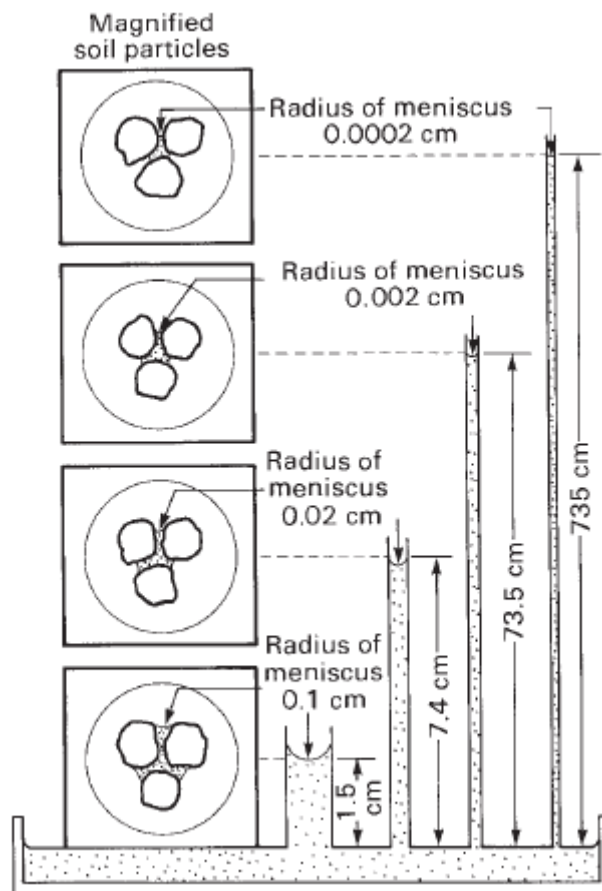
Según Carrasco (2017) se conoce que cuando la saturación disminuye, la curvatura de la superficie o menisco se reduce produciendo poros más pequeños y una succión matricial más alta como se puede observar en las siguientes figuras.

Figura 13: Radio de curvatura del menisco para diferentes espacios entre partículas



Fuente: Elaboración propia

Figura 14: Tubos capilares que muestran la interfaz aire-agua



Fuente: Fredlund, Rahardjo, & Fredlund (2012)

El segundo componente es la succión osmótica a la cual la podemos definir en base a la cantidad de sales disueltas que estén presentes en el suelo y a la actividad química que estas producen (Carrasco, 2017).

Cuando no existe la presencia de solutos en el agua del suelo en mayor o menor cantidad que las del agua de infiltración y no se produce la disolución de sales, se puede considerar que la succión matricial es igual a la succión total. Es importante tomar en cuenta a la succión osmótica sobre todo cuando el suelo esté muy cercano a la saturación, en tal caso no existiría una succión matricial y solo se consideraría la concentración de los solutos (Carrasco, 2017).

La relación existente entre el contenido de agua y la succión es muy importante cuando se habla de suelos parcialmente saturados y se la conoce como la curva característica del agua en el suelo o curva de retención del agua en el suelo que vamos a denominar SWCC debido a su nombre en inglés. Esta relaciona el potencial de succión que puede ser total, matricial u osmótica, con la humedad o grado de saturación (Alfaro Soto, 2008).

Se puede determinar como la variación de la succión del suelo con la capacidad de retener agua de los macro y micro poros del mismo (Alfaro Soto, 2008). La relación de la succión con la humedad es una curva no lineal. Esta depende del tamaño de los poros, de la composición mineralógica del suelo y densidad del mismo (Carrasco, 2017).

Para una mejor interpretación de los resultados es conocido que cuando un suelo es sometido a un proceso de secado la succión en el mismo es alta, mientras que

un suelo que es sometido a un proceso de humectación presenta succiones bajas, especificando que esto es para un mismo contenido de agua (Carrasco, 2017).

La succión matricial tiene una relación inversamente proporcional con el contenido de agua, de esta manera, si esta aumenta el contenido de agua disminuye y esto se produce por la evaporación (Fredlund et al., 2012).

4.2. Técnicas de medida

Para poder medir la succión matricial, es necesario emplear un método en el que se utilice un material poroso que servirá como sensor. De esta manera este puede llegar a estar en equilibrio con la succión de la muestra de suelo y así el contenido de agua final que este sensor llegue a tener va a representar la magnitud de la succión matricial buscada (Carrasco, 2017).

El método indirecto más utilizado para medir la succión es el del papel filtro. En este se debe colocar el papel junto con el suelo en un recipiente hermético durante 7 días, transcurrido este tiempo se debe medir el contenido de agua que tiene el papel. Es importante dejar los 7 días debido a que es el tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio entre la presión del vapor de agua de los poros del suelo, la presión del vapor del agua de los poros del papel filtro y la presión parcial del vapor de agua en el aire interior del recipiente hermético (Ricardo & Arango, 2017).

De esta manera, se puede considerar que la succión del suelo es igual a la succión del papel y se la va a estimar a través de las curvas de calibración del papel filtro que están en función del contenido de agua (Ricardo & Arango, 2017).

Las ventajas de aplicar este método son que se puede medir tanto la succión matricial como la succión total, su rango de medición se encuentra entre 3 y 100 000 kPa, ofrece una buena precisión, sus materiales son fáciles de conseguir y no muy costosos, se utiliza papel filtro Whatman No.42, un horno y una balanza. Por último, también se puede destacar que el tiempo de ejecución de 7 días es relativamente corto (Ricardo & Arango, 2017).

A continuación, se explicará detalladamente el procedimiento a seguir en el laboratorio el cual está basado en la norma ASTM D5298-10 y permitirá la obtención de varios puntos de la curva característica del agua del suelo para su estimación final.

Lo primero que se debe hacer es poner a secar en el horno los papeles filtro que se ocuparán en los ensayos, estos deben permanecer en el horno por 16 horas o al menos toda la noche y posteriormente ser colocados en el desecador hasta que sean utilizados ya que estos deben estar totalmente secos al momento de entrar en contacto con el suelo.

El papel filtro debe estar en contacto con la muestra para medir la succión matricial, de esta manera se va a producir la transferencia de fluidos incluyendo a las sales disueltas que estén presentes en el suelo.

Se debe utilizar entre 200 a 400 gramos de muestra para reducir el tiempo de equilibrio y además minimizar los cambios de succión.

Se van a utilizar tres papeles filtro para cada ensayo, primero se debe colocar una porción de muestra seguido de los tres papeles, se colocan tres ya que los dos exteriores van a prevenir la contaminación del papel interior, en el cual se

medirá la succión matricial. El papel central debe tener un diámetro menor que los dos exteriores y esto se lo logra recortándolo unos 3 o 4 mm, de esta manera se evita el contacto directo con el suelo. Una vez colocados los tres papeles filtro se coloca encima la otra parte de la muestra.

La muestra junto a los papeles se debe colocar en un ambiente hermético para poder equilibrar la succión, esto se logrará mediante la utilización de plástico stretch film y un desecador, la temperatura ideal promedio es de aproximadamente 20° C, se debe colocar el recipiente en un lugar en el que la variación de temperatura no sea mayor a 3°C, con esto se mantendrán las condiciones constantes por el período de tiempo necesario para mantener el equilibrio que es de 7 días.

Figura 15: Desecador



Fuente: Elaboración propia

Para determinar la masa del papel filtro es necesario medir la masa del recipiente donde va a ser colocado, en este caso, una bolsa plástica con cerradura hermética, y obtenerla con una precisión de 0.0001 gramos, esta masa la conoceremos como masa del recipiente frío T_f .

Posteriormente se debe tomar el papel filtro, colocarlo en la bolsa y enseguida cerrar la misma, la manipulación del papel se hará mediante pinzas para no interferir con las condiciones del ensayo. Es importante realizar todo este procedimiento en no más de 5 segundos para que la humedad no se vea afectada por las condiciones del aire. La masa de interés para los cálculos es la de la bolsa con el papel húmedo y se la conocerá como M_1 .

Para el secado, se debe colocar el papel filtro en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por un tiempo mínimo de 2 horas. Una vez transcurrido el tiempo el papel se debe quedar en un recipiente hermético durante 2 o 3 minutos para que se equilibre la temperatura. Se debe identificar la bolsa y colocar un nuevo papel filtro dentro para que este absorba la humedad adquirida en la manipulación anterior. Con el mismo cuidado, mediante la utilización de pinzas se debe retirar el papel de la bolsa y colocar el que estaba en el horno. Se obtiene la masa de la bolsa con el papel seco y a esta se la va a registrar como M_2 . Por último, se anota la masa de la bolsa sin papel y se la conoce como T_c .

Los papeles filtro no son reusables una vez acabado el ensayo y la obtención de las masas estos se deberán desechar.

4.3. Medida de la succión del suelo en laboratorio

4.3.1. Implementación del ensayo

Debido a que el ensayo no había sido realizado en el laboratorio de la PUCE, fue necesaria la implementación de este. Siguiendo el procedimiento anteriormente descrito, con el suelo en estado natural se realizó el ensayo con 5 muestras.

Se debe tener en cuenta y resaltar algunos puntos de la implementación ya que al ser la primera vez que se iba a llevar a cabo la práctica del ensayo se obtuvieron varias enseñanzas útiles para la realización de este.

El primer aprendizaje fue que al utilizar el suelo natural era fácil colocarlo en un recipiente, ya que al no estar compactado ni tallado, el suelo tomaba su forma, sin embargo, esto era algo que se debía cambiar para obtener los datos reales necesarios, ya que el suelo modificado no iba a caber en el recipiente. La solución para este inconveniente fue la utilización de plástico stretch film, el cual ayudaría, además de conservar la humedad deseada, a mantener en contacto las porciones de suelo con los papeles ejerciendo presión entre ellos.

Al momento de obtener la masa de las fundas que iban a ser utilizadas para el ensayo, fue evidente que, debido a su forma, tamaño y estructura, la variación de su masa iba a ser significativa cada vez que se cambiara el punto de apoyo o manera de colocación en la balanza.

Es por lo que aquí, cabe resaltar tres puntos importantes, el primero, la utilización de la balanza ya que al tener una precisión de 0.0001 g se debe tener un mayor cuidado debido a que hay más margen de error. Segundo, fue

necesario cambiar el tamaño de la funda ya que, al ser la primera muy grande, la masa era muy variable, además que, al momento de la colocación del papel, la masa de este era mucho menor y no se podía obtener un dato certero. Por último, debido a la variación de los datos descritos anteriormente se optó por la toma de tres o más medidas para la reducción del error.

Al ser este un ensayo tan sensible, fue muy importante dominar los instrumentos. Al haber tres papeles juntos, es recomendable que mediante la utilización de pinzas y guantes se practique la separación y traslado de estos, ya que además de ser demasiado importante que el papel central no tenga contacto con nada y no se altere de ninguna manera, el tiempo en el que se debe hacer todo ese procedimiento no puede exceder los 5 segundos y cualquier demora puede causar una alteración en los resultados.

Por último, para secar los papeles en el horno, se tuvo un problema con la identificación de cada uno y también con el recipiente en el cual se los iba a colocar. Primero, no se puede escribir nada en el papel ya que la tinta puede tapar sus poros, segundo, al ser papeles pequeños fueron colocados sobre platos de vidrio de similar dimensión, pero no se consideró que la ventilación del horno iba a hacer que estos se muevan y hasta terminen fuera del recipiente. La solución fue la creación de un método en el que se utilicen tarros más grandes con paredes, además se identificó cada uno para los diferentes porcentajes de humedad y se colocaron los papeles en un orden específico para que no existan confusiones.

A continuación, se pueden ver los cálculos realizados y resultados obtenidos para cada muestra en las siguientes tablas, la primera, muestra la toma de datos, la segunda, el cálculo del contenido de agua, las fórmulas ocupadas están debajo de cada título y, por último, la tercera tabla muestra los cálculos de la succión según varios autores.

Tabla 14: Datos tomados para la Implementación del Ensayo del Papel Filtro

DATOS MUESTRA IMPLEMENTACIÓN						
Muestra No.		1	2	3	4	5
Masa de la bolsa fria	Tc	2,6557	2,6785	2,6594	2,6423	2,6415
		2,6562	2,6745	2,6384	2,645	2,6416
		2,6544		2,6409	2,6454	2,6462
		2,6554	2,6765	2,6462	2,6442	2,6431
Masa del papel filtro húmedo + bolsa fria	M1	2,8906	2,8955	2,8676	2,8650	2,8583
		2,89	2,8889	2,8612	2,8671	2,8648
				2,8778	2,8661	2,8544
		2,8903	2,8922	2,8689	2,8661	2,8592
Masa del papel filtro seco + bolsa caliente	M2	2,8240	2,8311	2,8099	2,8198	2,8098
		2,8240	2,8319	2,8101	2,8198	2,8094
		2,8240	2,8315	2,8100	2,8198	2,8096
Masa bolsa caliente	Th	2,6334	2,6551	2,6231	2,6411	2,6327
		2,6337	2,6554	2,6242	2,6416	2,6338
		2,6336	2,6553	2,6237	2,6414	2,6333

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Cálculos contenido de agua Implementación Ensayo Papel Filtro

CÁLCULOS CONTENIDO DE AGUA IMPLEMENTACIÓN						
Muestra No.		1	2	3	4	5
Masa del papel filtro seco (M2-Th)	Mf	0,1904	0,1762	0,1863	0,1784	0,1763
Masa del agua en el papel filtro (M1-M2-Tc+Th)	Mw	0,0445	0,0395	0,0364	0,0435	0,0398
Contenido de agua del papel filtro (Mw/Mf)	Wf (%)	23,37	22,42	19,54	24,38	22,58

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Cálculo Succión Calibración Ensayo Papel Filtro

SUCCIÓN CALCULADA MUESTRA IMPLEMENTACIÓN						
Muestra No.		1	2	3	4	5
Succión (logkPa) ASTM	h	3,51	3,58	3,81	3,43	3,57
h=5.327-0.0779Wf h=2.412-0.0135Wf						
Punto de inflección	45,3	3208,48	3808,03	6382,63	2676,09	3701,69
Succión (logkPa) Chandler 1992	h	3,39	3,45	3,63	3,33	3,44
h=4.842-0.0622Wf h=6.050-2.48logWf						
Punto de inflección	47	2445,12	2802,85	4233,50	2115,44	2740,31
Succión (logkPa) Olivera	h	2,87	2,95	3,19	2,78	2,94
h=4.83-0.0839Wf h=2.57-0.0154Wf						
punto de inflección	33	739,78	889,61	1551,32	608,42	862,78
Succión Chandler 1986		2,25	2,39	2,78	2,12	2,36
h=5.85-0.0622w						
Punto de inflección		179,76	243,44	607,72	130,35	231,53

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Resumen Resultados Implementación

RESUMEN DE RESULTADOS						
Contenido de Agua	23,37	22,42	19,54	24,38	22,58	23,19
Succión (pF)						
ASTM	3,51	3,58	3,81	3,43	3,57	3,52
Chandler	3,39	3,45	3,63	3,33	3,44	3,40
Oliveira	2,87	2,95	3,19	2,78	2,94	2,88
Likos y Lu	2,25	2,39	2,78	2,12	2,36	2,28

Fuente: Elaboración propia

El objetivo principal de la implementación fue entender en su plenitud el procedimiento del ensayo, ganar experiencia y sobre todo verificar que se tenga un correcto proceder. Esto se lo pudo hacer mediante la repetitividad y confirmación de los resultados, ya que al ser estos cercanos, se puede determinar que el ensayo fue preciso.

Al observar los resultados, se puede evidenciar que 4 de los 5 valores obtenidos en el contenido de agua del papel filtro están próximos al 23%, el valor que varía, 19%, fue descartado ya que previamente a la tabulación de los resultados era conocido que este valor no iba a ser correcto, puesto que, al momento de tomar el papel del centro para pesarlo se pudo observar que se había colocado dos papeles en vez de uno y la humedad fue repartida en los mismos.

4.3.2. Succión real del suelo

Para la obtención de una curva característica que relacione el contenido de humedad con la succión obtenida, se realizó un moldeado con siete porcentajes de humedad, los mismos que fueron obtenidos a partir de la humedad óptima de 15,03%. De esta manera se tomaron 3 valores inferiores y 3 valores superiores, variando el contenido de humedad en un 2% cada vez. (9, 11, 13, 15.03, 17, 19, 21). Se utilizó un molde de 6" para poder tener más suelo con el que se pueda trabajar.

Con cada una de las muestras moldeadas a un contenido de humedad específico, se realizaron 3 determinaciones de la matriz de succión para lo que fue necesario tallar 6 porciones de suelo con geometría similar cada par y además de un tamaño suficiente para que el suelo cubra por completo al papel filtro de 5,5 cm. En total se realizaron 21 ensayos.

Figura 16: Tallado de la muestra



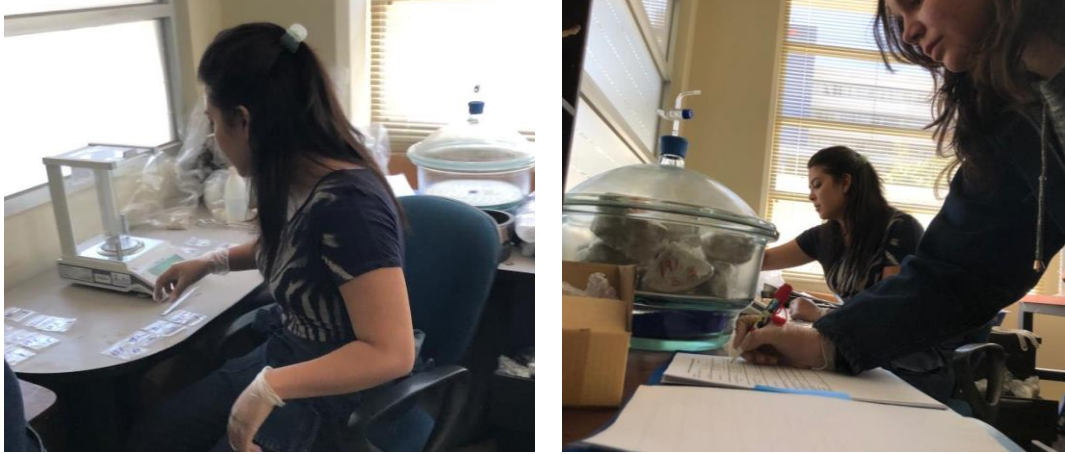
Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Muestra parcialmente tallada y colocada posteriormente en el desecador



Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Cálculo de la humedad en papeles filtros



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan los cálculos y resultados de cada uno con las siguientes tablas.

Tabla 18: Datos tomados muestra 9% humedad Ensayo del Papel Filtro

DATOS MUESTRA 9%				
Muestra No.		1	2	3
Masa de la bolsa fria	Tc	0,6810	0,6915	0,6832
		0,6794	0,6886	0,6932
		0,6796	0,6886	0,6846
		0,6800	0,6896	0,6870
Masa del papel filtro húmedo + bolsa fria	M1	0,8818	0,9060	0,8992
		0,8819	0,9054	0,9004
		0,8817	0,9047	0,8947
		0,8818	0,9054	0,8981
Masa del papel filtro seco + bolsa caliente	M2	0,8533	0,8763	0,8789
		0,8525	0,8749	0,8674
		0,8529	0,8752	0,8646
		0,8529	0,8755	0,8703
Masa bolsa caliente	Th	0,6725	0,6890	0,6815
		0,6790	0,6927	0,6903
		0,6800	0,6868	0,6813
		0,6772	0,6895	0,6844

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19: Cálculo contenido agua muestra 9% humedad Ensayo Papel Filtro

CÁLCULOS CONTENIDO DE AGUA 9%				
Muestra No.		1	2	3
Masa del papel filtro seco (M2-Th)	Mf	0,1757	0,1860	0,1859
Masa del agua en el papel filtro (M1-M2-Tc+Th)	Mw	0,0261	0,0298	0,0252
Contenido de agua del papel filtro (Mw/Mf)	Wf (%)	14,85	16,02	13,56

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20: Cálculo de Succión muestra 9% humedad Ensayo Papel Filtro

SUCCIÓN CALCULADA MUESTRA 9%				
Muestra No.		1	2	3
Succión (logkPa) ASTM	h	4,17	4,08	4,27
h=5.327-0.0779Wf h=2.412-0.0135Wf				
Punto de inflección	45,3	14784,27	11992,23	18663,80
Succión (logkPa) Chandler 1992	h	3,92	3,85	4,00
h=4.842-0.0622Wf h=6.050-2.48logWf				
Punto de inflección	47	8279,42	7006,48	9972,41
Succión (logkPa) Olivera	h	3,58	3,49	3,69
h=4.83-0.0839Wf h=2.57-0.0154Wf				
punto de inflección	33	3834,42	3060,55	4928,33
Succión Chandler 1986		4,93	4,85	5,01
h=5.85-0.0622w				
Punto de inflección		84338,78	71361,24	101586,74

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21: Datos obtenidos muestra 11% Ensayo Papel Filtro

DATOS MUESTRA 11%				
Muestra No.		1	2	3
Masa de la bolsa fria	Tc	0,6799	0,6788	0,6767
		0,6807	0,6772	0,6768
		0,681	0,677	0,6768
		0,6805	0,6777	0,6768
Masa del papel filtro húmedo + bolsa fria	M1	0,9028	0,9286	0,9166
		0,9054	0,9114	0,9049
		0,9095	0,9138	0,9039
		0,9059	0,9179	0,9085
Masa del papel filtro seco + bolsa caliente	M2	0,8695	0,8616	0,8646
		0,8639	0,8616	0,8699
		0,8649	0,8595	0,8625
		0,8661	0,8609	0,8657
Masa bolsa caliente	Th	0,6746	0,6720	0,6712
		0,6755	0,6714	0,6739
		0,6743	0,6756	0,6718
		0,6748	0,6730	0,6723

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22: Cálculo contenido de agua muestra 11% humedad Ensayo Papel Filtro

CÁLCULOS CONTENIDO DE AGUA 11%				
Muestra No.		1	2	3
Masa del papel filtro seco (M2-Th)	Mf	0,1913	0,1879	0,1934
Masa del agua en el papel filtro (M1-M2-Tc+Th)	Mw	0,0341	0,0523	0,0383
Contenido de agua del papel filtro (Mw/Mf)	Wf (%)	17,83	27,83	19,80

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23: Cálculo Succión muestra 11% humedad Ensayo Papel Filtro

SUCCIÓN CALCULADA MUESTRA 11%				
Muestra No.		1	2	3
Succión (logkPa) ASTM	h	3,94	3,16	3,78
$h=5.327-0.0779Wf$ $h=2.412-0.0135Wf$				
Punto de inflexión	45,3	8677,61	1441,12	6085,55
Succión (logkPa) Chandler 1992	h	3,73	3,11	3,61
$h=4.842-0.0622Wf$ $h=6.050-2.48\log Wf$				
Punto de inflexión	47	5411,28	1290,33	4075,68
Succión (logkPa) Olivera	h	3,33	2,49	3,17
$h=4.83-0.0839Wf$ $h=2.57-0.0154Wf$				
punto de inflexión	33	2159,73	312,39	1474,01
Succión Chandler 1986		4,74	4,12	4,62
$h=5.85-0.0622w$				
Punto de inflexión		55113,73	13144,02	41516,55

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: Datos tomados muestra 13% humedad Ensayo Papel Filtro

DATOS MUESTRA 13%					
Muestra No.		1	2	3	4
Masa de la bolsa fria	Tc	0,6765	0,6846	0,6648	0,6874
		0,6787	0,6855	0,665	0,6877
		0,6759	0,6841	0,6645	0,6884
		0,6770	0,6847	0,6648	0,6878
Masa del papel filtro húmedo + bolsa fria	M1	0,8956	0,8952	0,8846	0,9130
		0,8948	0,9116	0,8850	0,9218
		0,8936	0,8970	0,8735	0,9073
		0,8947	0,9013	0,8810	0,9140
Masa del papel filtro seco + bolsa caliente	M2	0,8541	0,857	0,8369	0,8647
		0,8536	0,8555	0,8369	0,8657
		0,8635	0,8559	0,8378	0,8652
		0,8571	0,8561	0,8372	0,8652
Masa bolsa caliente	Th	0,6745	0,6834	0,6627	0,6869
		0,6732	0,6827	0,664	0,6859
		0,6743	0,6812	0,6611	0,6831
		0,6740	0,6824	0,6626	0,6853

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25: Cálculo contenido de agua muestra 13% humedad Ensayo Papel Filtro

CÁLCULOS CONTENIDO DE AGUA 13%					
Muestra No.		1	2	3	4
Masa del papel filtro seco (M2-Th)	Mf	0,1831	0,1737	0,1746	0,1799
Masa del agua en el papel filtro (M1-M2-Tc+Th)	Mw	0,0346	0,0429	0,0416	0,0463
Contenido de agua del papel filtro (Mw/Mf)	Wf (%)	18,90	24,70	23,83	25,74

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26: Cálculo Succión muestra 13% humedad Ensayo Papel Filtro

SUCCIÓN CALCULADA MUESTRA 13%					
Muestra No.		1	2	3	4
Succión (logkPa) ASTM	h	3,85	3,40	3,47	3,32
h=5.327-0.0779Wf h=2.412-0.0135Wf					
Punto de inflección	45,3	7159,79	2529,30	2958,01	2099,42
Succión (logkPa) Chandler 1992	h	3,67	3,31	3,36	3,24
h=4.842-0.0622Wf h=6.050-2.48logWf					
Punto de inflección	47	4640,88	2022,09	2290,87	1742,61
Succión (logkPa) Olivera	h	3,24	2,76	2,83	2,67
h=4.83-0.0839Wf h=2.57-0.0154Wf					
punto de inflección	33	1756,31	572,66	677,64	468,49
Succión Chandler 1986		4,67	4,31	4,37	
h=5.85-0.0622w					
Punto de inflección		47273,79	20596,80	23336,18	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27: Datos tomados muestra 15.03% humedad Ensayo Papel Filtro

DATOS MUESTRA 15,03%				
Muestra No.		1	2	3
Masa de la bolsa fria	Tc	0,6698	0,6799	0,6677
		0,6638	0,6794	0,6679
		0,6634	0,6795	0,6674
		0,6657	0,6796	0,6677
Masa del papel filtro húmedo + bolsa fria	M1	0,8958	0,9217	0,8946
		0,8884	0,9074	0,8950
		0,8893	0,9079	0,8937
		0,8912	0,9123	0,8944
Masa del papel filtro seco + bolsa caliente	M2	0,8487	0,8595	0,8474
		0,8407	0,8546	0,8473
		0,8404	0,8541	0,8472
		0,8433	0,8561	0,8473
Masa bolsa caliente	Th	0,6646	0,6787	0,6665
		0,6655	0,6759	0,6632
		0,6643	0,6733	0,6639
		0,6648	0,6760	0,6645

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Cálculo contenido de agua muestra 15.03% humedad Ensayo Papel Filtro.

CÁLCULOS CONTENIDO DE AGUA 15,03%				
Muestra No.		1	2	3
Masa del papel filtro seco (M2-Th)	Mf	0,1785	0,1801	0,1828
Masa del agua en el papel filtro (M1-M2-Tc+Th)	Mw	0,0470	0,0526	0,0439
Contenido de agua del papel filtro (Mw/Mf)	Wf (%)	26,33	29,21	24,02

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29: Cálculo Succión muestra 15.03% humedad Ensayo Papel Filtro

SUCCIÓN CALCULADA MUESTRA 15,03%				
Muestra No.		1	2	3
Succión (logkPa) ASTM	h	3,28	3,05	3,46
h=5.327-0.0779Wf h=2.412-0.0135Wf				
Punto de inflección	45,3	1887,56	1126,94	2858,91
Succión (logkPa) Chandler 1992	h	3,20	3,03	3,35
h=4.842-0.0622Wf h=6.050-2.48logWf				
Punto de inflección	47	1600,29	1060,23	2229,46
Succión (logkPa) Olivera	h	2,62	2,38	2,82
h=4.83-0.0839Wf h=2.57-0.0154Wf				
punto de inflección	33	417,73	239,66	653,28
Succión Chandler 1986		4,21	4,03	4,36
h=5.85-0.0622w				
Punto de inflección		16302,00	10799,09	22711,58

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Datos tomados muestra 17% humedad Ensayo Papel Filtro

DATOS MUESTRA 17%				
Muestra No.		1	2	3
Masa de la bolsa fria	Tc	0,6763	0,6961	0,6833
		0,6787	0,6985	0,6836
		0,6776	0,6974	0,6837
		0,6775	0,6973	0,6835
Masa del papel filtro húmedo + bolsa fria	M1	0,9179	0,9114	0,9129
		0,916	0,9119	0,9127
		0,9068	0,9115	0,9129
		0,9136	0,9116	0,9128
Masa del papel filtro seco + bolsa caliente	M2	0,8643	0,8705	0,8665
		0,8598	0,8708	0,8676
		0,8604	0,8699	0,8665
		0,8615	0,8704	0,8669
Masa bolsa caliente	Th	0,6756	0,6943	0,6811
		0,6754	0,6934	0,6815
		0,6751	0,694	0,6819
		0,6754	0,6939	0,6815

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31: Cálculos Contenido de Agua muestra 17% humedad Ensayo Papel Filtro

CÁLCULOS CONTENIDO DE AGUA 17%				
Muestra No.		1	2	3
Masa del papel filtro seco (M2-Th)	Mf	0,1861	0,1765	0,1854
Masa del agua en el papel filtro (M1-M2-Tc+Th)	Mw	0,0500	0,0378	0,0439
Contenido de agua del papel filtro (Mw/Mf)	Wf (%)	26,87	21,42	23,68

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32: Succión calculada muestra 17% humedad Ensayo Papel Filtro

SUCCIÓN CALCULADA MUESTRA 17%				
Muestra No.		1	2	3
Succión (logkPa) ASTM	h	3,23	3,66	3,48
h=5.327-0.0779Wf h=2.412-0.0135Wf				
Punto de inflección	45,3	1713,96	4557,22	3036,69
Succión (logkPa) Chandler 1992	h	3,17	3,51	3,37
h=4.842-0.0622Wf h=6.050-2.48logWf				
Punto de inflección	47	1482,18	3235,19	2339,91
Succión (logkPa) Olivera	h	2,58	3,03	2,84
h=4.83-0.0839Wf h=2.57-0.0154Wf				
punto de inflección	33	376,53	1079,44	697,27
Succión Chandler 1986		4,18	4,52	4,38
h=5.85-0.0622w				
Punto de inflección		15095,78	32953,23	23833,91

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33: Datos tomados muestra 17% humedad Ensayo Papel Filtro

DATOS MUESTRA 19%				
Muestra No.		1	2	3
Masa de la bolsa fria	Tc	0,6630	0,6682	0,6733
		0,6629	0,6686	0,6735
		0,6651	0,6688	0,6735
		0,6637	0,6685	0,6734
Masa del papel filtro húmedo + bolsa fria	M1	0,8902	0,9092	0,9067
		0,8887	0,9095	0,9067
		0,8881	0,9087	0,9081
		0,8890	0,9091	0,9072
Masa del papel filtro seco + bolsa caliente	M2	0,8408	0,857	0,8685
		0,8411	0,8554	0,8667
		0,8406	0,8544	0,8681
		0,8408	0,8556	0,8678
Masa bolsa caliente	Th	0,6624	0,6676	0,6711
		0,6619	0,6669	0,6716
		0,6628	0,6675	0,6712
		0,6624	0,6673	0,6713

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34: Cálculos contenido de agua muestra 19% humedad Ensayo Papel Filtro

CÁLCULOS CONTENIDO DE AGUA 19%				
Muestra No.		1	2	3
Masa del papel filtro seco (M2-Th)	Mf	0,1784	0,1883	0,1965
Masa del agua en el papel filtro (M1-M2-Tc+Th)	Mw	0,0469	0,0523	0,0373
Contenido de agua del papel filtro (Mw/Mf)	Wf (%)	26,29	27,77	18,98

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35: Succión calculado muestra 19% humedad Ensayo Papel Filtro

SUCCIÓN CALCULADA MUESTRA 19%				
Muestra No.		1	2	3
Succión (logkPa) ASTM	h	3,28	3,16	3,85
h=5.327-0.0779Wf h=2.412-0.0135Wf				
Punto de inflección	45,3	1901,52	1456,46	7051,80
Succión (logkPa) Chandler 1992	h	3,21	3,11	3,66
h=4.842-0.0622Wf h=6.050-2.48logWf				
Punto de inflección	47	1609,90	1301,37	4584,58
Succión (logkPa) Olivera	h	2,62	2,50	3,24
h=4.83-0.0839Wf h=2.57-0.0154Wf				
punto de inflección	33	421,02	316,01	1727,43
Succión Chandler 1986		4,21	4,12	4,67
h=5.85-0.0622w				
Punto de inflección		16398,70	13255,79	46699,03

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36: Datos tomados muestra 21% humedad Ensayo Papel Filtro

DATOS MUESTRA 21%				
Muestra No.		1	2	3
Masa de la bolsa fria	Tc	0,6650	0,6727	0,6227
		0,6521	0,6732	0,6107
		0,6649	0,6636	0,62
		0,6607	0,6698	0,6178
Masa del papel filtro húmedo + bolsa fria	M1	0,8955	0,9152	0,8974
		0,8961	0,9107	0,8973
		0,8959	0,9069	0,8974
		0,8958	0,9109	0,8974
Masa del papel filtro seco + bolsa caliente	M2	0,8432	0,8554	0,8511
		0,8413	0,8567	0,8532
		0,8412	0,8561	0,8498
		0,8419	0,8561	0,8514
Masa bolsa caliente	Th	0,661	0,6701	0,619
		0,6604	0,6714	0,6178
		0,6597	0,6699	0,6186
		0,6604	0,6705	0,6185

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37: Cálculos contenido de agua muestra 21% humedad Ensayo Papel Filtro

CÁLCULOS CONTENIDO DE AGUA 21%				
Muestra No.		1	2	3
Masa del papel filtro seco (M2-Th)	Mf	0,1815	0,1856	0,2329
Masa del agua en el papel filtro (M1-M2-Tc+Th)	Mw	0,0536	0,0555	0,0467
Contenido de agua del papel filtro (Mw/Mf)	Wf (%)	29,53	29,90	20,05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38: Succión calculada muestra 21% humedad Ensayo Papel Filtro

SUCCIÓN CALCULADA MUESTRA 21%				
Muestra No.		1	2	3
Succión (logkPa) ASTM	h	3,03	3,00	3,77
h=5.327-0.0779Wf h=2.412-0.0135Wf				
Punto de inflección	45,3	1062,92	994,49	5821,03
Succión (logkPa) Chandler 1992	h	3,01	2,98	3,59
h=4.842-0.0622Wf h=6.050-2.48logWf				
Punto de inflección	47	1011,81	959,40	3933,69
Succión (logkPa) Olivera	h	2,35	2,32	3,15
h=4.83-0.0839Wf h=2.57-0.0154Wf				
punto de inflección	33	225,06	209,46	1405,08
Succión Chandler 1986		4,01	3,99	4,60
h=5.85-0.0622w				
Punto de inflección		10306,93	9773,10	40067,77

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39: Resumen de Resultados Succión

Nombre de la muestra	9%			Prom	11%			Prom	13%				Prom	15,03%			Prom	17%			Prom	19%			Prom	21%			Prom
% Humedad al moldeo	8,12				9,86				12,27					13,91				15,53				17,59				19,56			
Contenido de agua del papel filtro (Mw/Mf)	14,85	16,02	13,56	14,81	17,83	27,83	19,80	22,83	18,90	24,70	23,83	25,74	24,75	26,33	29,21	24,02	25,17	26,87	21,42	23,68	23,99	26,29	27,77	18,98	27,03	29,53	29,90	20,05	29,72
Succión (logkPa) ASTM	4,17	4,08	4,27	4,17	3,94	3,16	3,78	3,55	3,85	3,40	3,47	3,32	3,40	3,28	3,05	3,46	3,37	3,23	3,66	3,48	3,46	3,28	3,16	3,85	3,22	3,03	3,00	3,77	3,01
Succión (logkPa) Chandler 1992	3,92	3,85	4,00	3,92	3,73	3,11	3,61	3,42	3,67	3,31	3,36	3,24	3,30	3,20	3,03	3,35	3,28	3,17	3,51	3,37	3,35	3,21	3,11	3,66	3,16	3,01	2,98	3,59	2,99
Succión (logkPa) Olivera	3,58	3,49	3,69	3,59	3,33	2,49	3,17	2,91	3,24	2,76	2,83	2,67	2,75	2,62	2,38	2,82	2,72	2,58	3,03	2,84	2,82	2,62	2,50	3,24	2,56	2,35	2,32	3,15	2,34

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5: DEFORMACIÓN POR HUMECTACIÓN

5.1. Definición de colapso

Uno de los desafíos más grandes y preocupaciones de estabilidad de la ingeniería civil en el uso de rellenos compactados y la construcción de taludes, es el potencial de colapso al aumentar la saturación cuando estos se humedecen y se encuentren sometidos a cargas. La estructura que tiene un suelo compactado va a depender de factores como su humedad, densidad y porcentaje de arcilla existente (Sm & Revanasiddappa, 2018).

La succión matricial, al mantener unidas a las partículas en suelos parcialmente saturados, aporta significativamente a la estabilidad estructural, es decir la resistencia de un suelo es mucho mayor cuando existe succión. De esta manera, al adicionar agua los enlaces capilares se debilitan generando un desprendimiento de partículas, se produce una falla por corte y esto provoca una reducción del volumen total (Sm & Revanasiddappa, 2018).

Al hablar de suelos parcialmente saturados, uno de sus fenómenos más característicos es la variación de volumen producida al modificar el grado de saturación. Cuando estas deformaciones volumétricas son positivas, se produce colapso y cuando estas son negativas se da un hinchamiento (Barrera Bucio, 2002).

De esta manera, tanto un colapso como un hinchamiento son inestabilidades estructurales producidas por cambios climáticos que afectan a su humedad, estas variaciones generan discontinuidades deformacionales sin que se haya modificado su estado tensional exterior, en otras palabras, no es necesario que

exista un aumento de carga para que se produzca dicho colapso (Barrera Bucio, 2002).

Según varios autores en los que se puede nombrar principalmente a (Dudley, 1970), Jimenez Salas, Justo, Romana, & Faraco (1973) y Maswoswe (1985), para que un suelo sea colapsable debe tener las siguientes características.

Lo primero es que debe estar no saturado ya que el incremento de agua es lo que generalmente produce un colapso. Debe estar bajo un estado tensional de cargas que sea considerable lo que genera una estabilidad relativa al no tomar en cuenta la succión. Por último, es necesaria la existencia de una unión entre partículas que al ser sometida a la presencia de agua pueda debilitarse o romperse.

Los suelos que tienen contenido de arcilla de baja plasticidad pueden llegar a tener procesos tanto de hinchamiento como de colapso al estar sometido a una saturación total. La variación de volumen está compuesta por dos efectos la relajación de la tensión entre partículas que producen una expansión y la separación total de las partículas generando colapso. Una deformación por hinchamiento generalmente es elástica, mientras que una por colapso, al existir una ruptura de las partículas, es irreversible (Barrera Bucio, 2002).

5.2. Determinación del índice de colapso

El procedimiento para la determinación del índice de colapso de un suelo está descrito en la norma ASTM D4546-14: Hinchamiento unidimensional o colapso del suelo.

Se va a utilizar el método B de la norma tomando en cuenta que se va a obtener un espécimen de cada una de las muestras ya moldeadas para un contenido de humedad específico.

Para la preparación de la muestra se debe tallar una porción de suelo de diámetro de 50 mm y altura de 20 mm. Se inserta la muestra en el anillo de consolidación, es importante que este encaje perfectamente para que no se produzcan espacios perimetrales. Posteriormente es importante recortar el espécimen al ras tomando como referencia los extremos del anillo.

Figura 19: Muestra en el anillo para colapso



Fuente: Elaboración propia

Se debe determinar la masa húmeda, la altura y el volumen, iniciales del espécimen. Una vez preparada la muestra hay que asegurar que el consolidómetro sea montado de tal manera que no exista ningún cambio en el contenido de agua o en la hinchazón de la muestra.

La muestra es sometida a incrementos de las cargas axiales totales en este caso de 1 kPa, 50 kPa y 800 kPa. Se utiliza una carga axial de 800 kPa, tomando como referencia el diseño de una columna para una casa de 3 pisos en Ecuador

de la publicación *Diseño de columnas de hormigón armado en zonas sísmicas* de Sánchez y Cevallos (2015), en el cual se presenta una carga última P_u de 124 toneladas, repartidas en una cimentación de aproximadamente 1,2x1,2 metros, con lo cual se puede estimar una carga axial aproximada de 800 kPa.

En cada incremento de carga, antes del cambio, se debe esperar a que se estabilice el suelo por 30 a 60 minutos y al haber utilizado un deformímetro electrónico, las lecturas se registran en la máquina automáticamente.

Después de la última lectura se debe agregar agua hasta que la muestra quede inundada, enseguida se debe comenzar a registrar lecturas en los siguientes tiempos: 30 segundos; 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos y 1, 2, 4, 8, 24 horas.

Para finalizar, se retira la muestra y el anillo del consolidómetro, se coloca dentro del horno y se determina su masa seca para posteriormente obtener un valor de humedad.

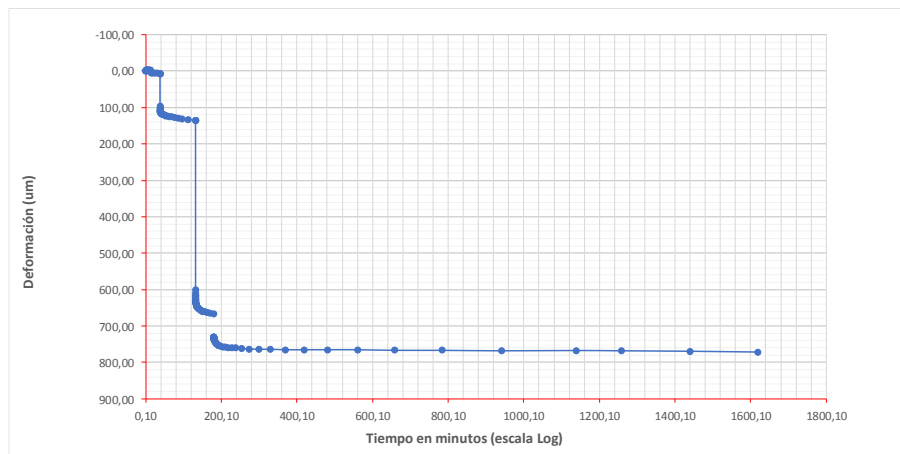
Las tablas siguientes muestran el valor de humedad que tenía el suelo a la hora de la realización del tallado en el anillo, así como el valor de porcentaje de colapso correspondiente a cada muestra.

Tabla 40: Resultados del colapso para 9% de humedad

NOMBRE DE LA MUESTRA	9%
Altura inicial del espécimen (H)	18.69 mm
Compresión del espécimen después de aplicado la carga (ΔH_1)	0.668 mm
Altura del espécimen antes de ser saturada (H_1)	18.02 mm
Cambio de altura en la expansión causado por saturación (ΔH_2)	0.104 mm
Altura final del espécimen después de ser saturada (H_2)	17.92 mm
PORCENTAJE DE HUMEDAD REAL (%)	7.52
PORCENTAJE DE COLAPSO (%)	0.58

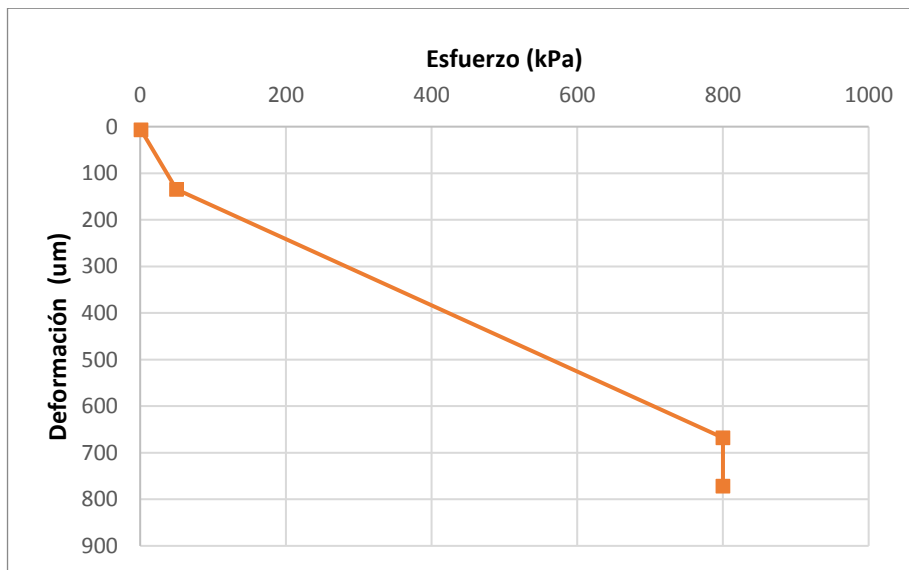
Fuente: Elaboración propia

Figura 20: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 9% humedad



Fuente: Laboratorio de suelos y resistencia de materiales PUCE

Figura 21: Esfuerzo Vs Deformación 9%



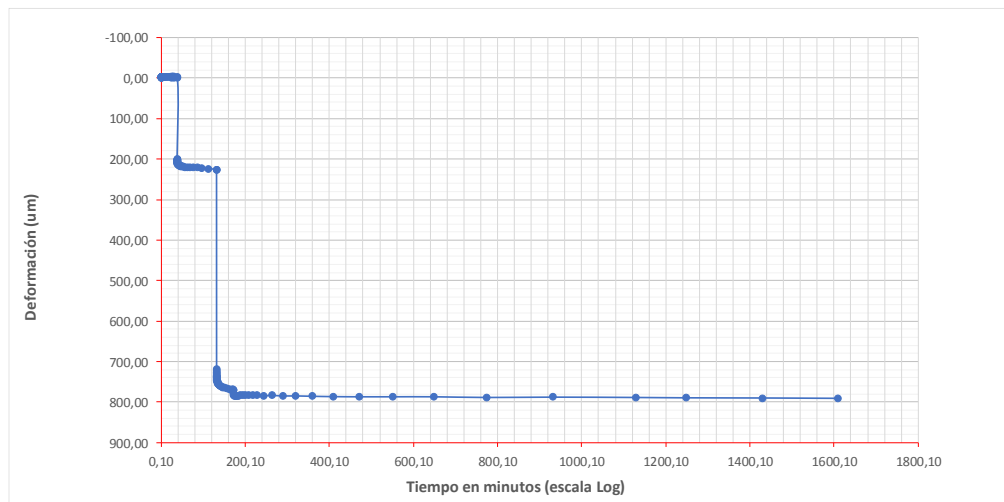
Fuente: Elaboración propia

Tabla 41: Resultados del colapso para 11% de humedad

NOMBRE DE LA MUESTRA	11%
Altura inicial del espécimen (H)	18.69 mm
Compresión del espécimen después de aplicado la carga (ΔH_1)	0.769 mm
Altura del espécimen antes de ser saturada (H_1)	17.92 mm
Cambio de altura en la expansión causado por saturación (ΔH_2)	0.022 mm
Altura final del espécimen después de ser saturada (H_2)	17.90 mm
PORCENTAJE DE HUMEDAD REAL (%)	9.75
PORCENTAJE DE COLAPSO (%)	0.12

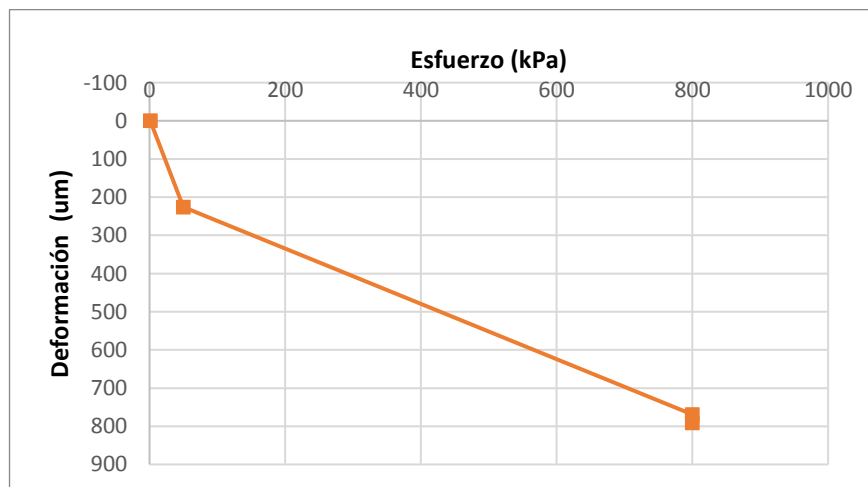
Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 11% humedad



Fuente: Laboratorio de suelos y resistencia de materiales PUCE

Figura 23: Esfuerzo Vs Deformación 11%



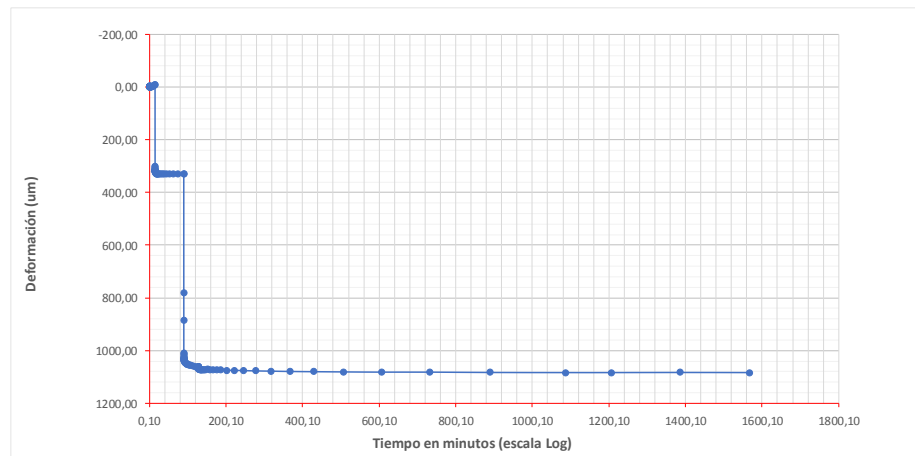
Fuente: Elaboración propia

Tabla 43: Resultados del colapso para 15.03% de humedad

NOMBRE DE LA MUESTRA	15.03%
Altura inicial del espécimen (H)	18.69 mm
Compresión del espécimen después de aplicado la carga (ΔH_1)	0.711 mm
Altura del espécimen antes de ser saturada (H_1)	17.98 mm
Cambio de altura en la expansión causado por saturación (ΔH_2)	0.022 mm
Altura final del espécimen después de ser saturada (H_2)	17.96 mm
PORCENTAJE DE HUMEDAD REAL (%)	12.48
PORCENTAJE DE COLAPSO (%)	0.12

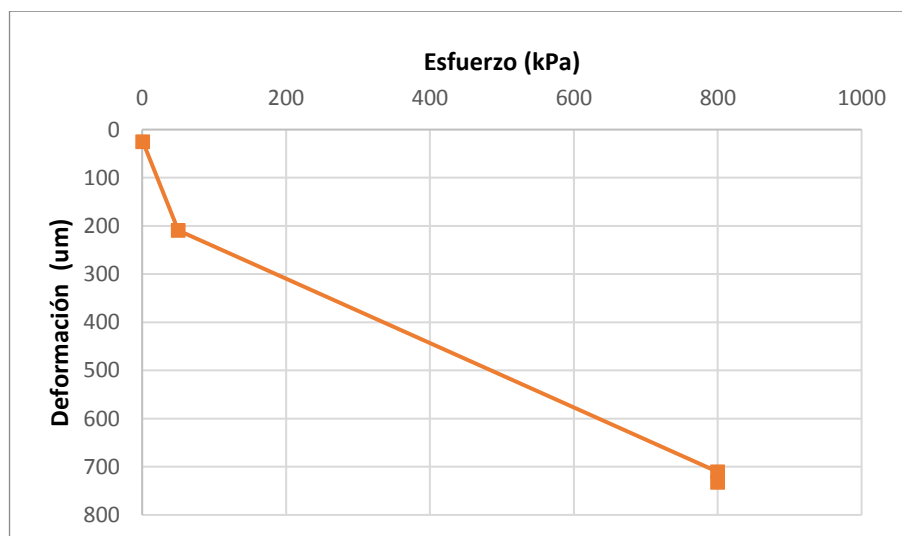
Fuente: Elaboración propia

Figura 26: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 15.03% humedad



Fuente: Laboratorio de suelos y resistencia de materiales PUCE

Figura 27: Esfuerzo Vs Deformación 15.03%



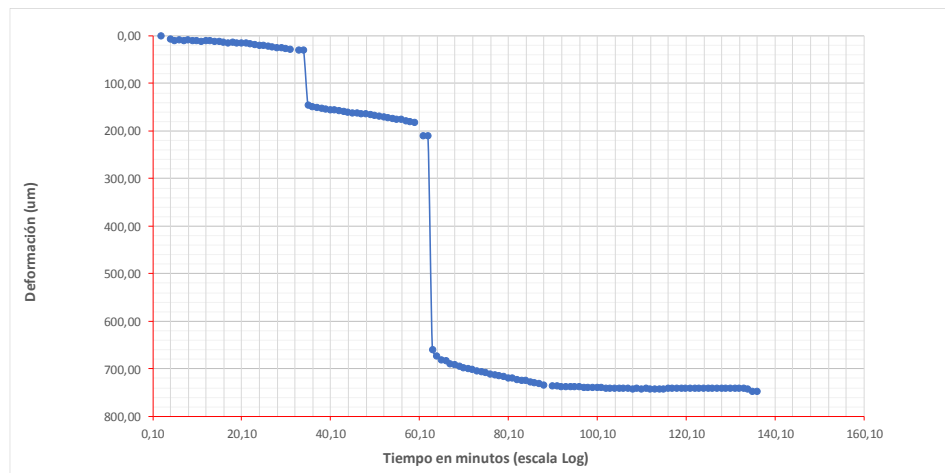
Fuente: Elaboración propia

Tabla 44: Resultados del colapso para 17% de humedad

NOMBRE DE LA MUESTRA	17%
Altura inicial del espécimen (H)	18.69 mm
Compresión del espécimen después de aplicado la carga (ΔH_1)	0.734 mm
Altura del espécimen antes de ser saturada (H_1)	17.96 mm
Cambio de altura en la expansión causado por saturación (ΔH_2)	0.014 mm
Altura final del espécimen después de ser saturada (H_2)	17.94 mm
PORCENTAJE DE HUMEDAD REAL (%)	13.65
PORCENTAJE DE COLAPSO (%)	0.08

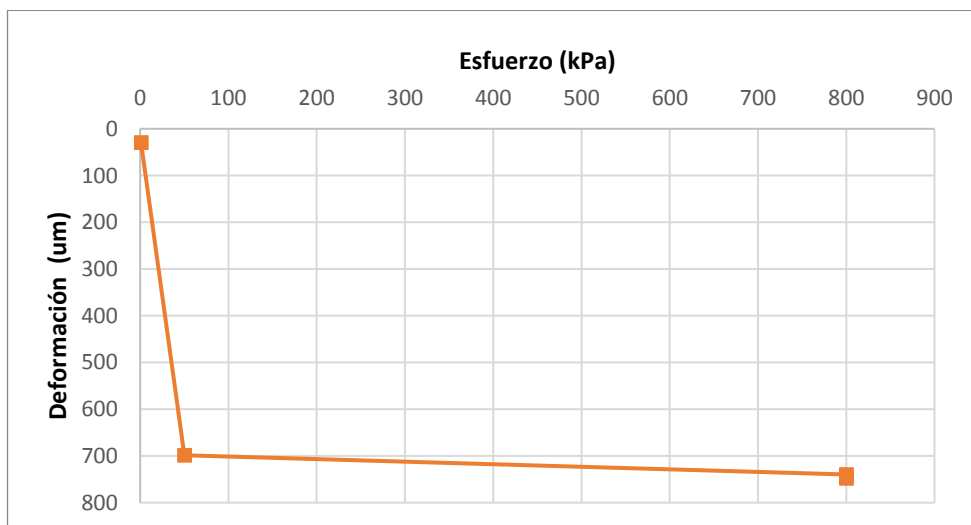
Fuente: Elaboración propia

Figura 28: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 17% humedad



Fuente: Laboratorio de suelos y resistencia de materiales PUCE

Figura 29: Esfuerzo Vs Deformación 17%



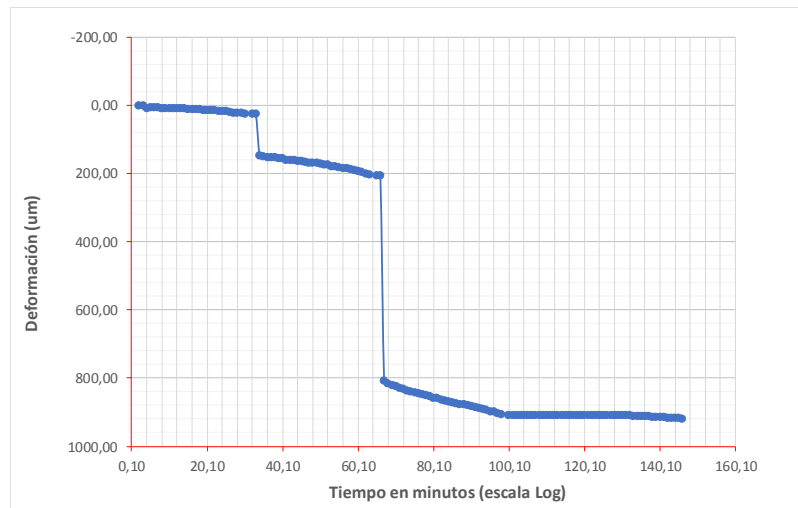
Fuente: Elaboración propia

Tabla 45: Resultados del colapso para 19% de humedad

NOMBRE DE LA MUESTRA	19%
Altura inicial del espécimen (H)	18.62 mm
Compresión del espécimen después de aplicado la carga (ΔH_1)	0.993 mm
Altura del espécimen antes de ser saturada (H_1)	17.63 mm
Cambio de altura en la expansión causado por saturación (ΔH_2)	0.015 mm
Altura final del espécimen después de ser saturada (H_2)	17.61 mm
PORCENTAJE DE HUMEDAD REAL (%)	15.87
PORCENTAJE DE COLAPSO (%)	0.09

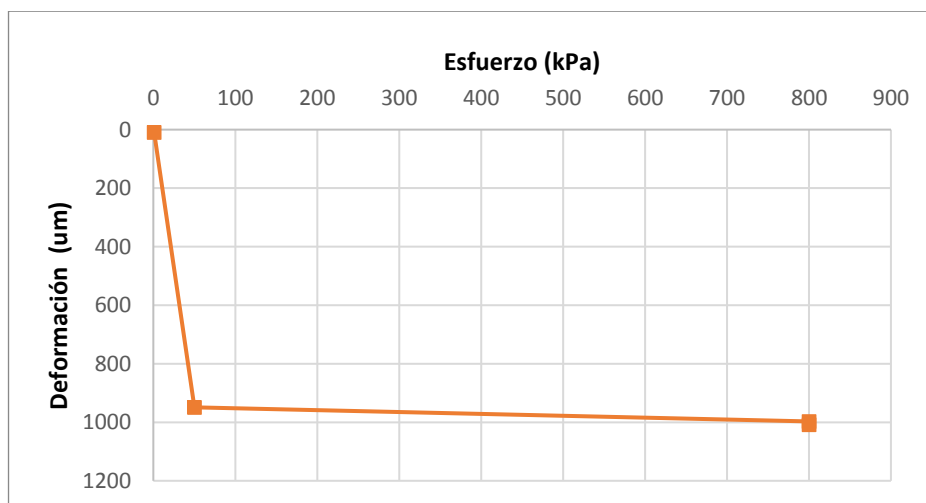
Fuente: Elaboración propia

Figura 30: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 19% humedad



Fuente: Laboratorio de suelos y resistencia de materiales PUCE

Figura 31: Esfuerzo Vs Deformación 19%



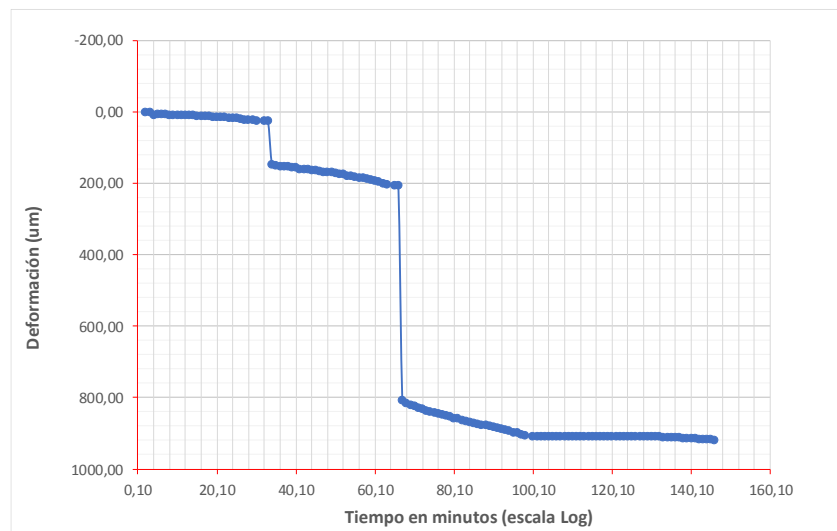
Fuente: Elaboración propia

Tabla 46: Resultados del colapso para 21% de humedad

NOMBRE DE LA MUESTRA	21%
Altura inicial del espécimen (H)	18.69 mm
Compresión del espécimen después de aplicado la carga (ΔH_1)	0.906 mm
Altura del espécimen antes de ser saturada (H_1)	17.78 mm
Cambio de altura en la expansión causado por saturación (ΔH_2)	0.013 mm
Altura final del espécimen después de ser saturada (H_2)	17.77 mm
PORCENTAJE DE HUMEDAD REAL (%)	18.03
PORCENTAJE DE COLAPSO (%)	0.07

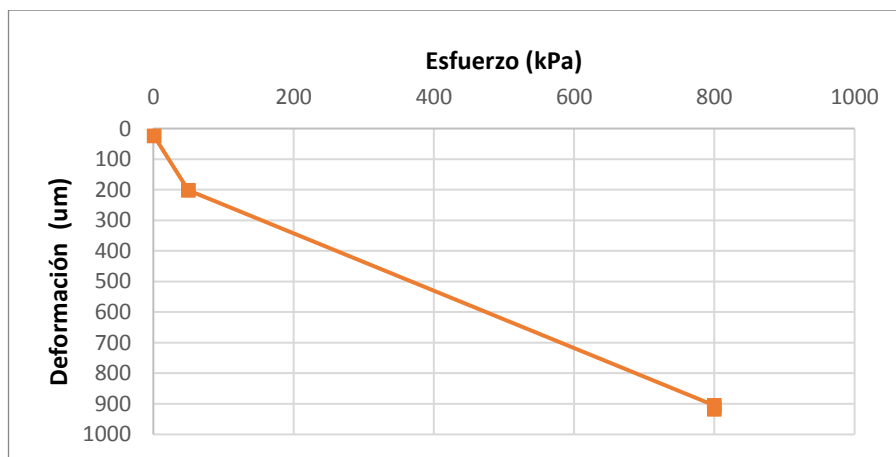
Fuente: Elaboración propia

Figura 32: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 21% humedad



Fuente: Laboratorio de suelos y resistencia de materiales PUCE

Figura 33: Esfuerzo Vs Deformación 21%



Fuente: Elaboración propia

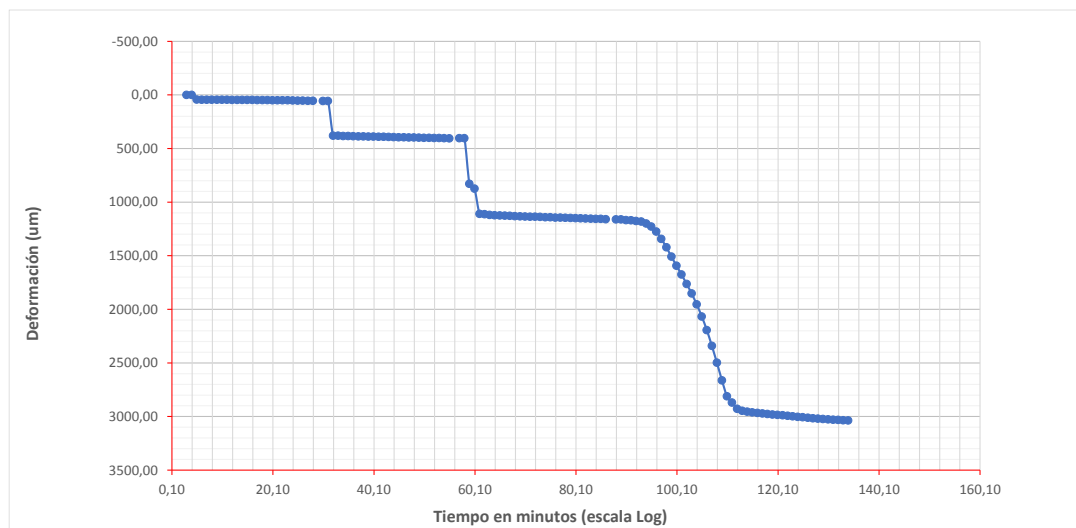
Debido a los resultados obtenidos y mediante la realización de una curva característica de los resultados se pudo determinar que con humedades menores el índice de colapso va a aumentar significativamente por lo que se decidió ensayar dos muestras más, una con una humedad teórica de 0% y humedad real de 0,4% y la otra con una humedad teórica de 4% y humedad real de 3,64%, a continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 47: Resultados del colapso para 0% de humedad

NOMBRE DE LA MUESTRA	0%
Altura inicial del espécimen (H)	18,62 mm
Compresión del espécimen después de aplicado la carga (ΔH_1)	1,159 mm
Altura del espécimen antes de ser saturada (H_1)	17,46 mm
Cambio de altura en la expansión causado por saturación (ΔH_2)	1,877 mm
Altura final del espécimen después de ser saturada (H_2)	15,58 mm
PORCENTAJE DE HUMEDAD REAL (%)	0,40
PORCENTAJE DE COLAPSO (%)	10,75

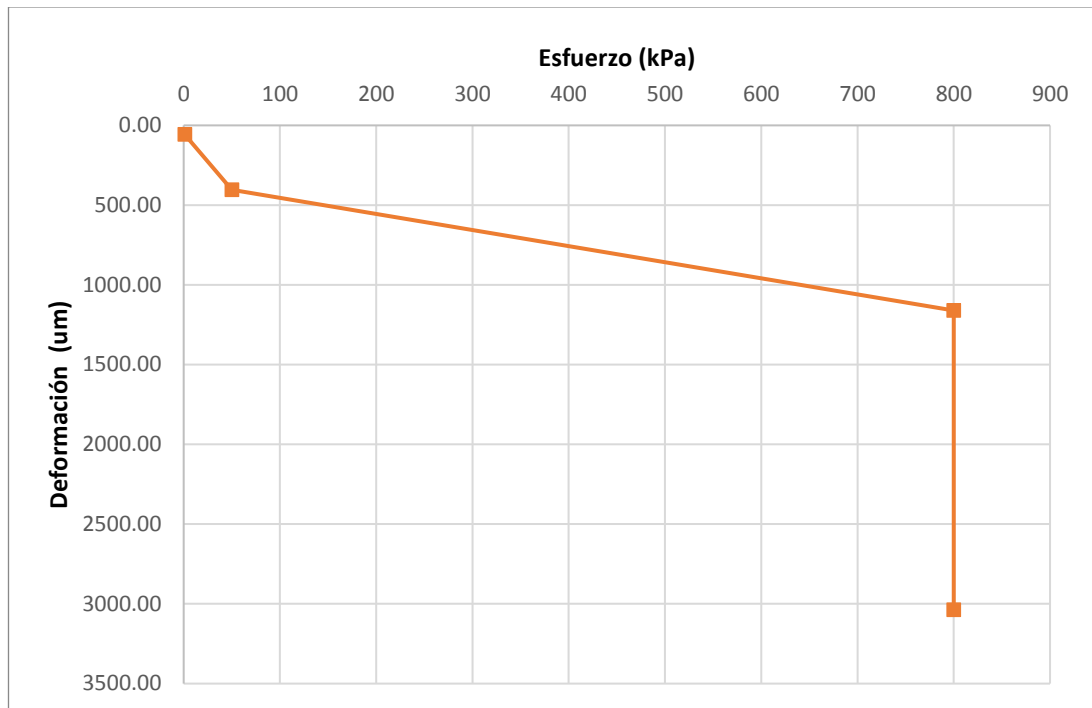
Fuente: Elaboración propia

Figura 34: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 0% humedad



Fuente: Laboratorio de suelos y resistencia de materiales PUCE

Figura 35: Esfuerzo Vs Deformación 0%



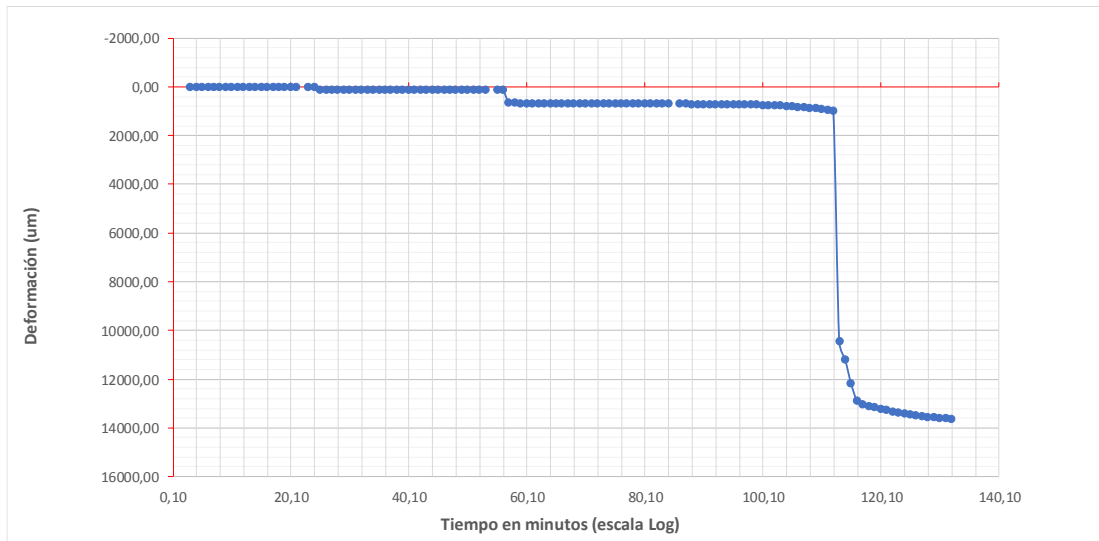
Fuente: Elaboración propia

Tabla 48: Resultados del colapso para 4% de humedad

NOMBRE DE LA MUESTRA	4%
Altura inicial del espécimen (H)	18,37 mm
Compresión del espécimen después de aplicado la carga (ΔH_1)	0,696 mm
Altura del espécimen antes de ser saturada (H_1)	17,67 mm
Cambio de altura en la expansión causado por saturación (ΔH_2)	0,665 mm
Altura final del espécimen después de ser saturada (H_2)	17,01 mm
PORCENTAJE DE HUMEDAD REAL (%)	3,64
PORCENTAJE DE COLAPSO (%)	3,76

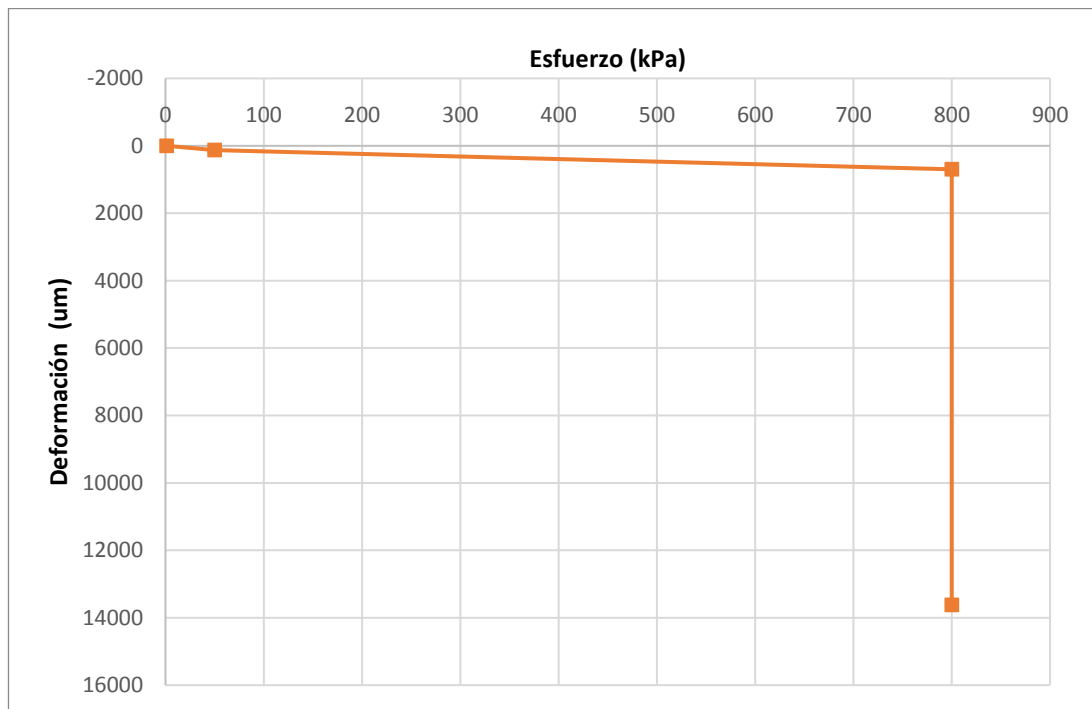
Fuente: Elaboración propia

Figura 36: Gráfica deformación vs tiempo en minutos Muestra 4% humedad



Fuente: Laboratorio de suelos y resistencia de materiales PUCE

Figura 37: Esfuerzo Vs Deformación 4%



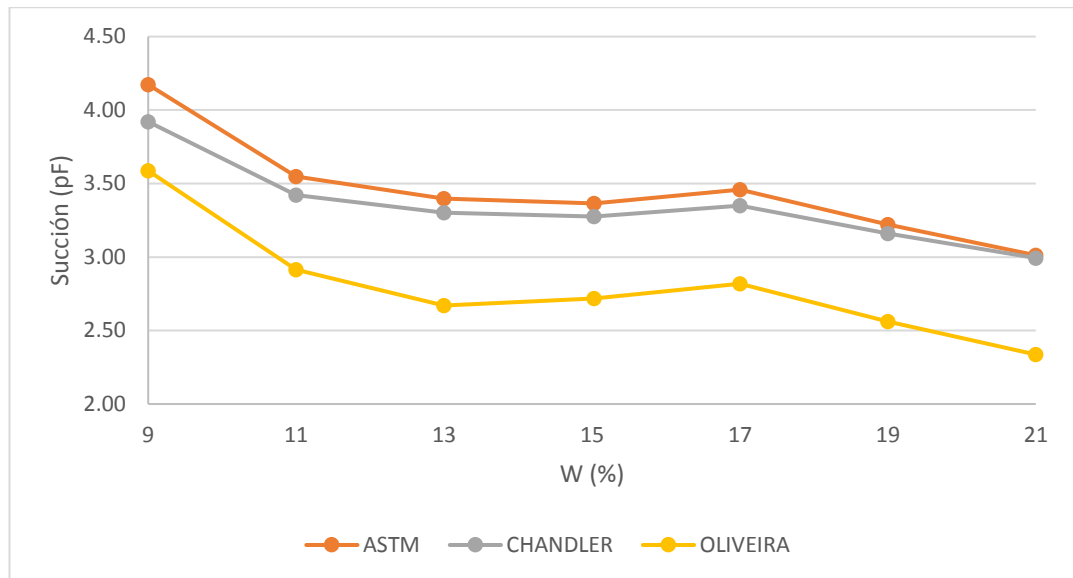
Fuente: Elaboración propia

Debido a la magnitud de los valores obtenidos además de las condiciones de la muestra al ser esta remodelada se puede considerar que no existe en si un colapso si no una deformación por humectación.

CAPÍTULO 6: CORRELACIONES

6.1. Correlación entre la humedad y succión matricial.

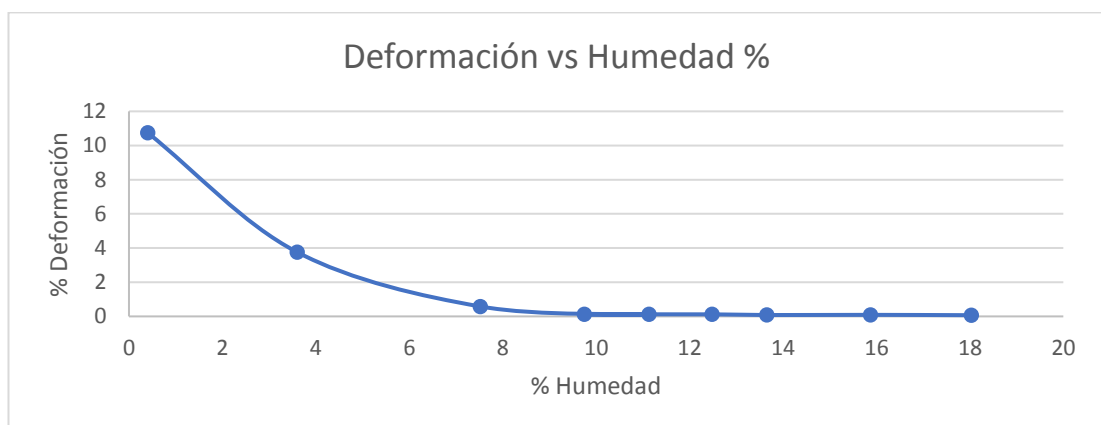
Figura 38: Curva SWCC para diferentes autores



Fuente: Elaboración propia

6.2. Deformación y humedad.

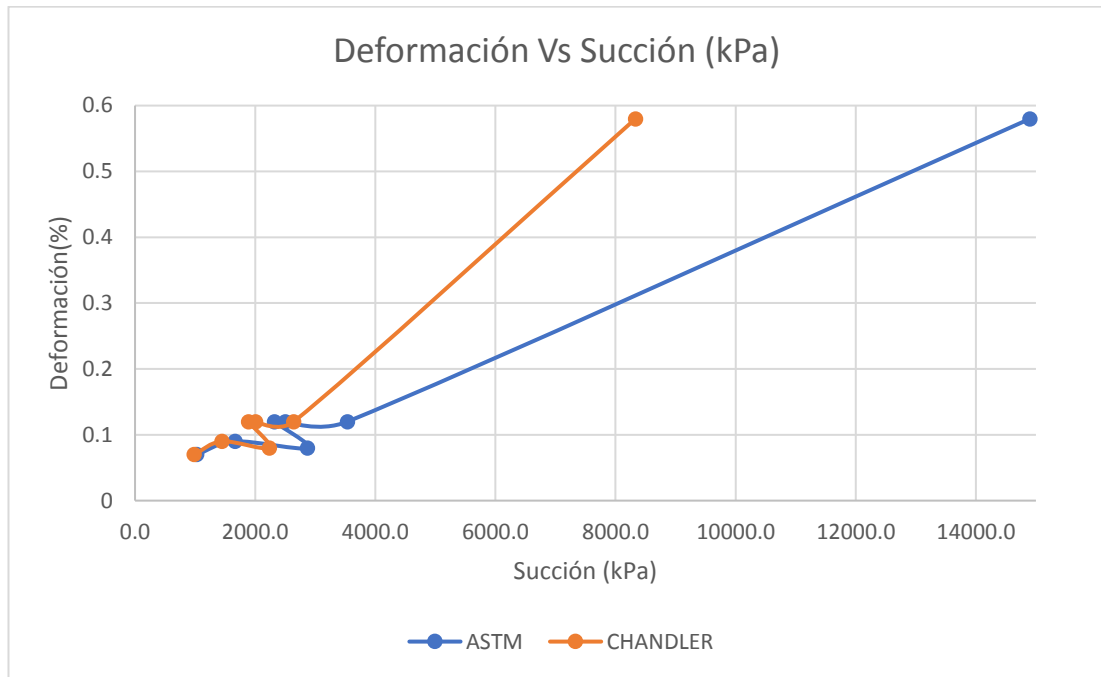
Figura 39: Relación entre la Deformación y la Humedad



Fuente: Elaboración propia

6.3. Deformación y succión matricial

Figura 40: Relación entre la deformación y la Succión en kPa



Fuente: Elaboración propia

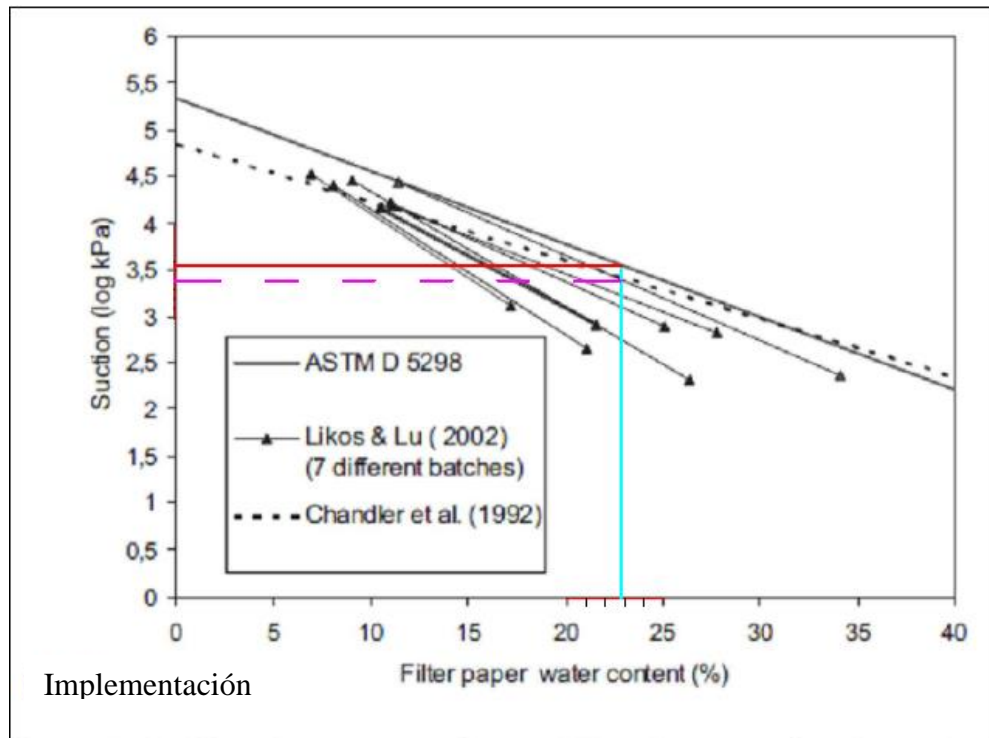
CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN

Luego de analizados e interpretados los resultados obtenidos, es necesario la validación de estos según la bibliografía existente. Se contemplaron curvas y tablas relacionadas con la succión, su calibración, características del suelo y su relación con la deformación.

Bicalho, Correia, Ferreira, Fleureau, & Marinho (2006) en su artículo *Filter paper method of soil suction measurement*, realizan una gráfica comparativa de las curvas de calibración de la norma ASTM D5298 y Chandler et al 1992, las mismas que fueron utilizadas en la presente disertación y servirán de comprobación. Como se muestra en la figura siguiente se comprobó que los resultados obtenidos durante la implementación del ensayo están cercanos a los propuestos por el artículo.

El valor de la succión según la norma ASTM D5298-16 y Chandler, Crilly, & Montgomery-Smith (1992), para la calibración, es de $pF=3.52$ y $pF=3.40$, respectivamente. A estos le corresponde una humedad calculada en el papel filtro de 23.19%. La figura expresa que, el contenido de humedad para el papel, teniendo en cuenta los valores de succión, es de aproximadamente 22.90%, el cual es un valor muy cercano al obtenido y valida la precisión de la calibración.

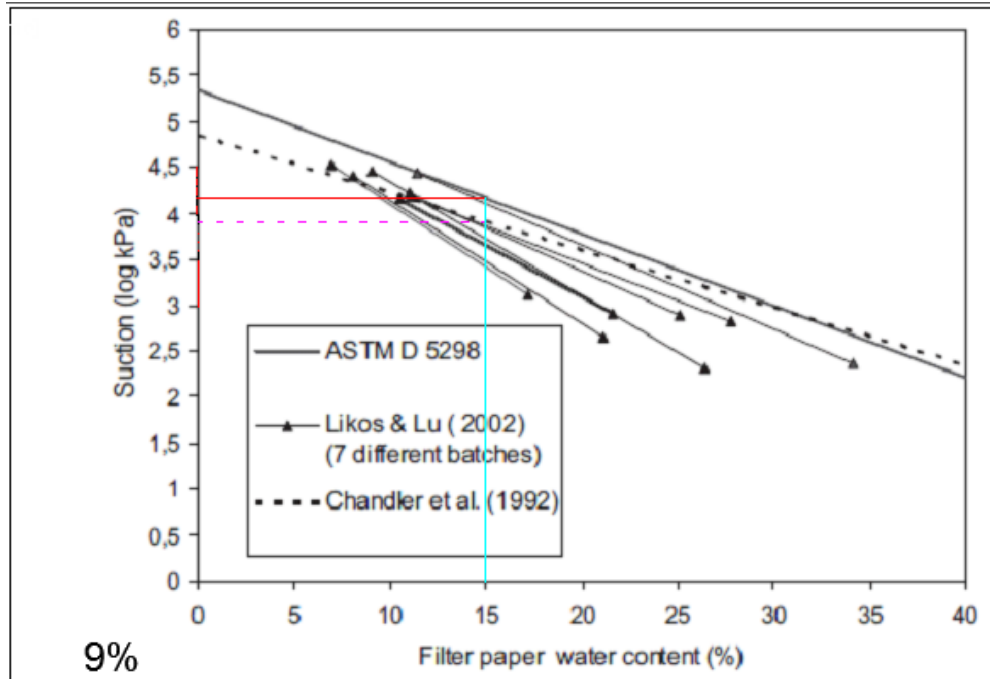
Figura 41: Comprobación Implementación según Bicalho et al. (2006)



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente se colocaron en la misma gráfica de la figura anterior los valores de succión correspondientes a cada humedad y así comprobar que los resultados obtenidos sean confiables.

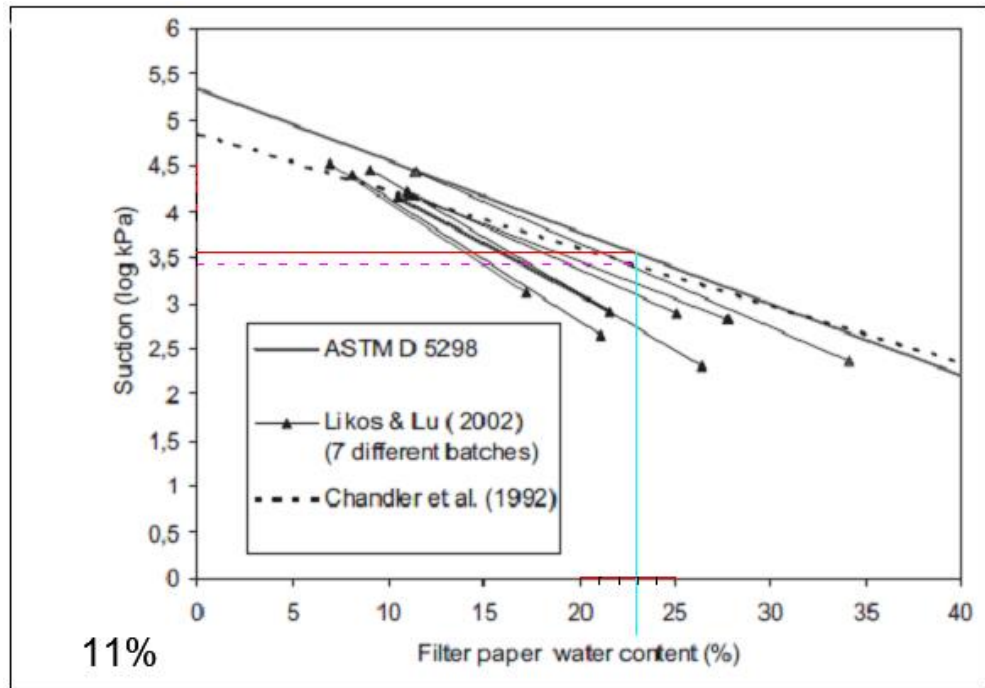
Figura 42: Valores de succión para 9% de humedad en Bicalho et al. (2006)



Fuente: Elaboración propia

Según la figura, para succiones de 3.9 y 4.2 aproximadamente, la humedad en el papel filtro es de 15%. Mientras que el valor real obtenido con el ensayo fue de 14.91%, lo que valida el resultado obtenido.

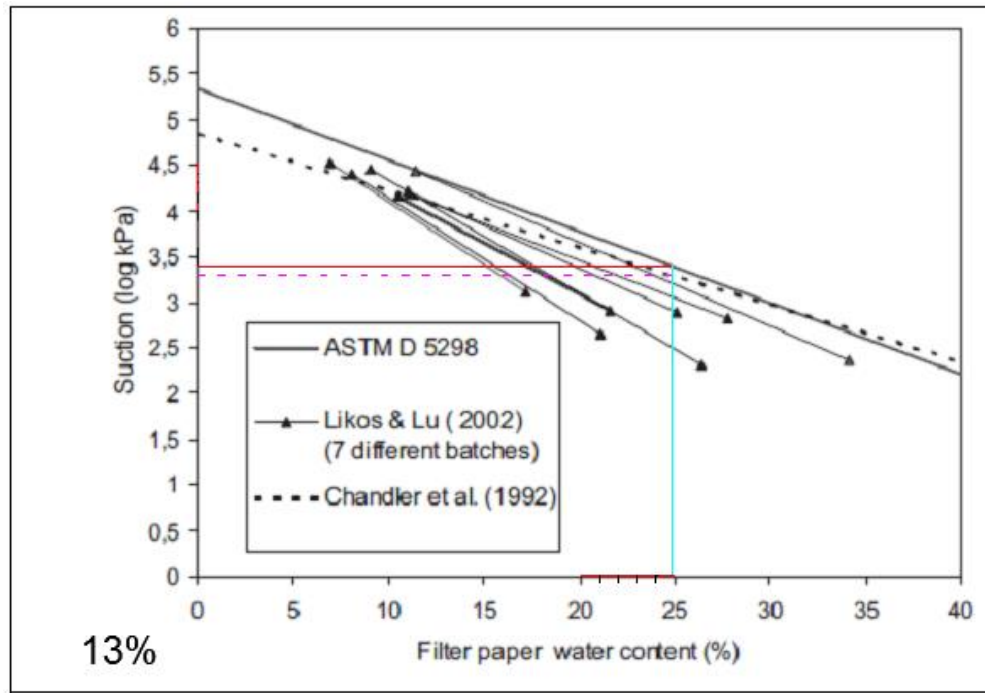
Figura 43: Valores de succión para 11% de humedad en Bicalho et al. (2006)



Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa que para succiones de 3.4 y 3.55, la humedad de acuerdo con Bicalho et al. (2006), es de 23%. En el ensayo se obtuvo una humedad de 22.83%, valor muy cercano al del autor.

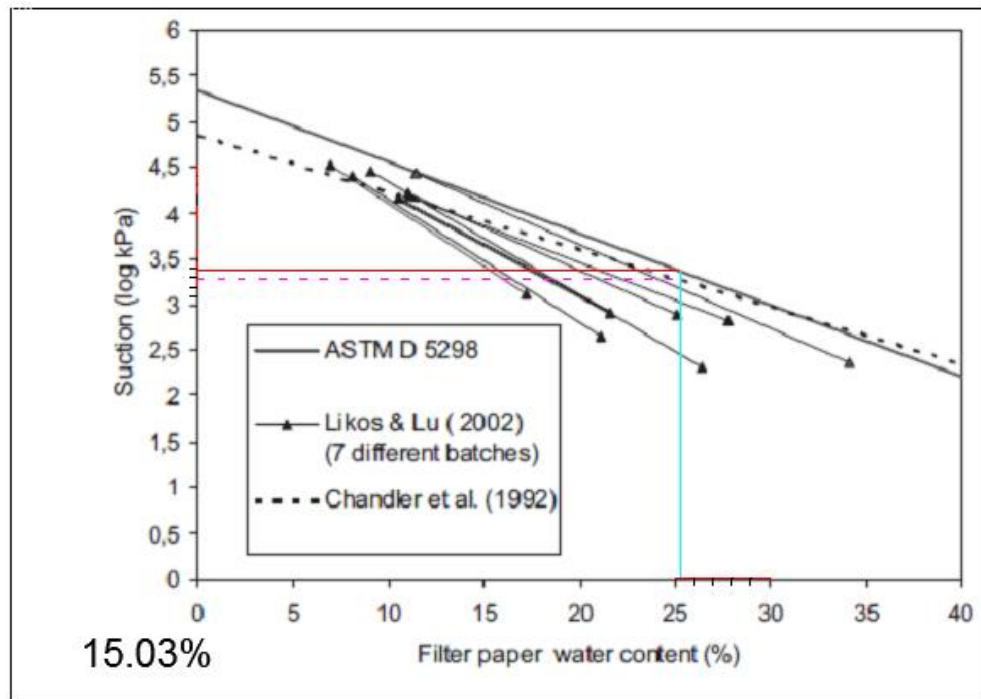
Figura 44: Valores de succión para 13% de humedad en Bicalho et al. (2006)



Fuente: Elaboración propia

Para succiones de 3.3 y 3.4, como se muestra en la figura, el valor de humedad es aproximadamente de 25%. En el ensayo se obtuvo una humedad de 24.75%. una vez más el valor queda comprobado.

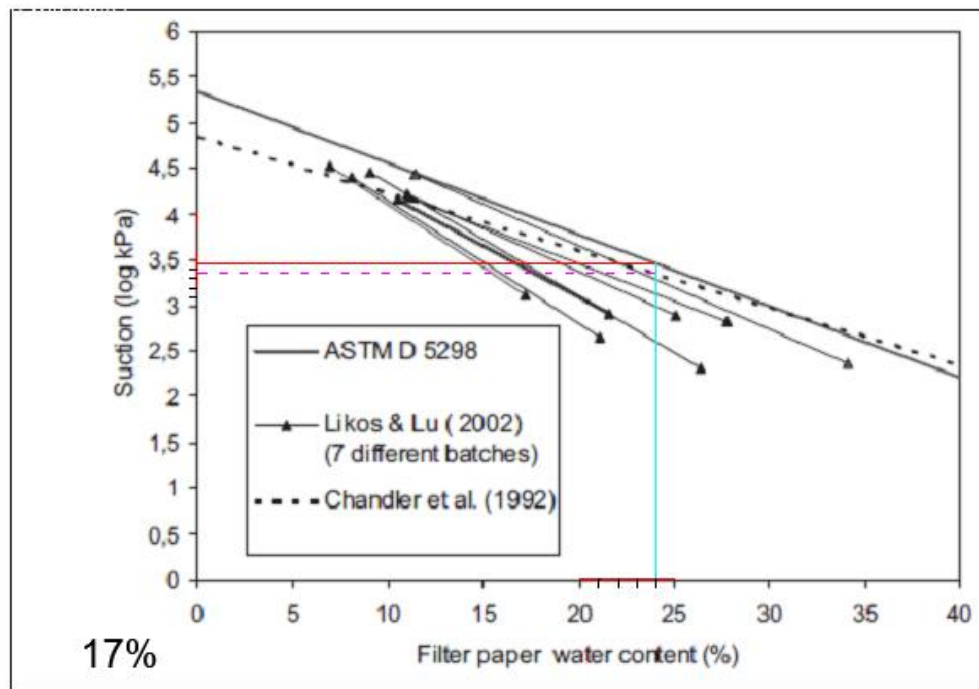
Figura 45: Valores de succión para 15.03% de humedad en Bicalho et al. (2006)



Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa que para succiones de 3.2 y 3.3, la humedad es de 25.1%. En el ensayo se obtuvo una humedad de 25.17%. Siendo los valores precisos.

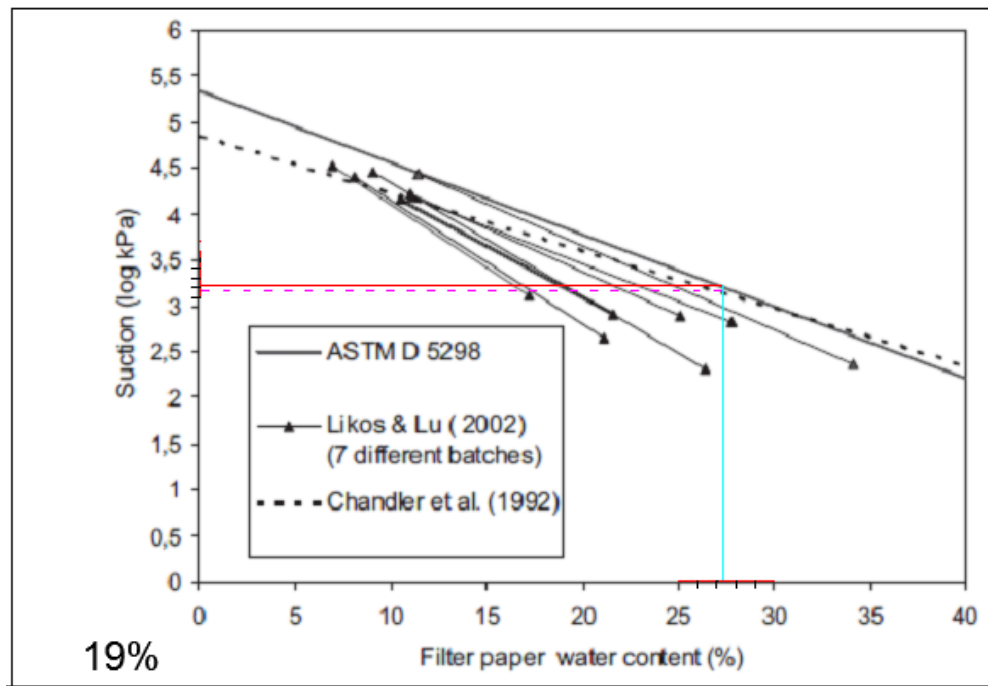
Figura 46: Valores de succión para 17% de humedad en Bicalho et al. (2006)



Fuente: Elaboración propia

Según Bicalho et al. (2006) una humedad de 24% corresponde a valores de succión de 3.4 y 3.5. En el ensayo se obtuvo una humedad de 23.99%, valor muy cercano al del autor.

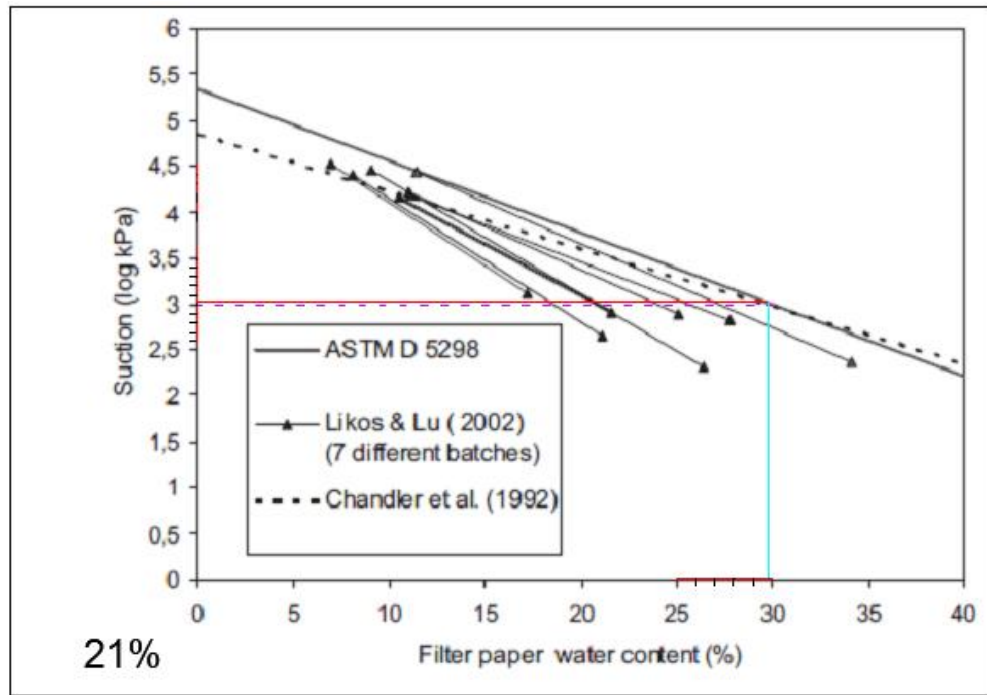
Figura 47: Valores de succión para 19% de humedad en Bicalho et al. (2006)



Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa que para succiones de 3.1 y 3.2, la humedad de acuerdo con Bicalho et al. (2006), es de 27.2%. En el ensayo se obtuvo una humedad de 27.03%.

Figura 48: Valores de succión para 21% de humedad en Bicalho et al. (2006)



Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa que para succiones de 3.0 y 3.1, la humedad de acuerdo con Bicalho et al. (2006), es de 29.9%. En el ensayo se obtuvo una humedad de 29.72%, valor muy cercano al del autor.

Analizando la matriz de succión del suelo, se tiene que Fredlund, Rahardjo, & Fredlund (2012) en su libro *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice* afirma que esta aumenta a medida que el contenido de humedad disminuye. Aspecto que la investigación demuestra mediante los resultados obtenidos ya que para una humedad de 9% el valor de la succión es 4.17, mientras que para una humedad de 21% el valor de succión es $pF=3.01$, tomando en cuenta la curva de calibración de la norma ASTM D5298-16: Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper como se evidencia en la figura 29.

Los mismos autores más adelante exponen que para limos arenosos la densidad debe estar entre 1394 a 2034 kg/m³ según la Figura 40. El suelo en estudio cumple con este rango ya que su densidad máxima seca es de 1826 kg/m³. Por lo que las curvas propuestas por el autor pueden ser utilizadas como referencia y validación de los resultados obtenidos, como es el caso de la Figura 41 en la que es evidente que la mayoría de los puntos están dentro de los rangos encontrados para los autores utilizados.

Figura 49: Valores típicos de valores de porosidad, vacíos y densidad seca

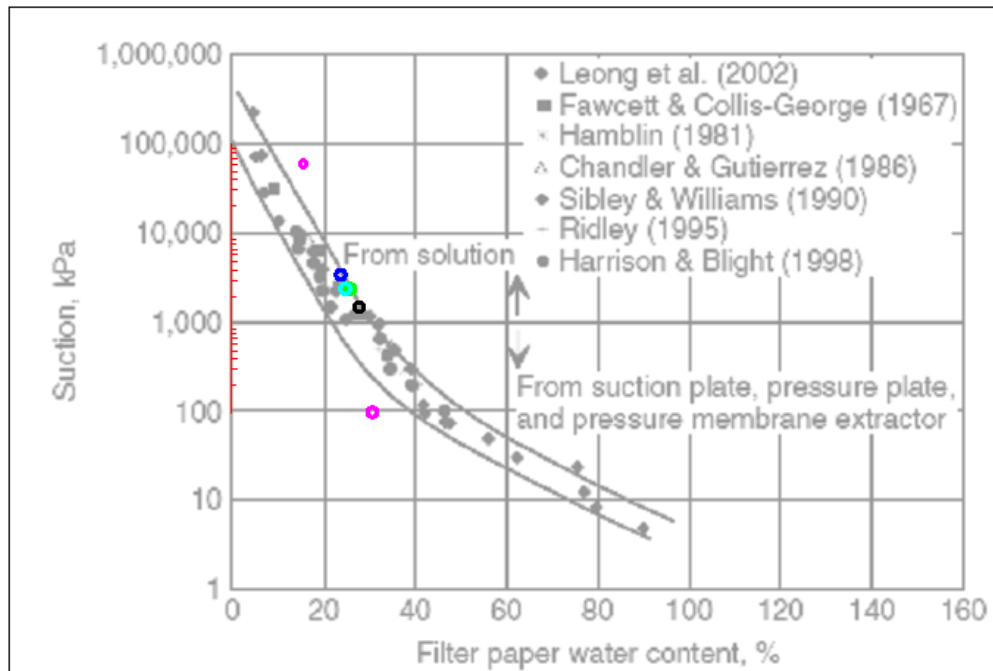
Soil Type	Void Ratio, e		Porosity, n (%)		Density, ρ (kg/m ³)	
	maximum	minimum	maximum	minimum	maximum	minimum
Granular Materials: Uniform Materials						
(a) Equal spheres (theoretical values)	0.92	0.35	47.6	26.0	—	—
(b) Standard Ottawa sand	0.80	0.50	44.0	33.0	1762	1474
(c) Clean, uniform sand (fine or medium)	1.0	0.40	50.0	29.0	1890	1330
(d) Uniform, inorganic silt	1.1	0.40	52.0	29.0	1890	1281
Granular Materials: Well-Graded Materials						
(a) Silt sand	0.90	0.30	47.0	23.0	2034	1394
(b) Clean, fine to coarse sand	0.95	0.20	49.0	17.0	2210	1362
(c) Micaceous sand	1.20	0.40	55.0	29.0	1922	1217
(d) Silt sand and gravel	0.85	0.14	46.0	12.0	2239	1426
Mixed Soils						
(a) Sandy or silty clay	1.8	0.25	64.0	20.0	2162	961
(b) Skip-graded silt clay with stones or rock fragments	1.0	0.20	50.0	17.0	2243	1346
(c) Well-graded gravel, sand, silt, and clay mixture	0.70	0.13	41.0	11.0	2371	1602
Clay Soils						
(a) Clay (30–50% clay sizes)	2.4	0.50	71.0	33.0	1794	801
(b) Colloidal clay (-0.002 mm \geq 50%)	12.0	0.60	92.0	37.0	1698	308
Organic Soils						
(a) Organic silt	3.0	0.55	75.0	35.0	1762	641
(b) Organic clay (30–50% clay sizes)	4.4	0.70	81.0	41.0	1602	481

Source: Modified from Hough, 1969.

Note: Tabulation is based on $G_s = 2.65$ for granular soils, $G_s = 2.70$ for clays, and $G_s = 2.60$ for organic soils

Fuente: Fredlund et al., 2012

Figura 50: Valores de succión comparados con diferentes autores

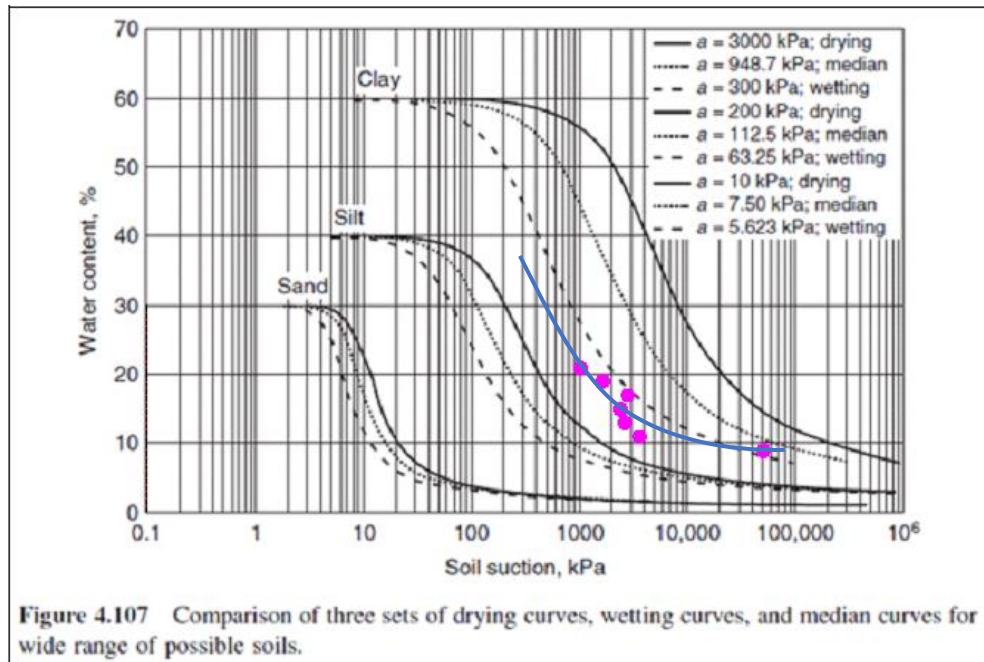


Fuente: Elaboración Propia

También estos autores proponen curvas referenciales para cada tipo de suelo. Al correlacionar los resultados obtenidos en esta investigación con estas curvas (Figura 42), se puede observar que los puntos se encuentran entre las curvas correspondientes a limos y arcilla. Esto se debe a que el suelo en estudio, a pesar de clasificarse como limo arenoso, tiene 81% de finos.

Si se construye una línea de tendencia para los resultados obtenidos, se puede evidenciar en la figura 42 que se sigue la forma de las curvas referenciales de la literatura.

Figura 51: Valores de succión comparados con diferentes tipos de suelo



Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la deformación y su relación con la humedad y succión del suelo García-Elías et al. (2017) en su artículo *Estimación de la succión total en arcilla expansiva* explica que a medida que aumenta la succión también son mayores las deformaciones presentes en el suelo. Esto se puede verificar con los datos encontrados ya que con succión de $pF=4.17$, para una humedad de 9%, la deformación es de 0.58%, mayor a la obtenida con el contenido de agua de 21% y $pF=3.01$, siendo el valor de la deformación de 0.07%.

Una vez obtenida la ecuación de la curva que relaciona el contenido de humedad del suelo con la deformación, se puede predecir que, con humedades inferiores a las estudiadas, la deformación puede ser mayor, cumpliendo con la afirmación del autor ya que a medida que disminuye la humedad aumenta la succión.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

El suelo según su clasificación SUCS contiene un 81.39% de partículas menores a 0.0075 mm y un 10% de la muestra total está comprendida por partículas menores a 0,002 mm (arcilla), de acuerdo con su mineralogía está compuesto fundamentalmente de Caolinita (45%), Grupo plagioclasa (26%) y Cuarzo (10%). Sin embargo, es conocido que la Caolinita es un mineral de arcilla. Se produce esta controversia debido a que la clasificación SUCS es un ensayo físico que intenta identificar propiedades mineralógicas. De tal manera, se concluye que el alto porcentaje de caolinita puede estar concentrado principalmente en la fracción fina.

Una conclusión importante para este tipo de suelo es que a medida que aumenta la humedad la succión es menor. Como muestran los resultados en la Tabla 39, para una humedad de 9% la succión es de 4.17 pF mientras que para una de 21% la succión es de 3.01 pF. Es decir, mientras más húmedo esté se puede considerar que su valor de resistencia disminuye ya que la succión no estaría aportando un porcentaje significativo.

El valor de índice de plasticidad igual a 10 es bajo para un suelo con tanto porcentaje de fino, y esto ocurre debido a la pequeña fracción de arcilla presente. El suelo en estudio está compuesto fundamentalmente por partículas finas, aproximadamente el 81.39% de las partículas pasan el tamiz No. 200 y 18.61% corresponde a arenas en su mayoría finas.

Se puede concluir que, a menores contenidos de humedad mayor es valor de succión presente en el suelo ya que para la menor humedad con la que se trabajó este valor es de 4.17 (pF) o 14901.6 (kPa), mientras que con la mayor este fue de 3.01 (pF) o 1028.1 (kPa).

Se utilizaron diferentes autores para determinar el valor de la succión a partir del contenido de humedad del papel filtro. Se puede concluir que se obtuvieron valores más precisos por la cercanía entre ellos, utilizando las ecuaciones o curvas de calibración proporcionadas por ASTM: D 5298-16.2 (2018) y Chandler et al. (1992)

Una vez realizada la experimentación es importante concluir que no se presenta como tal un colapso en el suelo si no una deformación por humectación, esto ocurre debido a que la muestra al estar remoldeada, tiene una estructura diferente a la original del suelo natural.

Se concluye que el suelo es más propenso a una deformación mientras más seco esté, en el rango de humedades estudiado entre 9% y 21%, debido a que el valor de la deformación es de 0.58% para una humedad aproximada de 9% y de 0.07% para una humedad de 21%.

Se puede concluir que a medida que aumenta el valor de la succión presente en un suelo antes de su saturación total, es mayor el valor de su deformación como se puede observar en la figura 31. De esta manera, la deformación tiene un mayor impacto en suelos con menores contenidos de humedad, por lo que se concluye que mientras menos húmedo sea el suelo, se debe ser mucho más cuidadoso con el uso que se le dé. Una estructura se diseña sin considerar que la

succión representa un gran porcentaje de la capacidad portante del suelo, por eso, cuando la succión disminuye al inundarse, su resistencia última disminuye y la probabilidad de existir una deformación estructural crece significativamente.

Analizando los datos obtenidos en la experimentación de la disertación se puede concluir que para suelos con humedades muy bajas en un rango aproximado de 0 a 6%, va a existir una mayor tendencia a una deformación, ya que una deformación del 2% ya es relevante y a medida que la humedad disminuye, este índice crece significativamente hasta un 10,75%. Para un mejor entendimiento con un ejemplo práctico, si se llega a tener un estrato de 3 m de altura que su deformación sea del 2%, representa un asentamiento de 6 cm, lo cual supera al máximo permisible según la NEC (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014).

8.2. Recomendaciones

Se recomienda la realización de la implementación, siempre que se desee hacer el ensayo de la matriz de succión a través del uso del papel filtro para familiarizarse con el procedimiento y lograr la agilidad requerida.

Para la construcción de la curva de retención de agua correspondiente al suelo que se esté analizando, se recomienda encontrar los valores de succión utilizando las diferentes curvas de calibración existentes en la bibliografía relacionada con el tema. Esto permitirá realizar una comparación y tener rangos válidos para la muestra.

Cuando se quiera trabajar con valores de succión es recomendable utilizar tanto pF como kPa, ya que variaciones que se pueden considerar no significativas en la primera unidad, si lo son en la segunda.

En caso de contar con suelo con altos porcentajes de partículas que pasan el tamiz No. 200, se recomienda la realización de la granulometría por hidrómetro ya que es esta la única forma de saber la composición de las partículas del suelo.

Es recomendable hacer un análisis mineralógico cuando la fracción de arcilla es significativa, ya que su comportamiento está estrechamente relacionado con los minerales que la componen.

Se recomienda que una vez obtenidos los valores de los ensayos siempre se realicen curvas que correlacionen las variables estudiadas para analizar los resultados, de esta manera al obtener una variación o incremento significativo en alguno se pueden tomar decisiones como la realización de más ensayos para comprobar una tendencia o hipótesis planteada.

BIBLIOGRAFÍA

Alfaro Soto, A. M. (2008). Geotecnia en suelos no saturados. *Researchgate*, 32(125),

12. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/266035977>

ASTM: D 1557-12.1.3.1.3. (2018). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using, 1–14. <https://doi.org/10.1520/D1557-12.1.3.1.3>

ASTM: D 2487-17. (2018a). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) 1, 1–10. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>.

ASTM: D 2487-17. (2018b). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 1–10. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>.

ASTM: D D5298-16.2. (2018). Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, 1–6. <https://doi.org/10.1520/D5298-16.2>

ASTM: D6913. (2017). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve, 04(Reapproved 2009), 1–34. <https://doi.org/10.1520/D6913-04R09E01.2>

ASTM: D7928-16. (2017). Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis 1. <https://doi.org/10.1520/D7928-16E01>

ASTM:D4318-10. (2014). Standard Test Methods for Liquid Limit , Plastic Limit , and Plasticity Index of Soils 1, 1–16. <https://doi.org/10.1520/D4318-10E01>.

- Barrera Bucio, M. (2002). *Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables*. Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved from <http://www.tdx.cat/TDX-0604102-095524>
- Bicalho, K. V, Correia, A. G., Ferreira, S., Fleureau, J., & Marinho, F. A. M. (2006). Filter paper method of soil suction measurement.
- Carrasco, J. C. (2017). *Implementación de ensayos de succión en suelos parcialmente saturados y análisis de resultados en suelos residuales*. Universidad de Chila.
- Chandler, R., Crilly, M., & Montgomery-Smith, G. (1992). A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings, 82–89.
- Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (7ma ed.). Mexico.
- Dudley, A. (1970). Review of collapsing soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proc. of the American Society of Civil Engineer.*
- Elena, V., & Ochoa, M. (2012). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169524098003>.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, INC. <https://doi.org/10.1002/9781118280492>
- Fresneda, C., Navarro, S., & Valencia, Y. (2013). Caracterización geotécnica de un suelo tropical laterítico, 9(1), 219–230.
- García-Elías, A., Aguilar Melendez, A., Córdova-Ceballos, A., Sánchez-Amador, J. L., Campos Ríos, A., Zamora-Cruz, H. H., & Azuara-Garcia, J. (2017).

- Estimación de la succión total en arcilla expansiva. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4(2012). Retrieved from www.reibci.org
- Jimenez Salas, J. ., Justo, J. ., Romana, M., & Faraco, C. (1973). *The collapse of gypseus silts and clays of low in arid and semiarid climates* (8th I.C.S.). Moscú.
- Lambe, W., & Whitman, R. (1972). *Mecánica de suelos* (LIMUSA-WEL). México.
- Landris T., L. J. (2013). Expansive Clay Suction Measurements Using Filter Paper and Polymer-Capacitance Sensor Methods. *Journal of Testing and Evaluation*, 41(6), 905–913. <https://doi.org/10.1520/JTE20120322>
- Maswoswe, J. (1985). *Stress path for compacted soil during collapse due to wetting*. Imperial College, London.
- Meza Ochoa, E. V. (2012, July). Suelos Parcialmente Saturados, De La Investigación A La Cátedra Universitaria. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 31, 23–38. <https://doi.org/ISSN 0120-3630>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). NEC-SE-GC: Geotécnia y cimentaciones.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3ra ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, INC.
- Pérez Arango, G. R. (2017). *Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Rainwater, R., Mcdowell, L. A., & Drumm, E. C. (2018). Measurement of Total Soil Suction Using Filter Paper : Investigation of Common Filter Papers , Alternative Media , and Corresponding Confidence. *Geotechnical Testing Journal*, 35(2),

295–304.

Ricardo, G., & Arango, P. (2017). *Influencia de la succión en la deformación cortante de suelos lateríticos*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Ridley, A. M., Dineen, K., Burland, J. B., & Vaughan, P. R. (2003). Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering. *Géotechnique*, 53(2), 241–253.
<https://doi.org/10.1680/geot.53.2.241.37275>

Sánchez, P. C., & Cevallos, D. (2015). Diseño de columnas de hormigón armado en zonas sísmicas Sesimic design of reinforced concrete columns. *Revista de Ciencia*, 17, 241–261.

Siemens, G. A. (2017). *THIRTY-NINTH CANADIAN GEOTECHNICAL COLLOQUIUM: UNSATURATED SOIL MECHANICS : BRIDGING THE GAP BETWEEN RESEARCH AND PRACTICE*.

Sm, R., & Revanasiddappa, K. (2018). Role of Soil Structure and Matric Suction in Collapse of a Compacted Clay Soil, 26(1), 102–110.

Sowers, G. B., & Sowers, G. F. (1972). *Introducción a la Mecánica de Suelos y cimentaciones* (Primera). España: Limusa-Wiley.

Suarez Diaz, J. (1998). *DESLIZAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN ZONAS TROPICALES*. (L. Ingeniería de Suelos, Ed.). Bucaramanga – Colombia: Publicaciones UIS. Retrieved from <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales.html>

Tang, C., Borden, R. H., & Gabr, M. A. (2018). A Simplified Direct Shear Testing Procedure to Evaluate Unsaturated Shear Strength. *Geotechnical Testing Journal*, *41*, 223–234. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150161>

Zhu, Y., & Chen, Y. X. (2012). Test Investigation on Mechanical of Unsaturated Loess. *Applied Mechanics and Materials*, *204–208*, 22–27. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.22>

ANEXOS