



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS DE SUCCIÓN EN SUELOS PARCIALMENTE
SATURADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EN SUELOS RESIDUALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

JAVIERA CATALINA CARRASCO ELGUETA

PROFESOR GUÍA:

OMAR NÚÑEZ ESPER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ROBERTO GESCHE SCHÜLER

CLAUDIO CANTEROS GORMAZ

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia.
POR: Javiera Catalina Carrasco Elgueta.
FECHA: 20/04/2017
PROFESOR GUÍA: Omar Núñez Esper.

IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS DE SUCCIÓN EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EN SUELOS RESIDUALES

El desarrollo de la ingeniería geotécnica se ha basado principalmente en el análisis de los suelos saturados. Sin embargo esta situación no es única ni la más habitual al enfrentar obras de ingeniería, pues a menudo los suelos se encuentran en un estado parcialmente saturado, cuyo comportamiento no es descrito correctamente por medio de las teorías tradicionales de suelos saturados.

Los suelos parcialmente saturados presentan succión, la cual corresponde a un estado de tensiones definido por la presión de agua negativa presente en los poros. Este estado de tensiones afecta las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos, y se encuentra íntimamente ligado a la capacidad del suelo de absorber agua a presión atmosférica. Por ésta razón, en este trabajo de título, se busca describir la implementación, en el laboratorio de ONE Geotecnia, de un ensayo que permita medir dicho parámetro.

De los ensayos existentes, se implementará el método del papel filtro el cual permite medir de forma indirecta la succión total y su componente matricial.

Finalmente se realizarán mediciones a suelos residuales, los cuales se compararán con valores obtenidos de la literatura, con el objetivo de corroborar la coherencia de los datos, validando la implementación y ejecución del ensayo.

A Daniel, por su amor, paciencia, y compañía.

Agradecimientos

Quisiera expresar mis sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de una u otra forma estuvieron presentes a lo largo de mi desarrollo, tanto académico como personal.

En primera instancia deseo agradecer a ONE Geotecnia S.p.A., por la oportunidad y el financiamiento entregado, así como también a todo el grupo humano del laboratorio, tanto ingenieros como laboratoristas, todos ellos han sido parte importante de este proceso.

De manera especial quiero agradecer a mi profesor guía, Omar Núñez, por la ayuda y confianza depositada, sin la cual el desarrollo de este trabajo de título no podría haber sido posible.

A los profesores César Pastén y Roberto Gesche. Su orientación y guía en los pasos finales estuvieron presentes en el desarrollo de este trabajo. Y al profesor Claudio Canteros, quien despertó en mí el interés y gusto por la geotecnia.

Finalmente quiero agradecer a mi familia y amigos, por la paciencia y apoyo, sobre todo en los momentos en que las energías y la motivación flaqueaban. En especial a mi madre y mi pareja, por estar siempre presentes y respetar mis silencios. Y a mi abuela, mi mami, que aunque ya no está conmigo, sé que estaría orgullosa de mí.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos y alcance de este trabajo.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Suelos parcialmente saturados	4
2.2.1. Succión.....	7
2.2.2. Curva característica del agua en el suelo.....	9
2.2.3. Estado de tensiones efectivas	14
2.2.4. Resistencia al corte	17
2.2.5. Coeficiente de permeabilidad	19
2.3. Ensayos para determinar la succión del suelo	20
3. METODOLOGÍA Y MATERIAL ENSAYADO	23
3.1. Material Ensayado.....	25
3.1.1. Geología local.....	27
3.1.2. Caracterización geotécnica.....	29
3.2. Ensayo del Papel Filtro	31
3.2.1. Humectación.....	34

4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	36
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	42
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
6.1.	Conclusiones.....	48
6.2.	Recomendaciones.....	49
7.	BIBLIOGRAFÍA	51
8.	ANEXOS	55
A.1.	PUG 19 Rev. 01 “Determinación del potencial de succión por medio del ensayo del papel filtro”	55
A.2.	FUG 19 – 1 Rev. 01 “Formulario de registro de datos”	67
A.3.	Formato Informe y planilla de cálculo.....	70

Índice de Tablas

Tabla 1: Ecuaciones de Tensiones Efectivas en suelos no saturados (Modificado de Alfaro, 2008).....	15
Tabla 2: Resumen de métodos de medición de succión (Modificado Hu, Yang y Li, 2010)	22
Tabla 3: Propiedades Índice y Densidad máxima seca compactada	30
Tabla 4: Curva de calibración para papel filtro Whatman N° 42 (ASTM D5298 – 10)	36
Tabla 5: Curvas de calibración para el papel filtro Whatman N°42 (Modificado Bicalho et al).	39
Tabla 6: Parámetros Curva Característica del Agua.	41
Tabla 7: Cuadro comparativo de propiedades índices.	44

Índice de Figuras

Figura 1: Representación del suelo parcialmente saturado. (Modificado de Fredlund, 1995)	5
Figura 2: Modelo capilar (Modificado de Alfaro, 208)	8
Figura 3: Curvas de retención de agua establecidas por Buckingham, 1907. (Narasimhan, 2007)	11
Figura 4: Curva del agua característica para un suelo limoso. (Fredlund, 1995)	12
Figura 5: Estado de tensiones en un elemento diferencial de volumen en suelo parcialmente saturado (Fredlund y Morgenstern, 1977)	16
Figura 6: Envolvente de resistencia al corte para suelos no saturados (Fredlund y Vanapalli, 2002)	18
Figura 7: Curva de permeabilidad para una arena y arcilla limosa parcialmente saturadas (Fredlund, 1995)	20
Figura 8: Equipos utilizados en el ensayo de papel filtro. A la derecha balanza analítica, a la izquierda desecador.	24
Figura 9: Imagen Satelital del punto de muestreo. (Google Earth)	25
Figura 10: (a) Vista lateral del talud. (b) Vista Frontal del talud.	26
Figura 11: Vista panorámica del sector de muestreo.	26
Figura 12: Unidades geológicas de la zona de muestreo (Mapa Geológico de Chile, SERNAGEOMIN 2003).	27
Figura 13: Distribución granulométrica del material a ensayar.	30
Figura 14: Esquema de la ubicación de los papeles filtro. (ASTM 5298 – 10)	32

Figura 15: Secuencia de montaje de ensayo de papel filtro.	33
Figura 16: Curvas características del agua para las probetas inalteradas.	37
Figura 17: Curvas características del agua para las probetas remoldeadas.	37
Figura 18: Curvas características del agua para las probetas inalteradas y remoldeadas.	38
Figura 19: Curvas Características del agua para Succión Matricial de probeta inalterada.	39
Figura 20: Curvas Características del agua para Succión Total de probeta inalterada. .	40
Figura 21: Curva característica del agua para succión matricial, de acuerdo a Ecuación 11.	41
Figura 22: Distribución granulométrica de materiales estudiados por diferentes autores.	45
Figura 23: Succión total de diferentes materiales.....	46
Figura 24: Succión matricial de diferentes materiales.	46

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Motivación

El desarrollo de la sociedad, lleva al trabajo de la ingeniería a superarse constantemente a sí misma, buscando soluciones factibles, económicas y seguras. En el campo de la ingeniería geotécnica los desafíos que se están planteando no se alejan de la realidad previamente mencionada, por lo que resulta vital ampliar y profundizar el entendimiento del comportamiento de los suelos.

La geotecnia se ha basado principalmente en el análisis de los suelos saturados, es decir, aquellos suelos en los cuales los poros se encuentran completamente llenos de agua. Sin embargo, esta situación no es única ni la más habitual al enfrentar obras de ingeniería, pues un amplio porcentaje de los centros urbanos del mundo se encuentran ubicados en suelos con niveles freáticos profundos, en los cuales los vacíos del suelo se encuentran ocupados tanto por agua como por aire. Este estado del suelo se le conoce como parcialmente saturado, cuyo comportamiento no es descrito correctamente por medio de las teorías tradicionales.

Una de las principales características de los suelos parcialmente saturados es la presencia de succión, la cual corresponde a un estado de tensiones que se encuentra directamente relacionado con la presión de poros negativas, y que afecta las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos (Fredlund, 1995). Algunos estudios han demostrado los efectos del grado de saturación en la deformación y resistencia al corte del suelo (Alfaro Soto, 2004), sobre todo en suelos con gran capacidad expansiva o colapsable (Meza, 2005).

Si bien todos los suelos pueden encontrarse en una fase parcialmente saturada, pues corresponde a un estado en el cual los poros no se encuentran 100% llenos de agua, las variaciones en la succión adquieren especial relevancia en aquellos suelos de grano fino,

con altas capacidades de absorción y retención de agua, tales como suelos arcillosos (sobre todo aquellos expansivos y muy plásticos), suelos salinos, suelos aluviales, coluviales y compactados, entre otros.

La succión, la cual se encuentra estrechamente relacionada con el contenido de humedad, genera estados tensionales diferenciales, los cuales afectan los parámetros geomecánicos del suelo alterando su resistencia al corte. Un ejemplo típico de esta situación se genera en el análisis de la estabilidad de taludes. La desestabilización de taludes tras periodos prologados de precipitaciones responde a la disminución de las tensiones de succión con el aumento de la humedad del suelo, generando una reducción en la resistencia efectiva al corte del suelo en la superficie de falla.

La conductividad hidráulica de los suelos también se encuentra afectada a la succión del mismo. La presencia de burbujas de aire en los poros del suelo, dificultan el paso del flujo del agua, disminuyendo sus valores de permeabilidad con respecto al mismo suelo en condiciones saturadas. Su estudio puede ser de interés para aquellos problemas asociados a la transmisión de contaminantes, como percolados o derrames accidentales de productos químicos.

Algunas teorías de la mecánica de suelos tradicional han sido extendidas para la incorporación en el análisis del parámetro de succión, permitiendo generar soluciones más acotadas, disminuyendo el sobredimensionamiento de las estructuras. Esta situación, asociada al desarrollo de programas de modelamiento numérico que incluyen este tipo de análisis, genera el interés de implementar una metodología en laboratorio que permita medir la succión de los suelos y así poder tener una caracterización más completa de los mismos al momento de realizar estudios de ingeniería.

1.2. Objetivos y alcance de este trabajo

El objetivo de este trabajo consiste en implementar en el laboratorio de mecánica de suelos ONE Geotecnia, una metodología de ensayo que permita determinar la presión de succión en suelos parcialmente saturados como función del contenido de humedad, y así generar la curva característica del agua.

Previo a la implementación oficial del ensayo en el laboratorio, se deberá generar el documento de procedimiento, el formulario de registro de datos y la planilla de cálculo correspondiente. Para ello se ejecutará la metodología definida utilizando suelos residuales de la región del Bío Bío, y se analizarán los resultados, con la finalidad de corroborar la coherencia de los datos obtenidos y la correcta ejecución del ensayo.

La primera parte de este trabajo consiste en una revisión de los conceptos de suelo parcialmente saturado, así como también de los diferentes ensayos para la determinación de la succión presentes en la literatura. De la revisión bibliográfica de los diferentes ensayos disponibles para la determinación de la succión, se establecerá uno a implementar en el laboratorio de ONE Geotecnia, en función de factibilidad técnica y económica.

En la siguiente sección se presenta el material ensayado, las experiencias realizadas para llevar a cabo este trabajo de título, los resultados obtenidos y el análisis y discusión de éstos para llegar a las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

Finalmente, en los anexos se presentan los documentos generados para la implementación del ensayo, basados en la norma ASTM D5298 – 10 y en el sistema de calidad del laboratorio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

Los suelos se consideran como un sistema trifásico compuesto por partículas sólidas, entre las cuales se encuentran vacíos. Éstos son ocupados por gas y líquido que típicamente, corresponden a aire y agua, respectivamente. Sin embargo, la mecánica de suelos tradicional ha desarrollado la mayoría de sus conceptos considerando la condición de suelos bifásicos o saturados, en la cual los vacíos se encuentran únicamente ocupados por agua.

Si bien este estado representa la situación más crítica del suelo, además de simplificar el análisis al considerar un sistema bifásico, genera limitaciones al momento de estudiar los suelos parcialmente saturados.

2.2. Suelos parcialmente saturados

De acuerdo a Fredlund (1995), los suelos parcialmente saturados pueden ser representados según la Figura 1, en la cual la línea horizontal representa el nivel freático presente en el suelo. La profundidad del nivel freático dependerá del tipo de clima y de las características hidrogeológicas de la zona en estudio, sin embargo, independiente de dichas condiciones, la Figura 1 presenta un esquema generalizado de la configuración de los suelos parcialmente saturados. Bajo la línea del nivel freático se encuentra el suelo saturado, mientras que por encima de esta línea se tiene la llamada zona vadosa (Alfaro, 2008).

Fredlund (1995) indica que bajo el nivel freático las presiones de poros serán positivas, mientras que sobre dicho nivel donde el suelo presente algún grado de humedad por

debajo de la saturación, las presiones intersticiales, en general, serán negativas o de succión.

En la llamada zona vadosa pueden distinguirse dos capas. La primera se encuentra inmediatamente sobre la línea del nivel freático, donde se genera la franja capilar, alcanzando un grado de saturación cercano a un 100%, con un espesor variable que puede llegar hasta los 10 [m] de espesor. La potencia de esta franja capilar dependerá del tipo de suelo. Sobre esta capa el suelo presenta presiones intersticiales o de poros negativa.

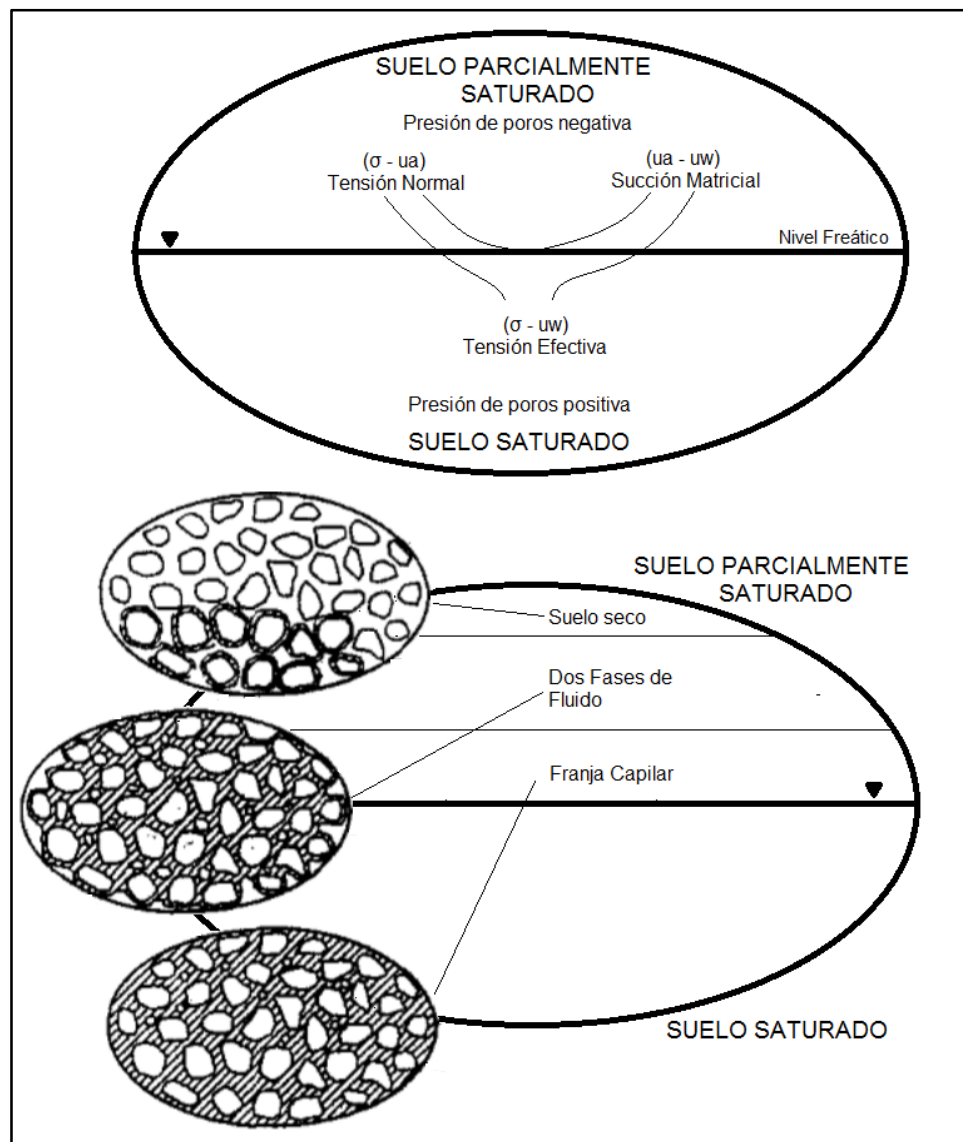


Figura 1: Representación del suelo parcialmente saturado. (Modificado de Fredlund, 1995)

Debido al papel importante que ocupa el contenido de agua en el comportamiento de los suelos parcialmente saturados, es adecuado detenerse un momento para diferenciar los tipos de agua presentes en el suelo. De acuerdo a Morell, se pueden distinguir básicamente de tres índoles las cuales corresponden al agua de retención, el agua capilar y el agua gravífica.

- **Agua de Retención**

El agua de retención es aquella ubicada en los poros o alrededor de las partículas, en contra de la acción de gravedad. Se presenta como agua higroscópica y como agua pelicular.

- El agua higroscópica corresponde a aquella que se encuentra fuertemente fijada a las partículas de suelo, producto de enlaces químicos entre los dipolos del agua y las valencias libres presentes en los minerales. Corresponde a un agua muy difícil de desplazar, a menos que sea en estado de vapor. Toma relevancia en los materiales finos como limos y arcillas, donde el agua retenida por esta vía puede alcanzar una magnitud de un 15 – 20% (en términos de humedad), en cambio para suelos granulares gruesos sólo llega hasta el 0,2 – 0,5%.
- El agua pelicular en cambio, corresponde a aquella agua de retención que envuelve a las partículas de suelo y al agua higroscópica, presentando un espesor que no sobrepasa las 0,1 micras. La retención de esta agua se encuentra asociada a la tensión superficial, y es posible desplazarla en estado líquido debido a la atracción molecular que se genera entre partículas vecinas.

- **Agua Capilar**

El agua capilar corresponde al agua retenida en los microporos, debido a la capilaridad y la tensión superficial. Aquí se distingue el agua capilar aislada o colgada, la cual no tiene relación con la zona saturada y podría deberse a situaciones de infiltración de lluvias; y

el agua capilar continua, la cual hace referencia a la zona saturada, pudiendo alcanzar varios metros de altura, según lo expresado por Fredlund (1995).

- **Agua Gravífica**

Finalmente se tiene el agua gravífica, la cual se define como el agua que se desplaza libremente a través del suelo por efecto de la gravedad, y corresponde a la parte activa de las aguas subterráneas siendo la principal responsable del transporte de solutos.

2.2.1. Succión

La succión en suelos parcialmente saturados, o succión total (S_t), se define como la suma de dos componentes, la succión matricial (S_m) y la succión osmótica (S_{osm}). La succión total se presenta en unidades de presión, y queda expresada de la siguiente forma:

$$S_t = S_m + S_{osm} \quad \text{Ecuación 1}$$

La succión matricial se define como la diferencia entre la presión de aire de poros (u_a) y la presión de agua de poros (u_w).

$$S_m = u_a - u_w \quad \text{Ecuación 2}$$

Esta succión se encuentra asociada a los efectos de las presiones formadas en el menisco capilar y absorción del suelo producto de las fuerzas ejercidas en las superficies de las partículas, por lo que su valor depende del tamaño de las partículas, del tamaño de los poros y del grado de saturación.

Narasimhan (2007) presentó un compendio de las ideas centrales propuestas por Buckingham en 1907. En ellas, Buckingham, determinó que los efectos de capilaridad en el menisco pueden ser representados a través de un equilibrio de fuerzas en la interfaz aire – agua, como se muestra en la Figura 2. Esta teoría de capilaridad se basa en la ecuación de Laplace:

$$u_a - u_w = \frac{2\gamma \cos \alpha}{R}$$

Ecuación 3

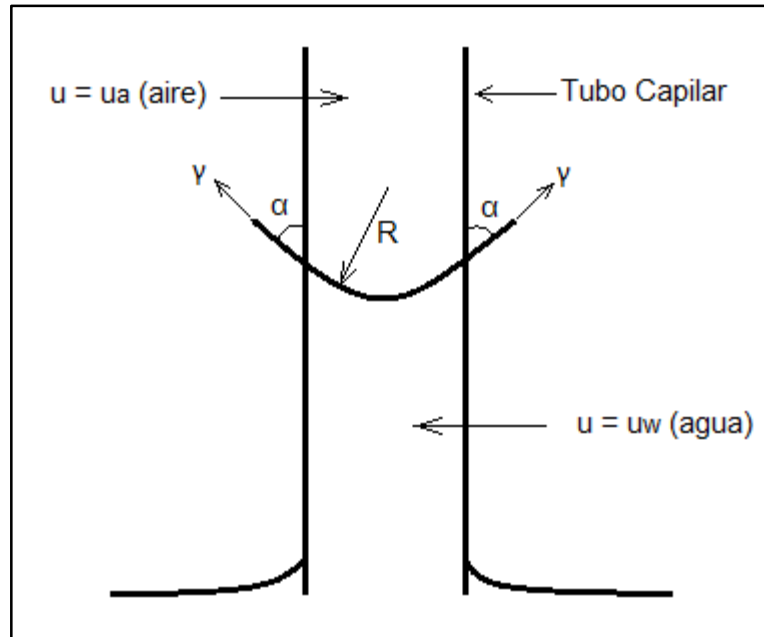


Figura 2: Modelo capilar (Modificado de Alfaro, 2008)

Donde γ corresponde a la tensión superficial, α al ángulo de contacto y R al radio del menisco.

De esta forma, cuando el grado de saturación disminuye, el menisco se retrae a poros más pequeños, donde el radio de curvatura del menisco se reduce y la succión matricial se incrementa.

La succión osmótica (S_{osm}) es una función de la cantidad de sales disueltas en el fluido, por lo que es el resultado de la fuerza ejercida sobre las moléculas de agua producto de la actividad química del suelo.

Si bien la succión total resulta de la suma de las succiones matricial y osmótica, se considera que la succión matricial es igual a la succión total cuando el agua de infiltración presenta la misma concentración de solutos al agua presente en el suelo, y por tanto no

se generan disoluciones de sales. Por su parte, la succión osmótica adquiere relevancia cuando el suelo se encuentra cercano a la saturación, y por tanto no hay componente matricial, sólo el efecto de la concentración de solutos.

2.2.2. Curva característica del agua en el suelo

Fredlund (1995) define la curva característica de retención del agua en el suelo (SWCC, por sus siglas en inglés Soil-Water Characteristic Curve) como la relación entre el contenido de agua y la succión. Corresponde a la variación de la succión con la variación del contenido de agua en los macro y micro poros (medido como contenido de agua volumétrica, contenido de agua gravimétrica o grado de saturación).

El contenido volumétrico de agua (θ) se define como la relación entre el volumen del agua y el volumen total del suelo, expresado matemáticamente en la Ecuación 4.

$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: θ = contenido volumétrico de agua en m^3/m^3 ,

V_w = volumen de agua en m^3 ,

V_T = volumen total comprendido por la suma del volumen del suelo y el volumen de vacíos, en m^3 .

Sus valores varían desde cero, cuando el suelo se encuentra completamente seco, hasta igualar el valor de la porosidad, cuando se encuentra en estado saturado.

Para comprender esta última afirmación es necesario recordar la definición de porosidad (η), la cual corresponde a la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total. De esta forma, cuando un suelo se encuentra en estado saturado, el volumen de vacíos es exactamente el volumen de agua ya que todos los poros se encuentran ocupados por

agua, por lo que el valor de la porosidad se iguala con el del contenido volumétrico de agua saturado (θ_s), Ecuación 5.

$$\eta = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_w}{V_T} = \theta_s \quad \text{Ecuación 5}$$

Por su parte, el contenido gravimétrico de agua (ω) se define como la relación entre la masa de agua (M_w) y la masa de suelo (M_s), tal como se plantea en la Ecuación 6.

$$\omega = \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Como se mencionó, la curva característica del agua también relaciona el potencial de succión de los suelos con el grado de saturación (S). Éste se define como la relación entre el volumen de agua de los suelos con su volumen de vacíos (Ecuación 7).

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad \text{Ecuación 7}$$

Las primeras curvas de retención de agua fueron establecidas por Buckingham en 1907. En ellas relacionó el potencial de capilaridad con el contenido de humedad. En esos años no se contaba con un método para medir de forma directa el potencial de capilaridad, por lo que Buckingham observó que el potencial de capilaridad y la elevación de la columna de agua sobre el nivel freático se encontraban relacionados por un constante multiplicador (A) (Narasimhan, 2007).

En la Figura 3 se aprecian las primeras curvas determinadas por Buckingham, donde relaciona el contenido de agua (en el eje de las abscisas) de los suelos con la altura alcanzada por la columna de agua en pulgadas (eje ordenado). Es ésta altura la cual relaciona con el potencial de capilaridad por medio de su constante A.

De esos años, donde se establecieron las primeras curvas de retención de agua del suelo, a la actualidad, se han realizado importantes aportes en el estudio de los suelos parcialmente saturados. Actualmente se sabe que la relación humedad – succión es una relación no lineal, y depende en términos generales de la geometría de los poros, magnitud y composición mineralógica de la porción fina y densidad del suelo (Alfaro, 2008).

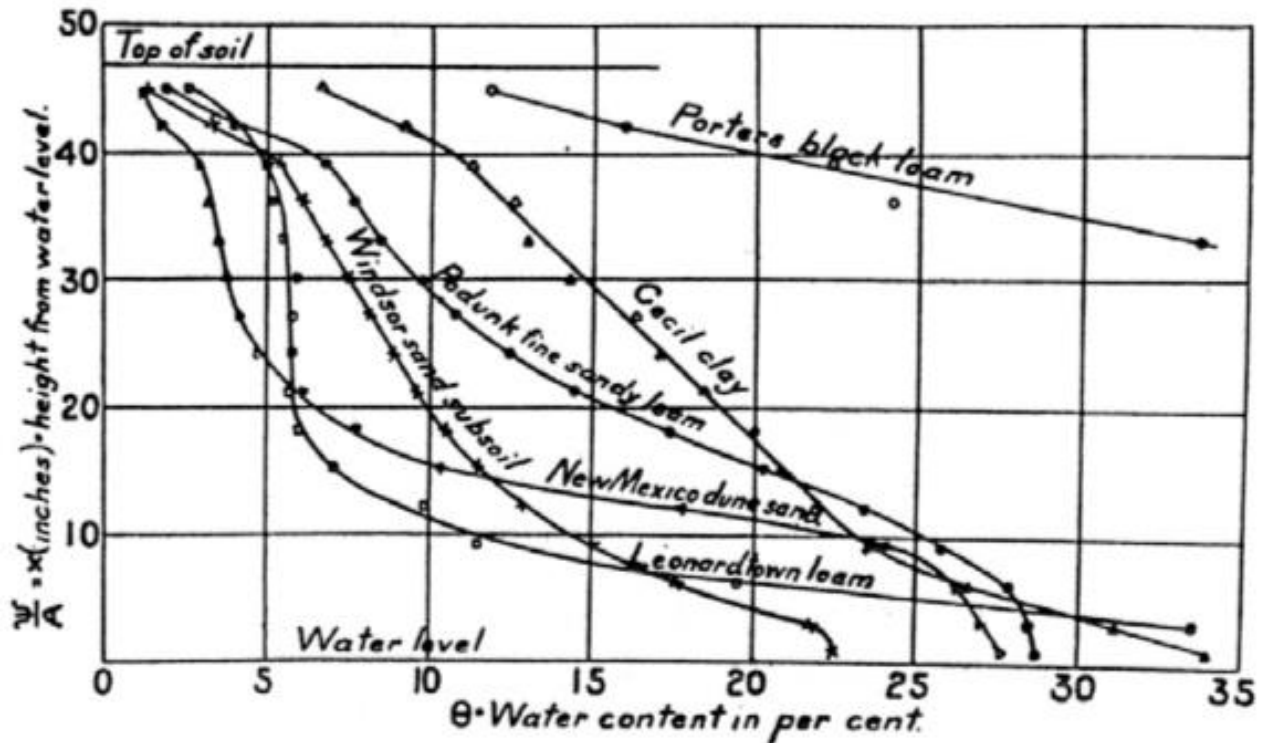


Figura 3: Curvas de retención de agua establecidas por Buckingham, 1907. (Narasimhan, 2007)

Si bien las curvas características de retención de agua son únicas para cada tipo de suelo, así como también dependen del grado de compactación que éste presente, existen elementos característicos inherentes a ellas. En la Figura 4 se aprecia una curva genérica, donde es posible apreciar su forma característica.

En ella es posible apreciar el fenómeno de histéresis que presentan los suelos, producto de los procesos de secado (Desorption curve) y humectación (Adsorption curve). Haines (1930) estableció experimentalmente el efecto de la histéresis en las curvas de retención del agua, llegando a la conclusión de que cuando un suelo es sometido a un proceso de secado se observa una tendencia a presentar altos valores de presión de poros negativa, mientras que en un proceso de humectación se tiene valores bajos de succión, para un mismo contenido de agua dado.

Algunos de los elementos presentes en estas curvas son; la humedad volumétrica de saturación de la curva de secado (θ_s), humedad volumétrica de saturación para la curva

de humedecimiento (θ'_s). La diferencia entre estos dos valores entrega el contenido de aire residual (Residual air content), que representa la histéresis del suelo.

La presión de entrada de aire (Air – entry value) corresponde a la succión requerida para que comience el ingreso de aire a los poros de mayor tamaño en el proceso de secado; por su parte el contenido de agua residual (θ_r) (Residual water content), es el contenido de humedad en el cual el agua presente en los poros comienza a ser discontinua y éstos se encuentran principalmente llenos por aire.

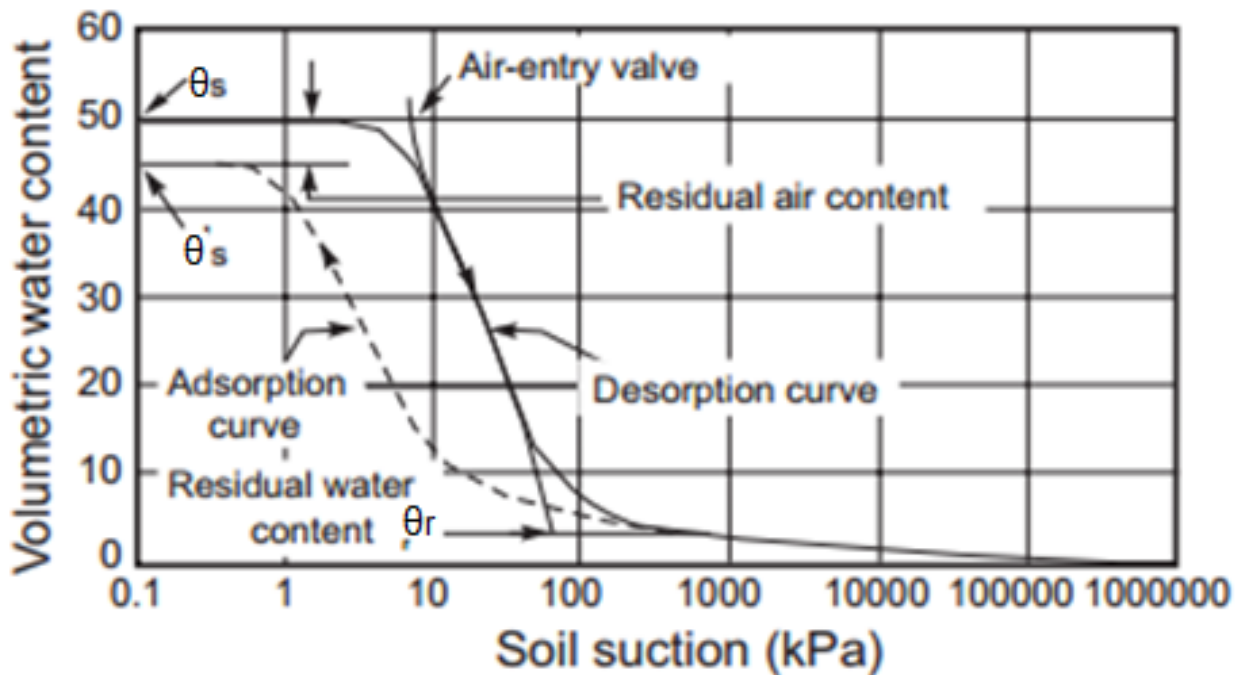


Figura 4: Curva del agua característica para un suelo limoso. (Fredlund, 1995)

Se han propuesto numerosas ecuaciones para describir la curva característica del agua. Una de las primeras ecuaciones planteadas fue propuesta por Brooks y Corey (1964), basados en una gran cantidad de datos experimentales.

$$\theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda$$

Ecuación 8

Donde: θ = contenido de agua normalizado (adimensional),

ψ = Succión,

ψ_b = valor de presión entrada de aire,

λ = índice de distribución del tamaño de poros.

La variable adimensional del contenido de agua, se define de la siguiente manera:

$$\theta = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_r - \theta_s} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Sin embargo, la Ecuación 8 presenta problemas de discontinuidad en la curva para valores cercanos a la saturación.

Van Genuchten propuso en 1980 otra ecuación que relaciona el contenido de agua normalizada y la succión:

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde: h = altura de presión,

α, n, m = corresponden a diferentes parámetros del suelo.

Esta ecuación entrega una mejor flexibilidad que las que se tenían hasta ese entonces. En particular, Van Genuchten obtuvo una buena aproximación de las curvas en cuatro de los cinco suelos estudiados.

En 1994 Fredlund y Xing, propusieron una ecuación general que describe la curva característica del agua para un amplio rango de presiones de succión, entre 0 a 10^6 kPa. Esta ecuación presenta el contenido volumétrico de agua en función de la succión, a diferencia de las Ecuaciones 8 y 10, donde se determina el contenido de agua normalizado, el cual a su vez se relaciona con el contenido volumétrico de agua según la Ecuación 9.

$$\theta = \theta_s \left(1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 1000000/\psi_r)} \right) \left[\frac{1}{\ln(e + (\psi/a)^n)} \right]^m \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde: ψ = Succión total en kPa,

e = número de Euler,

ψ_r = Succión total en kPa, correspondiente al contenido de agua residual θ_r ,

a = parámetro del suelo que se encuentra relacionado con el valor de entrada de aire, en kPa,

n = parámetro del suelo que controla el punto de inflexión de la curva característica del agua,

m = parámetro del suelo que se encuentra relacionado con el contenido de agua residual.

La Ecuación 11 será la definida para generar la curva de retención del agua. La elección de esta curva de ajuste a los resultados obtenidos en el ensaye de laboratorio, responde a la relación directa que se presenta entre el contenido volumétrico de agua y la presión de succión del suelo, además del amplio rango de valores de presión de succiones en los cuales la curva es válida.

Es importante destacar que esta ecuación depende de tres parámetros (a , n , m), los cuales tienen carácter de empíricos, por lo que esta curva adquiere valor en la medida que se cuenten con datos experimentales obtenidos a través del ensayo de laboratorio.

2.2.3. Estado de tensiones efectivas

Las tensiones efectivas en los suelos parcialmente saturados son más complejas de definir que en los suelos saturados. Diversos autores han tratado de establecer dicha relación en función de parámetros empíricos, y como extensión de las teorías desarrolladas para los suelos saturados. La Tabla 1 presenta un resumen de dichas expresiones.

Tabla 1: Ecuaciones de Tensiones Efectivas en suelos no saturados (Modificado de Alfaro, 2008)

Ecuación	Componentes	Referencia
$\sigma' = \sigma + p''$	p'' = presión de agua debajo de la atmosférica	Donald (1956)
$\sigma' = \sigma - \mu_a + \chi(\mu_a - \mu_w)$	χ = parámetro relacionado con el grado de saturación del suelo	Bishop (1959)
$\sigma' = \sigma - \beta' \mu_w$	β' = factor de unión	Croney et al (1958)
$\sigma' = \sigma + \Phi p''$	Φ = parámetro entre 0 y 1	Aitchison (1961)
$\sigma' = \sigma + \beta p''$	β = factor estadístico para medir el área de contacto	Jennings (1961)
$\sigma' = \sigma - \mu_a + \chi_m(h_m + \mu_a) + \chi_s(h_s + \mu_a)$	χ_m, χ_s = parámetros de tensión efectiva para succión matricial y de soluto respectivamente h_m, h_s = succión matricial y de soluto respectivamente	Richards (1966)
$\sigma' = \sigma - \mu_a + \chi_m p''_m + \chi_s p''_s$	p''_m, p''_s = succión matricial y de soluto respectivamente	Aitchison (1973)
$\sigma' = \sigma - \mu_w Sr - (1 - Sr)\mu_a$	Sr = grado de saturación	Öberg y Sällfors (1997)

Fredlund y Morgenstern (1977) introducen el concepto de que el comportamiento de los suelos parcialmente saturados se encuentra definido por dos tensores de esfuerzo independientes, dentro de un grupo de tres variables.

Este concepto se basa en el análisis teórico tridimensional del diagrama de cuerpo libre de un elemento diferencial de volumen en un suelo parcialmente saturado, tal como se aprecia en la Figura 55.

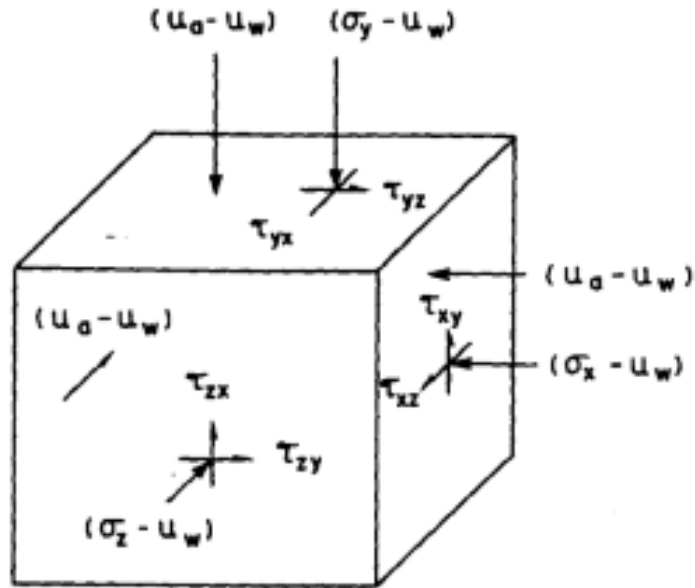


Figura 5: Estado de tensiones en un elemento diferencial de volumen en suelo parcialmente saturado (Fredlund y Morgenstern, 1977)

De este análisis se definen las siguientes matrices de tensiones de esfuerzos:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \mu_w & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \mu_w & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \mu_w \end{bmatrix} \quad \text{Matriz 1}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \mu_a & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \mu_a & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \mu_a \end{bmatrix} \quad \text{Matriz 2}$$

$$\begin{bmatrix} \mu_a - \mu_w & 0 & 0 \\ 0 & \mu_a - \mu_w & 0 \\ 0 & 0 & \mu_a - \mu_w \end{bmatrix} \quad \text{Matriz 3}$$

De esta forma, las tensiones asociadas a cargas mecánicas o geoestáticas pueden ser representadas por las variables $(\sigma - \mu_w)$ o $(\sigma - \mu_a)$. Las tensiones asociadas a las

presiones de poros son representadas a través de la succión matricial $(\mu_a - \mu_w)$, y las variaciones de volumen del suelo se asocian a los dos estados de tensiones independientes a través del índice de vacíos (Alfaro, 2008).

Los estados de tensiones definidos por la Matriz 2 y la Matriz 3, corresponden a la combinación más utilizada en la práctica ingenieril, de acuerdo a diversos autores (Alfaro, 2008; Meza, 2005). Debido a que la tensión total y la variación de la presión de poros son tensiones que pueden ser físicamente medibles separadamente.

2.2.4. Resistencia al corte

Varios autores han propuesto ecuaciones para describir la resistencia al corte en suelos parcialmente saturados. Una de ellas fue propuesta por Fredlund et al. en 1978 (Fredlund, Xing, Fredlund y Barbour, 1995), como una extensión del criterio de Mohr – Coulomb, la cual queda representada por:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu_a) \tan \phi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^b \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde: c' = es la intersección de la cohesión del suelo para la condición saturada,

ϕ' = es el ángulo de fricción interna del suelo,

ϕ^b = es el ángulo que indica la tasa de incremento de la tensión de corte producto de la matriz de succión $(\mu_a - \mu_w)$.

La representación tridimensional de la Ecuación 12 es representada en la Figura 66. En esta figura se observa que la influencia de la succión es representada por un tercer eje, la cual es reflejada por un aumento lineal en la cohesión.

La Figura 6 presenta una superficie de falla posible, donde el aumento de la resistencia del suelo al corte se presenta como un aumento en la cohesión debido a la presencia de la succión. Si se tiene la situación saturada, el aporte de la succión matricial es nulo, y se

recupera el plano de tensión normal versus tensión de corte, con una cohesión efectiva c' . En la medida que aumenta la succión, la envolvente de falla se desplaza a través del eje perpendicular al plano, manteniendo la pendiente de la recta, debido a que no se considera una variación del ángulo de fricción interna (ϕ'), pero con una cohesión c , mayor a la cohesión en estado saturado.

Esta ecuación presenta una superficie de falla lineal, sin embargo, resultados experimentales han demostrado la no linealidad de la envoltura de falla, lo cual es admitido por Fredlund y Vanapalli (2002). Sin perjuicio de lo anterior, la Ecuación 12 se considera válida en los tramos iniciales de las tensiones efectivas, en las cuales el ángulo ϕ^b se iguala al ángulo de fricción interna drenado. Una vez que se supera la presión de entrada de aire se considera una relación no lineal con la succión, la cual tiende a un valor asintótico (Alfaro, 2008).

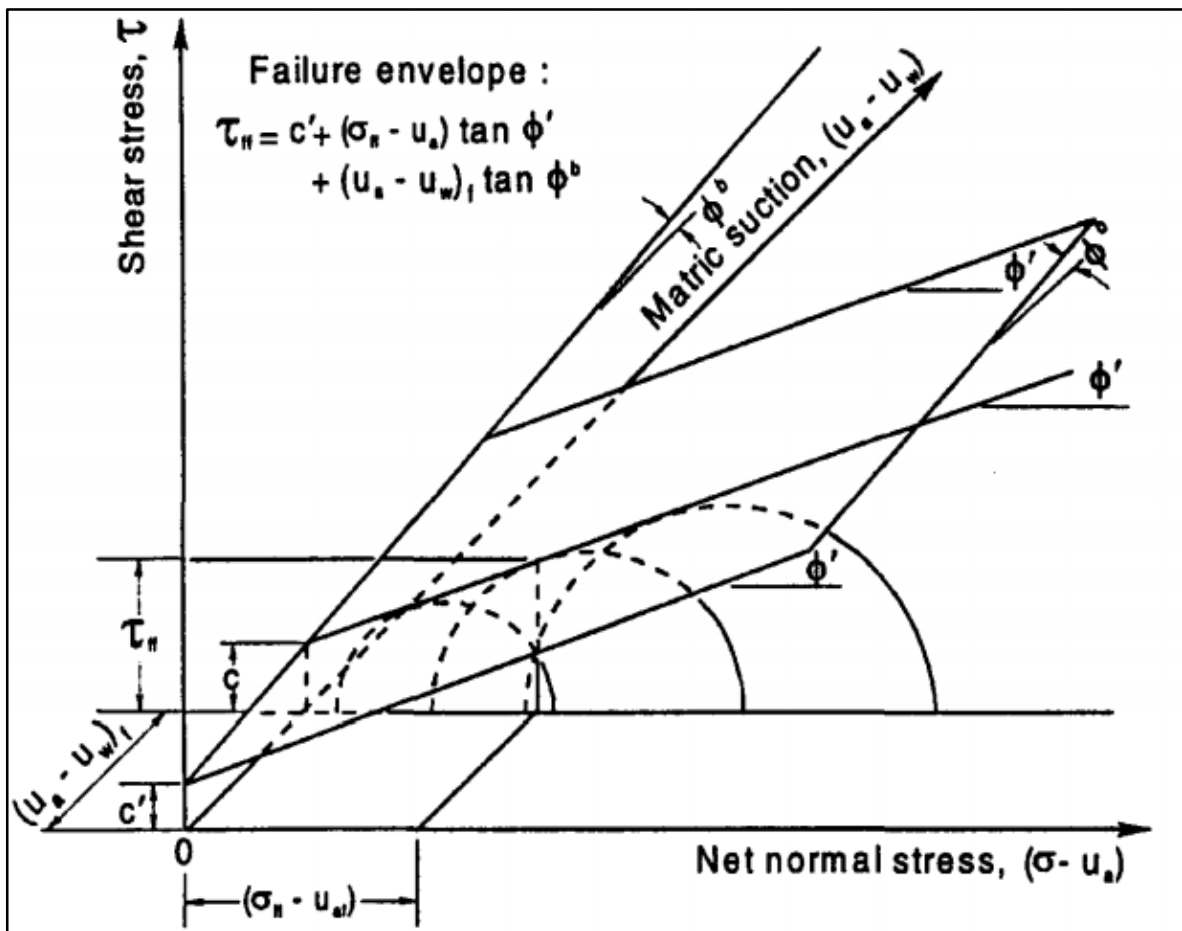


Figura 6: Envolvente de resistencia al corte para suelos no saturados (Fredlund y Vanapalli, 2002)

2.2.5. Coeficiente de permeabilidad

El flujo de agua en los suelos, tanto saturados como no saturados, responde a la ley de Darcy (Childs and Collins – George, 1950), la cual tiene la siguiente expresión:

$$v_w = -k_w(\mu_a - \mu_w) \frac{\partial h}{\partial y} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde: v_w = flujo de agua que equivale a la velocidad de descarga en m/s,

$k_w(\mu_a - \mu_w)$ = coeficiente de permeabilidad como función de la matriz de succión en m/s,

$\frac{\partial h}{\partial y}$ = gradiente hidráulico en la dirección y , en metros.

Para un suelo saturado, el coeficiente de permeabilidad es una constante, debida a que el contenido de agua en el suelo es constante. Para un suelo parcialmente saturado, en cambio, la permeabilidad varía en función de la humedad y por ende, de la succión. Esto se debe a que se asume que el agua puede fluir solamente a través de la porción húmeda del suelo.

Gardner (1958), propuso una ecuación para la función de la permeabilidad, como un caso especial de la Ecuación 10, por lo que emula la curva característica del agua. Donde define q como un parámetro relacionado con el valor de entrada de aire, y n con la pendiente de la curva característica del agua en el punto de inflexión.

$$\Theta = \left[\frac{1}{1+qh^n} \right] \quad \text{Ecuación 14}$$

La Figura 77 muestra la correlación entre la permeabilidad y la succión en suelos parcialmente saturados, graficadas según la ecuación de Gardner. Las curvas son obtenidas para una arena y una arcilla limosa. Se observa que al considerar el potencial de los efectos matriciales se genera una reducción en la velocidad de percolación. El flujo comienza en los poros de mayor tamaño, sin embargo, en la medida que disminuye la

humedad el flujo es transferido a los poros de menor tamaño, donde los efectos de capilaridad y absorción toman relevancia, siendo necesarios gradientes muy grandes y tiempos extensos para detectar el flujo de agua (Fredlund, 1995; Alfaro, 2008).

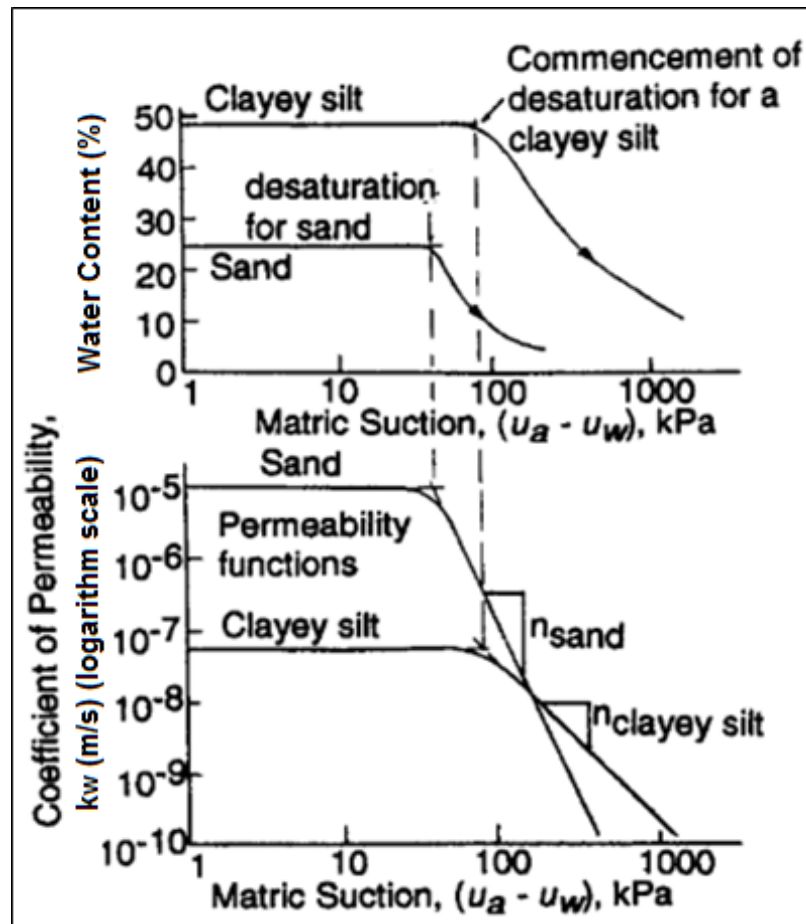


Figura 7: Curva de permeabilidad para una arena y arcilla limosa parcialmente saturadas (Fredlund, 1995)

2.3. Ensayos para determinar la succión del suelo

Como se ha visto, el concepto de succión juega un papel importante en el comportamiento de los suelos parcialmente saturados, por lo que se han desarrollado numerosas técnicas y procedimientos para poder determinar dicho parámetro. Cada una

de estas metodologías existentes tiene consigo una serie de limitantes, tales como confiabilidad, costos y rango de aplicación, así como también la variación en la dificultad de la ejecución del ensayo en sí.

En términos generales, existen dos grandes categorías de ensayos; los métodos directos y los métodos indirectos.

Se entienden como métodos directos aquellos que permiten medir el valor negativo de la presión de poros, y por tanto entregan el valor de la succión matricial de los suelos. Los equipos que se usan en este tipo de medición basan su funcionamiento en un disco cerámico que separa las fases de agua y aire, por lo tanto la máxima succión que puedan medir se encontrará limitada por el valor de entrada de aire del disco.

Los métodos indirectos permiten medir la succión total, matricial y osmótica, por lo que según el parámetro que se desee determinar es la forma en que trabaja cada ensayo. En general, estos métodos requieren tiempos de equilibrio mayores a los de medición directa.

Para la medición de la succión matricial, se emplean materiales porosos que actúan como sensores. Estos sensores porosos entran en equilibrio con la succión del suelo, por tanto, el contenido de agua que adquieran representa la magnitud de la succión matricial.

Las técnicas que miden la succión osmótica basan su funcionamiento en la medición de la conductividad eléctrica del agua presente en los suelos, que se genera por el contenido de sales disueltas en ella.

Finalmente, aquellos métodos que permiten determinar la succión total basan su ejecución en la determinación de diversos parámetros, tales como, punto de rocío, humedad relativa y temperatura, contenido de agua.

La Tabla 2 presenta algunas metodologías y técnicas de medición de succión.

Tabla 2: Resumen de métodos de medición de succión (Modificado Hu, Yang y Li, 2010)

		Metodología	Rango [kPa]	Tiempo de equilibrio	
Medición Directa	Succión	Técnica de traslación de eje	0 - 1.500	Horas	
	Matricial	Tensiómetro	0 - 1.500	Horas	
		Sonda de succión	0 - 1.500	Minutos	
		Reflectometría de dominio de tiempo	0 - 1.500	Horas	
		Succión Matricial	Sensor de conductividad eléctrica	50 - 1.500	6 - 50 horas
			Sensor de conductividad térmica	0 - 1.500	horas – días
Medición Indirecta			Papel filtro en contacto	10 - 100.000	7 - 14 días
	Succión Osmótica		"Squeezing technique"	0 - 1.500	Días
			Psicrometría	100 - 10.000	1 hora
		Succión total	Sensor de humedad relativa	100 – 8000	horas – días
			Higrómetro con espejo refrigerado	500 - 100.000	10 minutos
			Papel filtro sin contacto	10 - 100.000	7 - 14 días

3. METODOLOGÍA Y MATERIAL ENSAYADO

De acuerdo a la revisión de antecedentes, se determina que el ensayo a implementar en el laboratorio de suelos ONE Geotecnia será el método de papel filtro. La aplicación de esta metodología será basada en la definida por la norma ASTM D5298 – 10.

Las razones que determinan esta elección de procedimiento por sobre los demás se basan en los siguientes aspectos:

- **Técnicos:** si bien es el ensayo que más tiempo requiere para llegar al equilibrio, a su vez es el que presenta rango más amplio para medir la presión de succión, de acuerdo a lo establecido en la Tabla 2. Esto permite que el ensayo sea aplicable a una gran variedad de suelos, disminuyendo las limitaciones de ejecución que otros ensayos podrían tener en este ámbito.

Adicionalmente, el método del papel filtro es el único presente en la Tabla 2 que permite la medición tanto de la succión total como de la succión matricial, y por ende se puede determinar de forma indirecta la succión osmótica. Los otros ensayos sólo permiten medir una de estas componentes, lo que implicaría tener que implementar más de un ensayo si se desea obtener una información más completa.

- **Económicos y factibilidad:** es el ensayo que requiere de una menor inversión inicial en lo referente a equipos, además de una mayor facilidad para la obtención de los mismos en el mercado nacional. Si bien el tensiómetro también responde a este punto de forma positiva, se ve limitado por su rango de aplicación puesto que su uso se encuentra más bien limitado al sector agropecuario, para la determinación de la frecuencia de riego de los cultivos.

Con la metodología a implementar definida, se procede a adquirir, según los requerimientos de la norma anteriormente mencionada, los siguientes equipos e implementos:

- Papel filtro tipo II (Wathman N° 42)
- Contenedor hermético de vidrio
- Contenedor de papel filtro (bolsas plásticas con cierre hermético)
- Caja aislante de poliestireno expandido
- Balanza analítica con legibilidad de 0,0001 gr.
- Desecador
- Gel de sílice

El siguiente pasó correspondió a la realización del ensayo, con la finalidad de calibrar los datos obtenidos con resultados procedentes de la literatura. De esta forma se busca corroborar la coherencia de los mismos, validando o ajustando la implementación y ejecución del ensayo. Los distintos tipos de suelos con los cuales se realiza esta comparación se presentan en el acápite 5 de este trabajo de título.

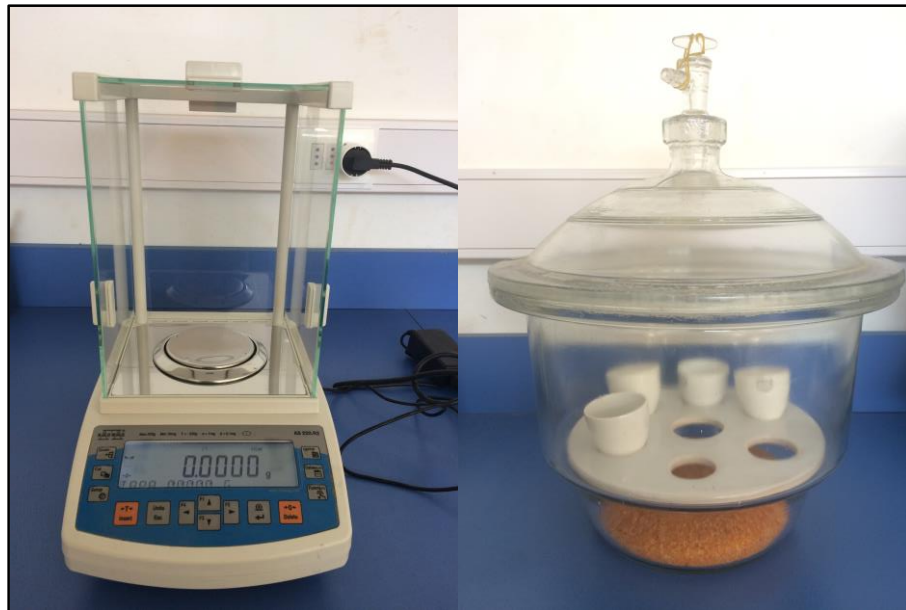


Figura 8: Equipos utilizados en el ensayo de papel filtro. A la derecha balanza analítica, a la izquierda desecador.

3.1. Material Ensayado

El material ensayado para este trabajo de memoria fue obtenido de un talud que presenta falla, ubicado al costado Oriente de la Ruta 160, entre las localidades de Los Ríos y Tres Pinos, aproximadamente a 17 km al sur de Curanilahue, Provincia de Arauco, Región del Biobío, tal y como se aprecia en la Figura 99.

Se extrajeron muestras perturbadas para la clasificación y caracterización del material, así como también muestras no perturbadas, para la realización de los ensayos de succión.

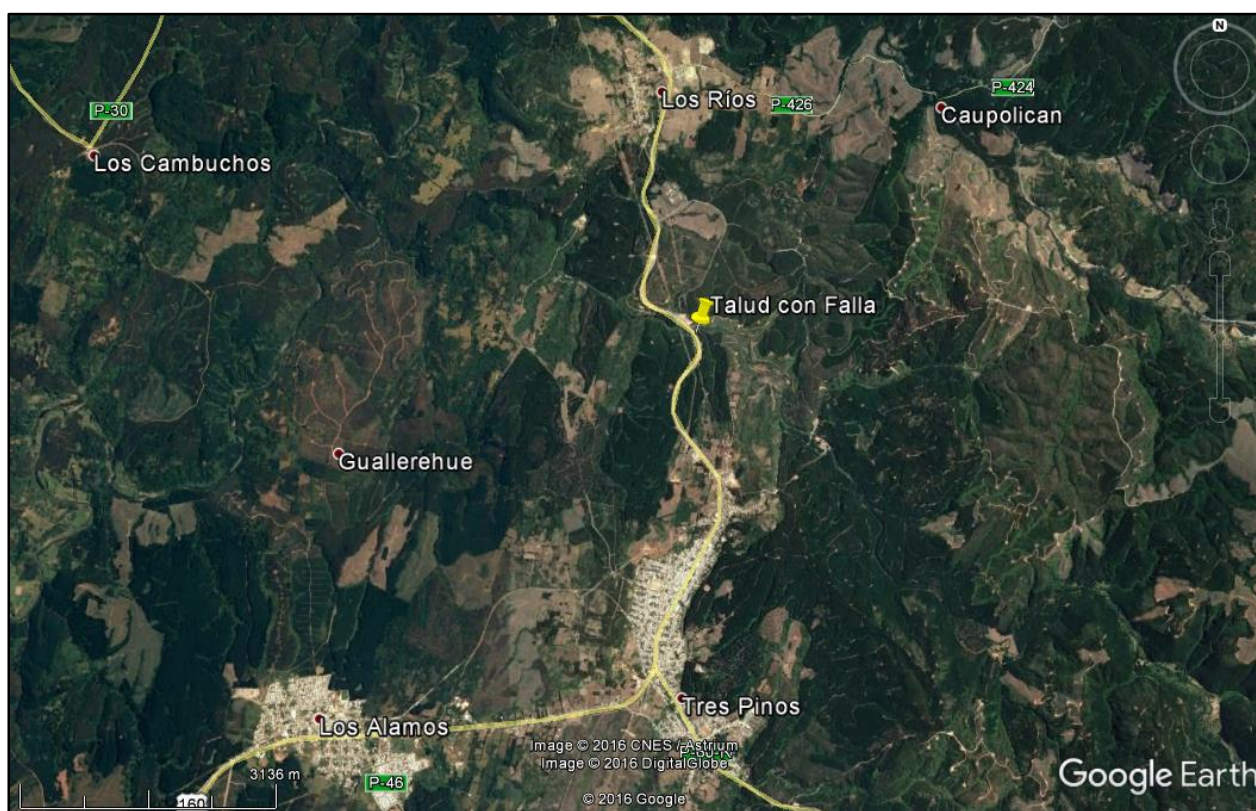


Figura 9: Imagen Satelital del punto de muestreo. (Google Earth)

La Figura 1010 muestra una vista lateral (a) del talud, en la cual es posible observar la inclinación del mismo, estimada entre 30° y 40° , así como los métodos para drenar las aguas. Una vista un poco más frontal (b) muestra claramente la zona de falla, así como

también la abundante vegetación presente en el coronamiento. Es evidente que los mecanismos para drenar las aguas no generan los resultados esperados, pues los taludes del sector presentan fallas cada cierto tramo (Figura 10).



Figura 10: (a) Vista lateral del talud. (b) Vista Frontal del talud.



Figura 11: Vista panorámica del sector de muestreo.

La clara presencia de estas fallas a lo largo de la ruta 160, especialmente en el sector que une las localidades de Los Ríos y Tres Pinos, es la motivación del uso de este tipo de suelos para la realización de los ensayos, pues una mejor comprensión de sus curvas características de retención de agua, permitiría definir correctamente el problema de desestabilización de taludes presentes en esta zona, ya que se podría conocer el

comportamiento de éstos suelos, y establecer como varía su resistencia al corte en función de las variaciones del contenido de agua presente en los mismo.

3.1.1. Geología local

De acuerdo a lo dispuesto en el Mapa Geológico de Chile, presentado por el SERNAGEOMIN en 2003, el punto de muestreo se encuentra localizado en la unidad geológica E1c, formada durante el Eoceno.

Esta unidad se encuentra conformada por secuencias sedimentarias continentales parálicas, en las que predominan las areniscas, lutitas y mantos de carbón.



Figura 12: Unidades geológicas de la zona de muestreo (Mapa Geológico de Chile, SERNAGEOMIN 2003).

Por tanto los suelos presentes en esta zona corresponden a suelos residuales provenientes de la meteorización de rocas sedimentarias.

Muy cercano al punto de muestreo se ubica la unidad geológica Q1, formada durante el Pleistoceno – Holoceno, la cual se caracteriza por corresponder a depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masas. Este tipo de suelos presentan una estructura y comportamiento diferentes a los estudiados en este trabajo de título, por lo que a pesar de su cercanía con la zona de muestreo, es posible afirmar que el suelo en estudio pertenece a la unidad geológica E1c.

De acuerdo a Toro, Contreras y Galdames (2009), la meteorización de estas rocas presenta diferencias substanciales con la meteorización de rocas ígneas o metamórficas. Principalmente, este tipo de suelos presentan un porcentaje ínfimo de la roca madre, la cual ha sido eliminada por disolución.

De acuerdo a Wesley (2010), es debatible si estos suelos pueden clasificarse como suelos residuales, debido a las pocas características que conservan de la roca madre. El proceso de meteorización puede liberar minerales de arcillas preexistentes así como crear nuevas. En particular, aquellas rocas formadas por intercalaciones de areniscas y lutitas, el proceso de meteorización tiende a formar nuevos minerales de arcilla provenientes de la arenisca, mientras que de las lutitas se liberan minerales existentes.

Las características de estos tipos de suelos no sólo vienen dadas por la roca madre, sino que también se ven afectadas por el tipo de clima al cual se ven sometidos. En climas templados, se mantiene de mejor forma la estructura y composición de la roca madre, mientras que en climas tropicales y húmedos, estas características se ven disminuidas (Wesley, 2010).

Los taludes conformados por este tipo de suelos residuales pueden presentar planos de debilidad heredados de discontinuidades presentes en la roca madre. Los deslizamientos son gatillados por periodos prolongados de lluvias, los cuales disminuyen la succión, disminuyendo a su vez la tensión normal efectiva a través de las potenciales superficies de falla.

La obtención de las curvas características de retención del agua permitiría generar modelos más acotados del comportamiento de estos taludes, permitiendo identificar zonas de riesgo por medio de un mapeo de las condiciones de los taludes, optimizando los medios en la implementación de mejoras tanto de contingencia como permanentes. Esto podría permitir mejorar el uso de recursos económicos, salvaguardando la conectividad y resguardando la vida de las personas.

3.1.2. Caracterización geotécnica

Las muestras obtenidas en la prospección geotécnica fueron cuarteadas y luego sometidas a los siguientes ensayos: contenido de humedad (NCh 1515 Of. 1979), análisis granulométrico (8.102.1 MC – V8, 2012), límite líquido (NCh 1517/1 Of. 1979), límite plástico (NCh 1517/2 Of. 1979), peso específico (NCh 1532 Of. 1980), análisis hidrométrico (ASTM D422 – 63 Reapproved 1998) y peso unitario (PUG – 05, Procedimiento Peso Unitario).

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico y los límites de Atterberg, permiten clasificar el material como arena limosa (SM), de acuerdo a lo establecido en la clasificación USCS. La Figura 1313 presenta la curva de distribución granulométrica obtenida para este material. En ella se aprecian tanto los resultados obtenidos por en el análisis granulométrico en base a tamices como el resultado de la hidrometría.

De estos valores se desprende que el material corresponde a una arena fina, pobremente graduada, en donde el 41% pasa bajo la malla 200. Adicionalmente, si se considera que los limos corresponden a aquellas partículas cuyo diámetro nominal varía entre los 0,05 – 0,002 mm, y que las arcillas son aquellas cuyo diámetro es inferior a 0,002 mm, se tiene que la arena limosa utilizada en esta memoria presenta un 17% de limos y un 10% de arcillas.

Adicionalmente, en la Tabla 33 se entrega un resumen de las propiedades índice del material, así como también los resultados obtenidos del ensayo de peso unitario.

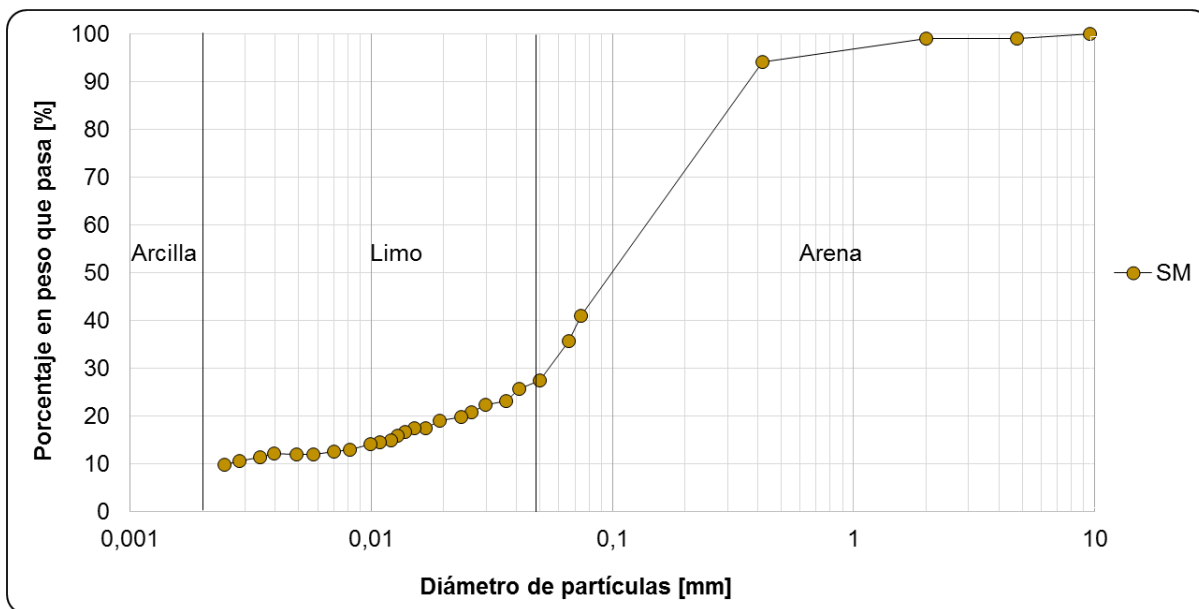


Figura 13: Distribución granulométrica del material a ensayar.

Tabla 3: Propiedades Índice y Densidad máxima seca compactada

Peso Específico		2,507
Límite Líquido	[%]	N/D*
Límite Plástico	[%]	N/P**
Densidad Seca	[gr/cm ³]	1,497

* No detectado (N/D) / ** No presenta (N/P)

3.2. Ensayo del Papel Filtro

El ensayo del papel filtro puede realizarse de dos formas diferentes; en contacto y sin contacto con la muestra de suelo. En ambos casos, la muestra de suelo es colocada junto con el papel filtro en un recipiente hermético, por un período mínimo de 7 días, hasta que se logre el equilibrio entre ambos elementos. Durante este tiempo, el recipiente hermético es mantenido dentro de una caja de poliestireno expandido, con la finalidad de la temperatura no varíe en más de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, cuando la variación exterior es de $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Cuando el papel filtro se encuentra en contacto con el suelo llega al equilibrio del flujo de agua que se produce entre ambos, permitiendo medir la succión matricial.

Cuando se ejecuta la metodología de no contacto, este equilibrio se logra a través de la presión parcial del vapor del aire encapsulado en el recipiente hermético en el cual se ejecuta el ensayo, permitiendo obtener el valor de la succión total.

En ambas situaciones, una vez alcanzado el equilibrio, tanto la muestra de suelo analizada como el papel filtro presentan la misma succión, la cual se determina midiendo el contenido de agua gravimétrico que presenta el papel filtro, correlacionándolo con la succión mediante curvas de calibración.

El procedimiento en detalle establecido para llevar a cabo este ensayo se presenta en el anexo A.1. "PUG 19 Rev. 01 Determinación del potencial de succión por medio del ensayo del papel filtro", el cual fue desarrollado basado en la ASTM D5298 – 10, incluyendo las consideraciones necesarias para poder obtener al final del ensayo un aproximado de la curva característica del agua.

Cabe mencionar que el procedimiento detallado en la ASTM D5298 – 10 entrega la metodología requerida para obtener un punto de la curva característica del agua, por tanto si lo que se requiere es tener una curva aproximada de la misma, se vuelve necesario establecer claramente los pasos a utilizar para lograr ensayar probetas a diferentes humedades.

El desarrollo de un ensayo debe estar claramente definido en cada uno de sus procesos, y no pueden quedar elementos al azar o a criterio de los laboratoristas, pues se pueden generar errores que alteren la validez del mismo.

En términos generales, para llevar a cabo esta metodología, se utilizaron probetas circulares de 7 cm de diámetro y 2 cm de altura. Para cada ensayo se utilizaron dos probetas con el mismo contenido de humedad, y se determinó en cada par de probetas tanto la succión matricial como la succión total, según como se esquematiza en la Figura 14.

La Figura 15, muestra el proceso secuencial del armado de las probetas para luego disponerlas en un recipiente de poliestireno durante el período de equilibrio. Fila superior, de izquierda a derecha: (a) disponer dentro del recipiente hermético la primera probeta a humedad definida, (b) poner papel filtro de 5 cm de diámetro, (c) ubicar un segundo papel filtro de menor diámetro (4 cm), (d) tapar con un tercer papel filtro de 5 cm de diámetro. Fila inferior, de izquierda a derecha: (e) colocar la segunda probeta a misma humedad que probeta inferior, (f) poner un o'ring, (g) disponer dos papeles filtro de 5 cm de diámetro sobre el o'ring para evitar el contacto con la probeta de suelo, (h) cerrar y rotular el recipiente hermético para disponer en la caja de poliestireno mientras se alcanza el equilibrio.

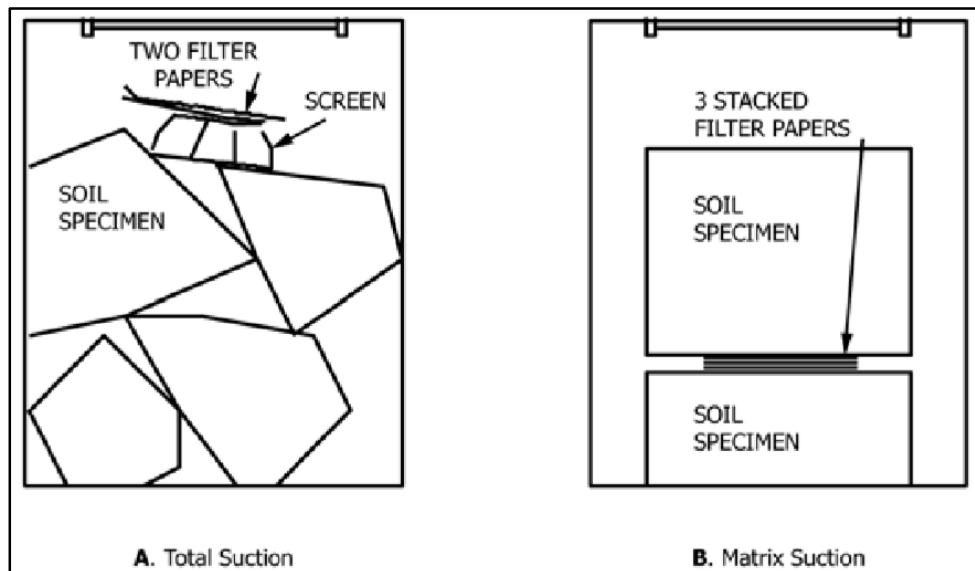


Figura 14: Esquema de la ubicación de los papeles filtro. (ASTM 5298 – 10)

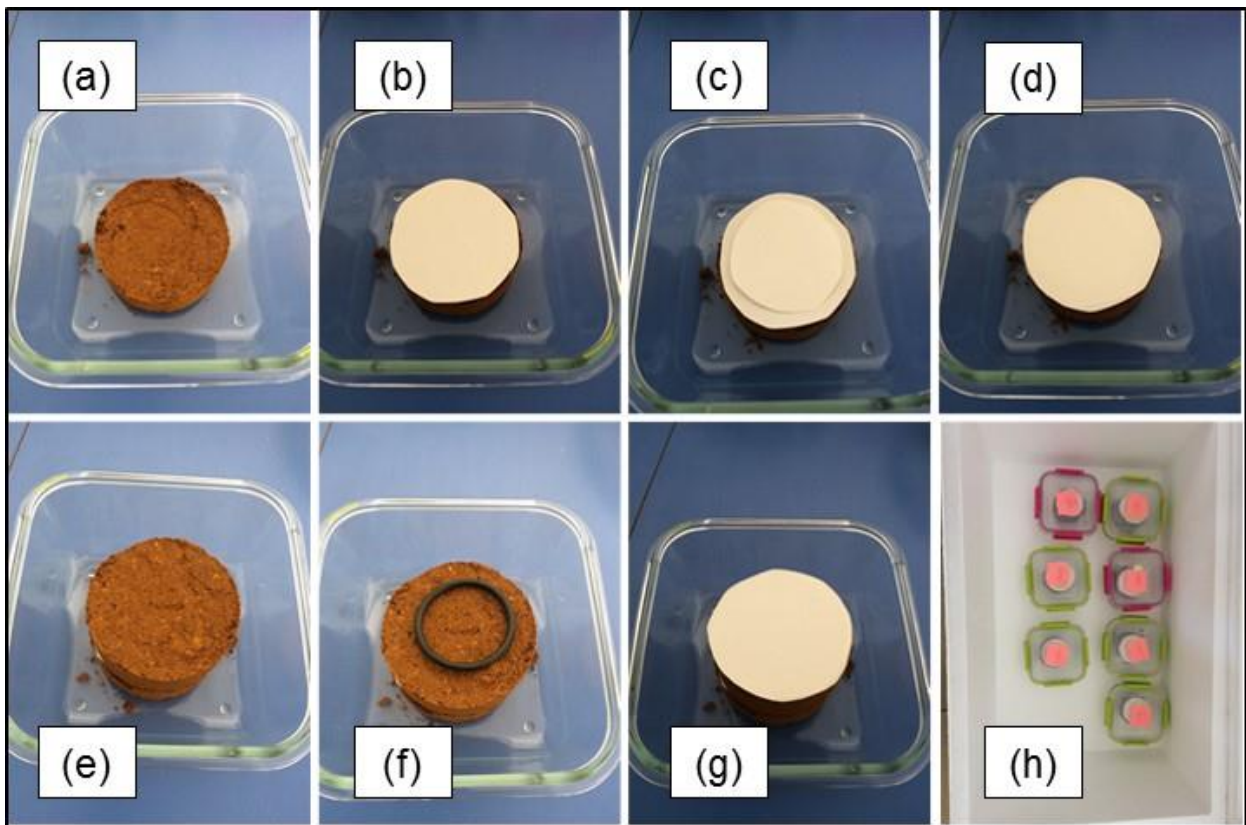


Figura 15: Secuencia de montaje de ensayo de papel filtro.

Como se mencionó en el segundo acápite los suelos presentan histéresis, por lo que se intentó generar las curvas características del agua tanto para el proceso de secado como para el proceso de humectación.

De la muestra inalterada, extraída en la prospección geotécnica, se tallaron probetas con las medidas anteriormente indicadas.

Considerando los valores obtenidos del ensayo de peso unitario, se determinó a priori la humedad de cada probeta, para luego dejarlas secando al aire. Con pesajes sucesivos se fue controlando la humedad, hasta que llegaron al peso, y por tanto humedad deseada para realizar el ensayo.

Una vez terminado el ensayo, se secaron las probetas al horno de 60 ± 5 °C, para determinar la humedad efectiva de cada probeta.

3.2.1. Humectación

Con la finalidad de obtener la curva de humectación, a las mismas probetas ensayadas se les agregó humedad. Para ello se humedecieron papeles filtro, los cuales se pusieron en ambas caras de cada probeta, y se dejaron en bolsas cerradas para que logran el equilibrio. Al igual que el proceso de secado, la humedad fue controlada mediante pesajes sucesivos.

Este procedimiento presentó algunos inconvenientes los cuales se detallan a continuación:

- Los papeles filtro humedecidos ubicados en las caras superior e inferior de la probeta lavaron parte de los finos, especialmente en aquellas probetas en las que se deseaba entregar mayor contenido de humedad. Esto provocó que las probetas perdieran parte de su masa inicial, generando inexactitud al momento de determinar a priori su contenido de humedad en base a los pesajes sucesivos.
- Los resultados del ensayo entregaron valores de succiones negativas. Esto se debió, probablemente, a que la probeta no se humectó homogéneamente, quedando el agua en los extremos de la muestra de suelo. Por tanto, el papel filtro absorbió el agua superficial, entregando valores de humedad extremadamente elevados, fuera del rango de la curva de calibración.

Es muy difícil, aún para una muestra que se encuentre sumergida en agua, que se logre una humectación homogénea, y mucho menos lograr la saturación. Así lo plantea la norma ASTM D2435/D2435M – 11, la cual hace referencia al ensayo de consolidación, y en la cual se plantea que las muestras que no son obtenidas bajo el nivel freático, y por tanto no vienen saturadas desde terreno en condiciones naturales, difícilmente lograrán la saturación estando sumergidas.

La norma indica que el sumergir las probetas a lo sumo permitirá anular los efectos de succión por capilaridad de forma superficial, por lo que recomienda tener consideración

de los efectos de los suelos parcialmente saturados al aplicar la Teoría de Terzaghi para calcular el coeficiente de consolidación.

Ante esta situación, se decide desechar los resultados obtenidos por esta metodología, y se opta por obtener la curva característica del agua en probetas remoldeadas a la misma densidad seca obtenida del ensayo de peso unitario, pero con distintos contenidos de humedad, con la finalidad de compararlas con la curva obtenida de las probetas naturales.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados tanto a las probetas inalteradas (Figura 16) como a las probetas remoldeadas (Figura 17), usando la calibración disponible en la ASTM D5298 – 10, para papel Whatman N°42, la cual se presenta en la Ecuación 15 y en la Tabla 4.

$$h = mw_f + b$$

Ecuación 15

Donde: h = presión de succión, en \log_{10} kPa,

m = pendiente de la curva de calibración del papel filtro, en \log_{10} kPa/%,

w_f = contenido de agua del papel filtro en %,

b = valor de intersección de la curva de calibración del papel filtro en \log_{10} kPa.

Tabla 4: Curva de calibración para papel filtro Whatman N° 42 (ASTM D5298 – 10)

Curva de calibración		
Humedad	m	b
<45,3	-0,0779	5,3270
>45,3	-0,0135	2,4120

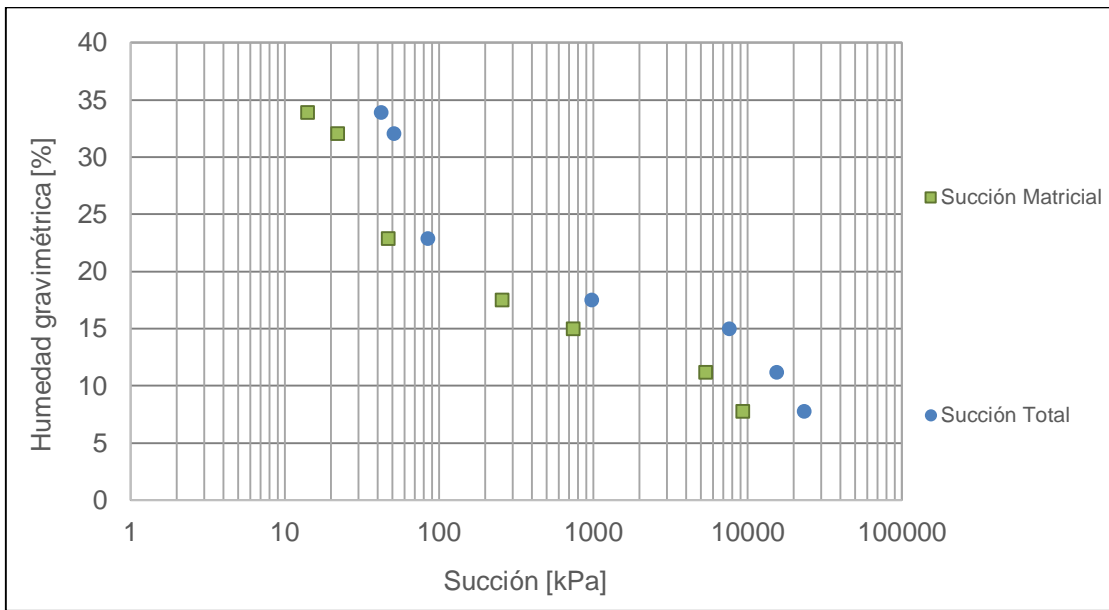


Figura 16: Curvas características del agua para las probetas inalteradas.

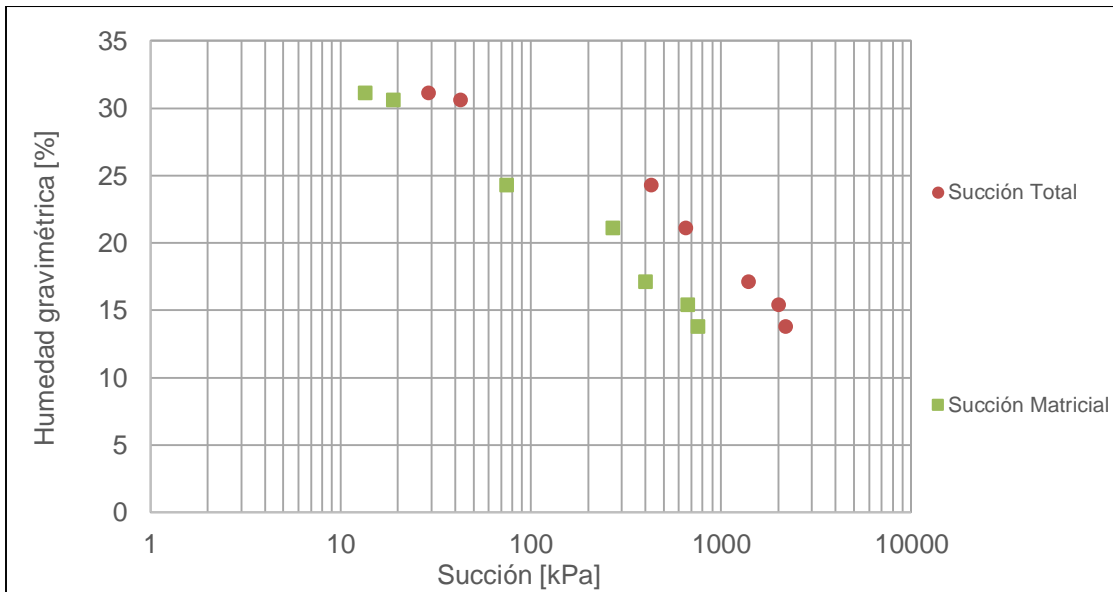


Figura 17: Curvas características del agua para las probetas remoldeadas.

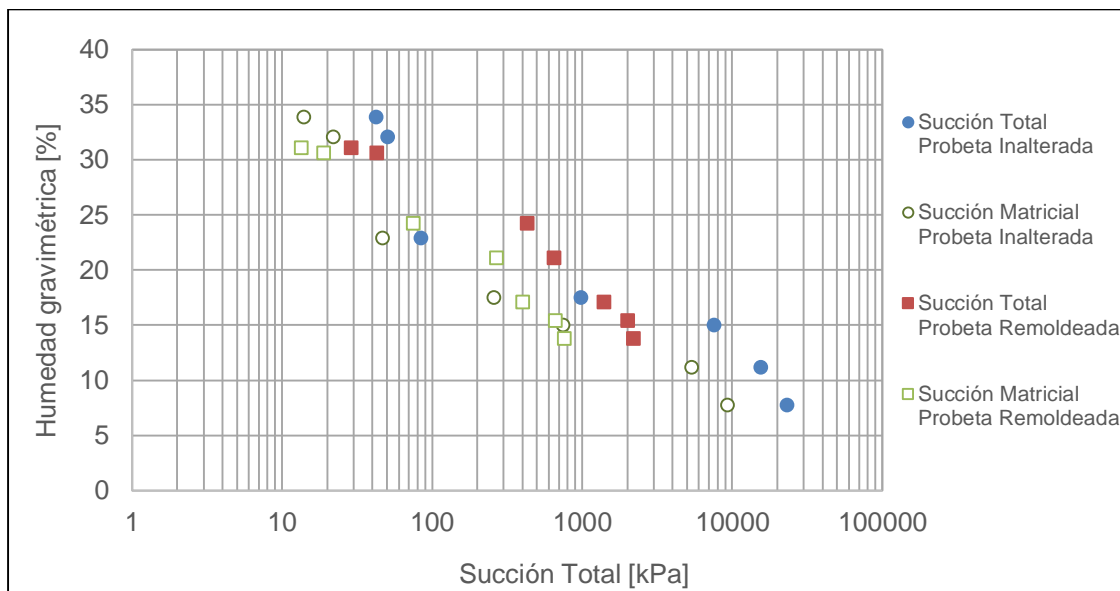


Figura 18: Curvas características del agua para las probetas inalteradas y remoldeadas.

De las figuras se desprende que la diferencia entre la succión matricial con la succión total aumenta al disminuir el contenido de humedad. Por otro lado, se tiene que tanto la tendencia de la forma de los datos, como los valores que adopta para las distintas humedades no presenta grandes variaciones entre las distintas naturalezas de las probetas. En términos generales, para este tipo de suelo, las succiones totales se encuentran en el rango de 20 – 25000 [kPa] y entre 10 – 10000 [kPa] para las succiones matriciales.

Bicalho, Correira, Ferreira, Fleureau y Marino, presentan una recopilación de otras calibraciones para evaluar la succión usando papel filtro Whatman N° 42. Todas estas calibraciones entregan el valor de la succión en \log_{10} (succión) kPa, y responden a la Ecuación 15. Usando estas calibraciones (Tabla 5) En la Figura 19 se presentan los datos obtenidos para determinar las curvas características del agua para la succión matricial de la muestra inalterada. Del mismo modo, la Figura 20 presenta los valores para la succión total.

Tabla 5: Curvas de calibración para el papel filtro Whatman N°42 (Modificado Bicalho et al).

Curvas de calibración				
Referencia	Succión [kPa]	Humedad [%]	m [\log_{10} kPa/%]	b [\log_{10} kPa]
ASTM D5298	Total y matricial	<45,3	-0,0779	5,3270
		>45,3	-0,0135	2,4120
Chandler y Gutierrez	Matricial	-	-0,0622	2,85
Chandler et al	Matricial	<47	-0,0622	4,842
		>47	-2,48*log()	6,050
Oliveira y Marino	Total y matricial	<33	-0,0839	4,83
		>33	-0,0154	2,57
Leong et al.	Total	<26	-0,0879	5,31
		>26	-0,222	8,778
Leong et al.	Matricial	<47	-0,0673	4,945
		>47	-0,0229	2,909

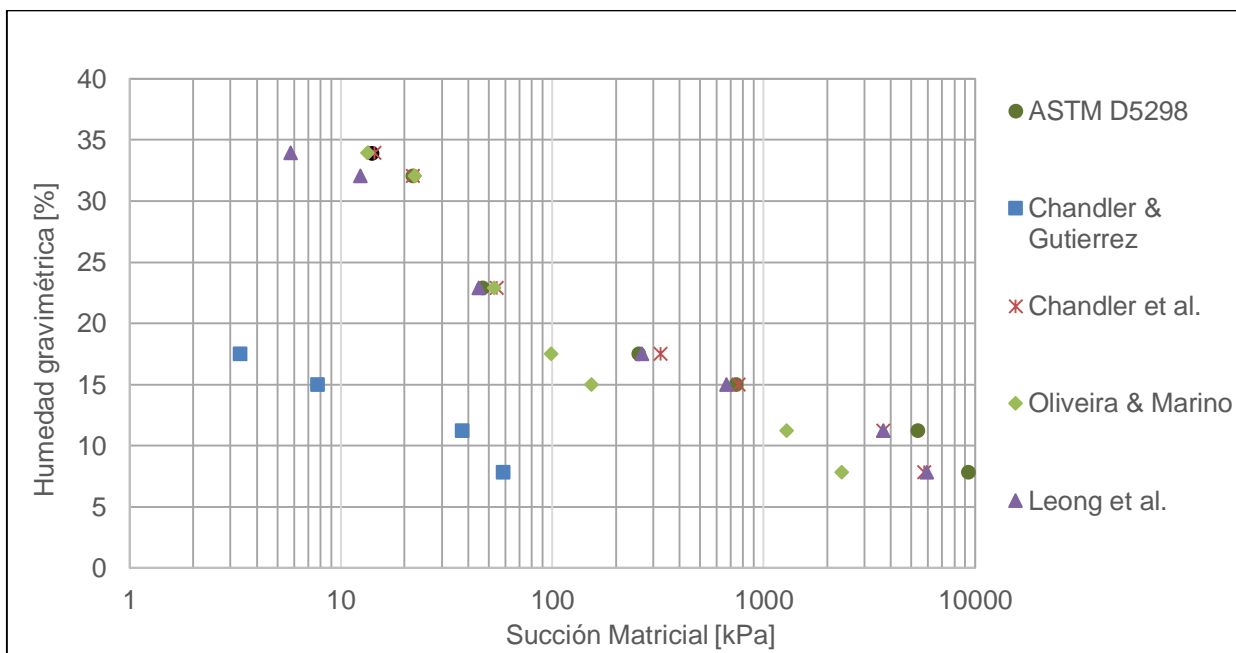


Figura 19: Curvas Características del agua para Succión Matricial de probeta inalterada.

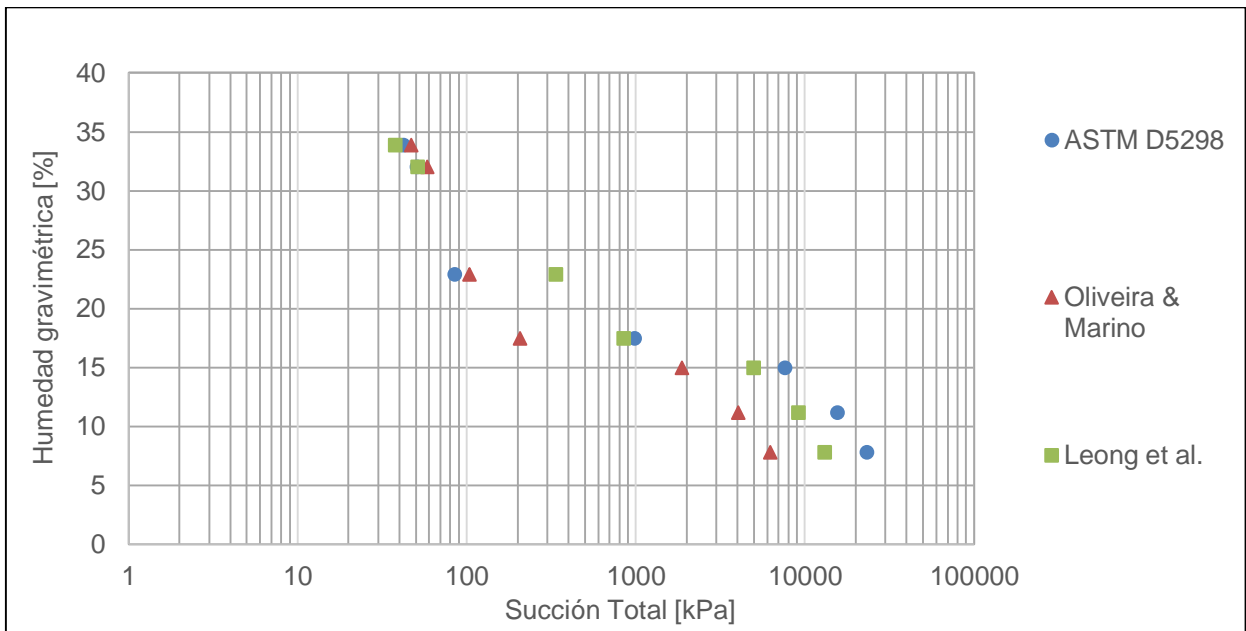


Figura 20: Curvas Características del agua para Succión Total de probeta inalterada.

En general se observa que los valores de los datos se ajustan bastante bien unos con otros, por lo que entregan cifras relativamente cercanas de succión. Solamente la calibración entregada por Chandler y Gutierrez (1986) se aleja de los otros datos obtenidos. Esta calibración presenta un rango más limitado de succiones, pues queda fuera de rango para las altas humedades. En particular Bicalho et al., indican que esta calibración es válida para rangos de succión entre los 80 – 6000 kPa.

Considerando los valores de succión matricial entregada por la calibración que entrega la ASTM D5298 – 10, para la probeta inalterada, se busca establecer la curva completa característica del agua, utilizando la Ecuación 11 de acuerdo a lo mencionado en el capítulo 2. Los valores de los parámetros definidos se presentan en la Tabla 6, y la curva se puede apreciar en la Figura 21.

Tabla 6: Parámetros Curva Característica del Agua.

Θ_s	[%]	39,5
Ψ_r	[kPa]	100000
a	[kPa]	30
n		0,85
m		0,95

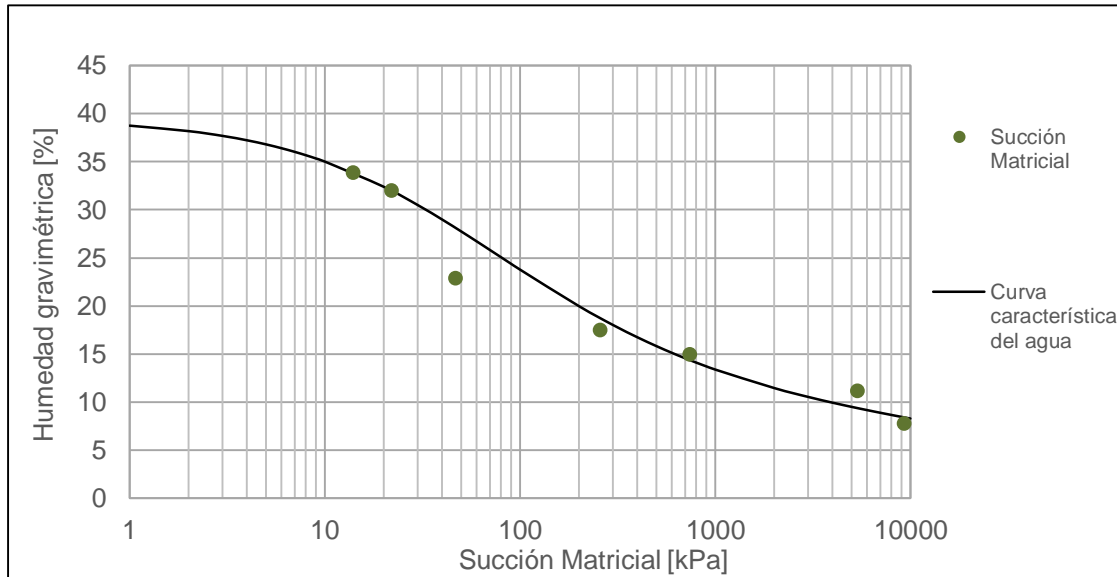


Figura 21: Curva característica del agua para succión matricial, de acuerdo a Ecuación 11.

Como el objetivo principal es implementar el ensayo de medición del potencial de succión de los suelos en el laboratorio de ONE Geotecnia, se desarrollaron los documentos necesarios de procedimiento, registro de datos, y planilla de cálculo. Dichos documentos se encuentran en los anexos A.1, A.2. y A.3.

Con los datos medidos, y utilizando la Ecuación 11, se entregará como resultado final la curva presentada en la Figura 21 para cada suelo.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados presentados obtenidos para el suelo en estudio presentan coherencia con lo expresado con la teoría. Es posible en base a los puntos obtenidos definir una curva característica del agua utilizando la ecuación presentada por Fredlund y Xing, adoptando la forma típica expresada para esta curva.

Como se mencionó, variados autores han propuesto sus propias curvas de calibración para el papel filtro Whatman N°42. Si bien existen diferencias en los valores, en términos generales las curvas comparten una forma muy similar entre ellas. Sin embargo, la curva de calibración presentada por Chandler y Gutierrez para la succión matricial, es la única que presenta discrepancia con las obtenidas por los otros autores.

De todas formas, dado que este ensayo se propone implementar de forma comercial, lo más adecuado es presentar los resultados con la calibración entregada por la ASTM D5298 – 10, pues es el documento de referencia al que tendrán acceso inmediato los posibles clientes para consultas y revisiones.

En lo que refiere a las comparaciones correspondientes entre las probetas inalteradas y las probetas remoldeadas, cabe mencionar que los valores obtenidos presentan grandes similitudes, por lo que para este material en particular no presentaría inconveniente el análisis en cualquiera de estas dos presentaciones.

Sin embargo, tanto para la succión total como para la succión matricial, se observa que a valores bajos de succión la humedad de las probetas naturales es mayor. La situación se invierte levemente para valores altos de succiones. Esta condición puede deberse a que al ser haber sido remoldeadas a la misma densidad seca de la muestra natural de suelo, el índice de vacíos y por lo tanto la cantidad y tamaño de los poros se mantiene muy similar.

Es claro que las probetas remoldeadas no presentan la misma fábrica que un suelo natural, lo que explicaría las diferencias observadas, pero entrega resultados de similares órdenes de magnitud y por tanto aceptables.

Adicionalmente es posible atribuir dicho comportamiento al bajo contenido de arcilla presente en la muestra, el cual no supera el 10% del peso total de la muestra. Cabe recordar que en los suelos finos, una parte importante del agua que se encuentra presente en los poros viene dada por el agua higroscópica, la cual se presenta producto de la posibilidad de la formación de puentes de hidrógeno entre las moléculas de agua y los átomos de oxígeno y grupos hidroxilo que constituyen la superficie de las partículas de arcilla.

Otro factor que favorece la retención de agua por parte de las arcillas viene dado por los cationes interlaminares los cuales son capaces de captar uno de los pares de electrones libres de las moléculas de agua. (J. J. Fripiat, 1970).

Si bien la metodología empleada pareciese ser exitosa, resulta interesante poder comparar los datos obtenidos con los resultados presentados por otros autores que han utilizado esta misma metodología.

Para ello se presenta en la Tabla 7 un resumen de las propiedades índice de los suelos comparativos. Asimismo se incorpora si las muestras estudiadas son de naturaleza inalterada (In.) o remoldeadas (Rem.).

Tabla 7: Cuadro comparativo de propiedades índices.

Autor	Nombre muestra	USCS	% Grava	% Arena	% Limo	% Arcilla	% L. Líquido	% L. Plástico	Peso específico	Densidad seca [gr/cm ³]	Naturaleza muestra
Carrasco, J. (2016)	S/N	SM	1	72	17	10	N/D	N.P.	2,51	1,50	In.
											Rem.
Gallegos, G. et al (2011)	S/N	SM	0	69	29	2	N/D	38	2,38	1,49	Rem.
Fattah, M. et al (2012)	Rafasa 1	CL	0	4	52	44	34	19	2,74	-	In.
	Rafasa 2	ML	0	3	66	31	45	27	2,76	-	In.
	Rafasa 3	CL	0	2	47	51	54	27	2,78	-	In.
	Rafasa 4	CL	0	2	44	54	64	25	2,79	-	In.
	Rafasa 5	CL	0	2	46	52	73	29	2,80	-	In.
Almeida, E. et al (2015)	PVA	-	0	92	2	6	-	-	2,66	1,61	In.
	S	-	0	84	5	11	-	-	2,65	1,61	In.
	LA	-	0	88	4	8	-	-	2,68	1,67	In.
	RQ ₀	-	0	90	4	6	-	-	2,73	1,70	In.
	LVA	-	0	88	5	7	-	-	2,63	1,67	In.
Bicalho, K. et al	Perafita	SM	20	67	12	1	33	25	2,66	1,64	Rem.
Mendes, J. et al	M1	SC	8	22	37	33	33	17	2,64	-	Rem.
	M2	SC	8	22	37	33	33	17	2,64	-	Rem.
	M3	SC	8	22	37	33	33	17	2,64	-	Rem.
	M4	SC	8	22	37	33	33	17	2,64	-	Rem.
	M5	SC	8	22	37	33	33	17	2,64	-	Rem.

De los autores presentados, dos estudios en particular utilizan materiales de granulometrías comparables, no así sus otras propiedades índices como los valores de límites de Atterbeg y pesos específicos.

Gallegos, Gonzáles, Leal y Mora (2011), realizaron el ensayo del papel filtro sobre material areno limoso con la finalidad de definir cómo variaba la resistencia del suelo en función de la succión. Compararon diversos modelos para determinar el que mejor se ajustaba a los datos experimentales obtenidos, para luego evaluar cómo se veía afectado el factor de seguridad de un talud de arcilla.

Bicalho et al. estudian un material areno limoso proveniente de suelos residuales generados por la meteorización de granito. Comparan los resultados obtenidos por el método del papel filtro con otras técnicas, como tensiómetros y la técnica osmótica, concluyendo que los resultados obtenidos se encuentran dentro de un rango aceptable.

Nota aparte es el estudio realizado por Fattah, Yahya y Ahmed (2012), quienes evaluaron los valores de la succión en materiales arcillosos, con granulometrías y propiedades índice muy diferentes a las del material estudiado en esta memoria. Sin embargo resulta

interesante observar sus resultados pues los materiales estudiados presentan valores de succiones mayores a una humedad determinada. Esta situación vendría a reafirmar el concepto de que las arcillas presenten mayor capacidad de retención de agua, producto de su estructura laminar, la cual no sólo permite generar poros más pequeños, sino que además presenta interacciones químicas con las moléculas de agua que le rodean.

La Figura 22 presenta las granulometrías comparativas de estos tres estudios abordados en detalle. Y las Figuras 23 y 24 presentan los resultados de succión determinados por los autores, comparándolos con los obtenidos en este trabajo de memoria.

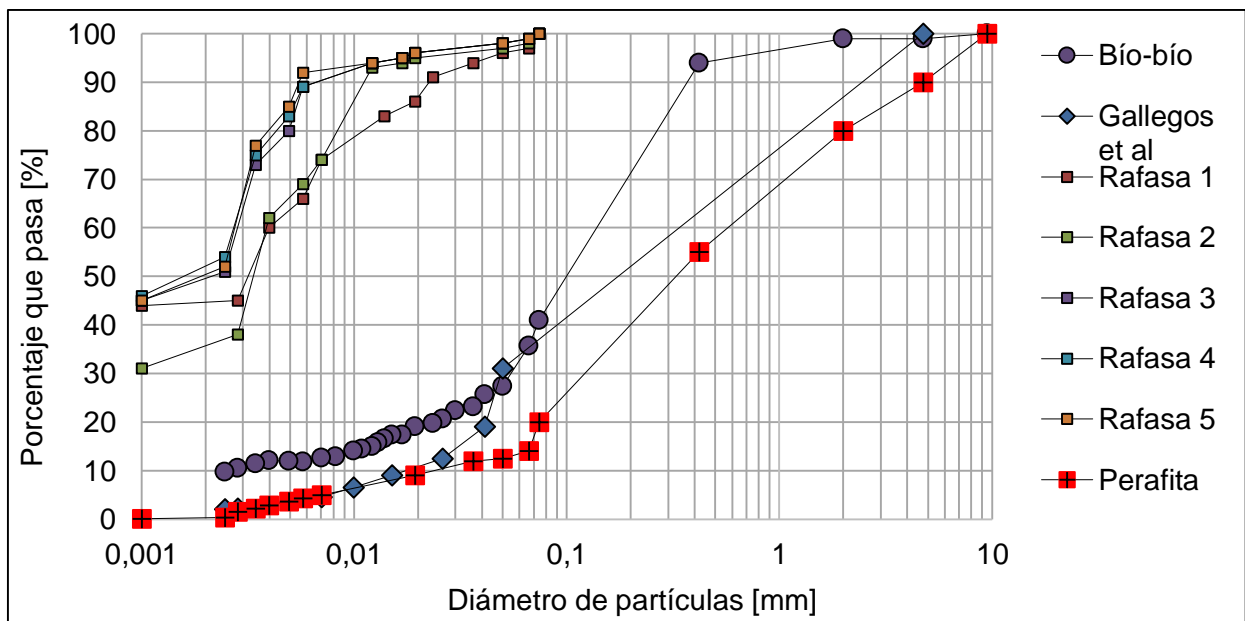


Figura 22: Distribución granulométrica de materiales estudiados por diferentes autores.

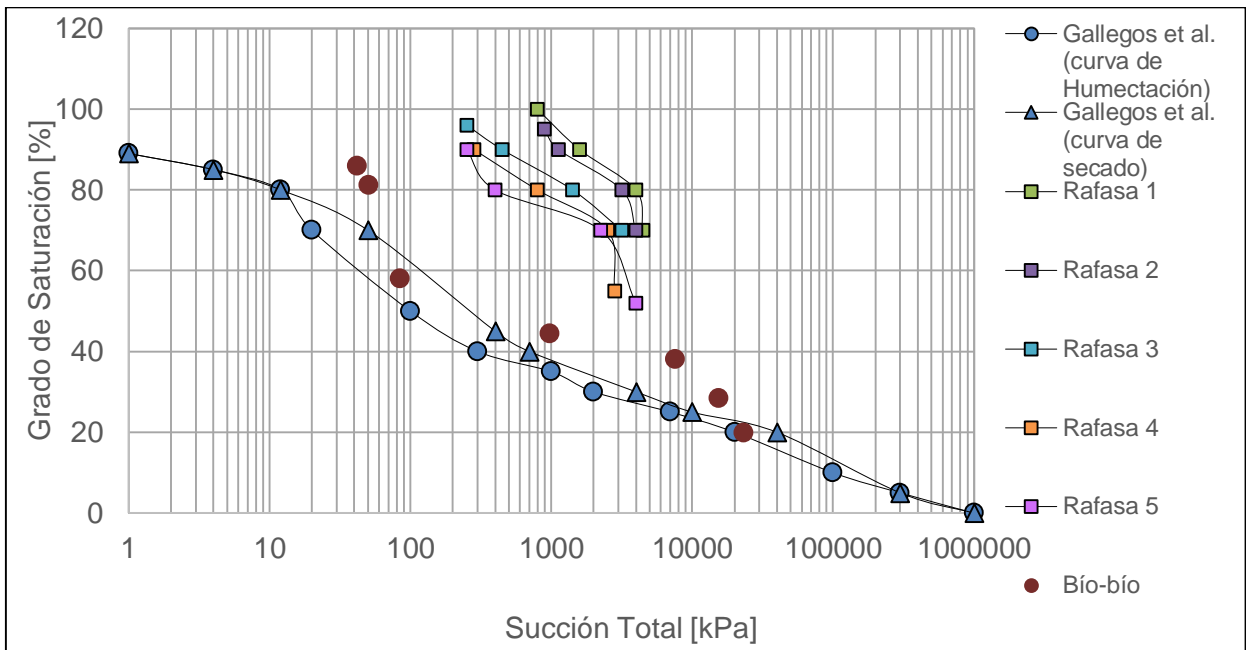


Figura 23: Succión total de diferentes materiales.

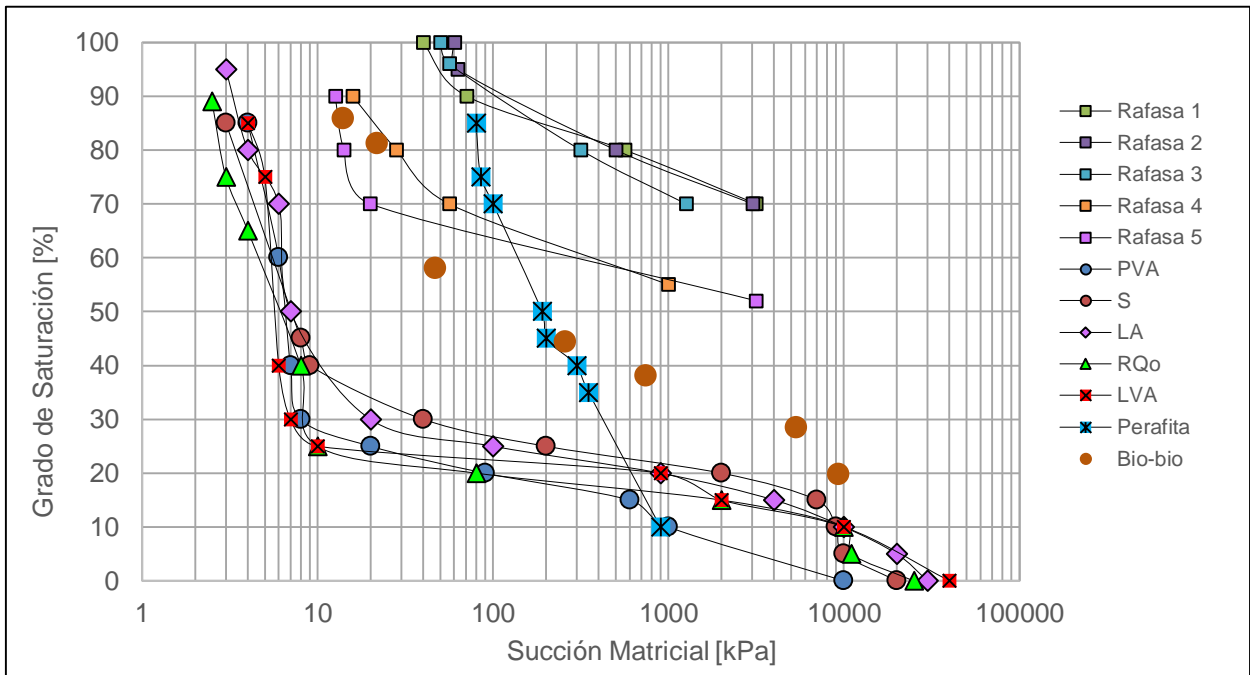


Figura 24: Succión matricial de diferentes materiales.

De los gráficos se observa que el material analizado en este trabajo de memoria cuenta con un mayor porcentaje de arcillas que las arenas estudiadas por Gallegos et al.,

Almeida et al. o Bicalho et al., pero es claramente más granular que el analizado por Fattah et al. Asimismo, las curvas de succión se encuentran en rangos medios, respondiendo de forma similar a las distribuciones granulométricas.

En particular, para el caso de la succión total es posible apreciar que la forma de la curva es muy similar a la planteada por Gallegos et al., siendo éste el material que mayor similitud granulométrica presenta con las muestras ruta 160 de la región del Bío – Bio.

Finalmente, y en lo que respecta a la succión matricial, se observa una clara diferencia entre la muestra del Bío – Bio y la perafita. Probablemente se deba a que ésta última presenta un contenido de arcilla muy por debajo a las otras muestras presentadas, lo que genera que el rango de succiones sea mucho más acotado, lo que se aprecia en la verticalidad de la curva.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Las conclusiones de la investigación son las siguientes:

- La incorporación del parámetro de la succión en la caracterización del suelo permite generar una comprensión más completa del comportamiento del mismo. Tal como se expresó en este trabajo, la succión al estar relacionada con la humedad, afecta la resistencia, permeabilidad y variaciones volumétricas de los suelos, en especial aquellos con un alto contenido de finos.
- Comprender cómo se ve alterada la resistencia ante distintos estados de saturación, permite generar un análisis más preciso que lleven a soluciones más acotadas para diversas obras de ingeniería.
- En lo que respecta a la implementación del ensayo en sí, se puede considerar que ésta labor fue lograda con éxito. Se obtuvieron resultados coherentes, acordes a lo esperado por la teoría y alineados con los valores obtenidos por otros autores, guardando las distancias correspondientes debido a las diferencias en los tipos de muestras estudiadas.
- Es trabajo pendiente seguir replicando el ensayo, tanto para el mismo suelo como para otro tipo de material. La realización nuevamente del ensayo para el mismo suelo va de la mano con la repetitividad y reproductibilidad del mismo, ambos conceptos íntimamente ligados al sistema de calidad, lo cual asegura que al obtener valores similares, los resultados obtenidos son confiables desde el punto de vista de la ejecución del procedimiento.
- La metodología escogida presenta un nivel de dificultad medianamente alto en su ejecución, debido a que los tiempos requeridos para alcanzar el equilibrio son

prolongados, por lo que un error durante su desarrollo no podrá ser evaluado hasta el final del ensayo, varios días después de su inicio.

- Si bien el trabajo experimental dio sus frutos, es posible generar una mejora al respecto. Se decidió trabajar con bolsas plásticas de cierre hermético para el pesaje de los papeles filtro antes y después del secado, y aunque esta opción es parte de la metodología presentada en la ASTM D5298 – 10, también se encuentra la opción de utilizar contenedores metálicos.
- Se plantea la opción de adquirir los contenedores metálicos, pues las bolsas plásticas presentan dificultad de manipulación, lo que podría poner en riesgo la correcta ejecución del ensayo. Esto se ampara en que la norma hace hincapié en que el traspaso de los papeles filtro a los recipientes (bolsas) no tome más de cinco segundos para evitar la variación en la humedad de los mismos.
- La llamada cohesión aparente de los suelos se encuentra ligada al nivel de humedad presente en el suelo, por lo que se desprende que las variaciones en la succión, hacen variar la cohesión aparente de los suelos respecto a la cohesión efectiva cuando se tiene una condición saturada. Si bien en la práctica ingenieril generalmente se desestima el aporte de la cohesión a la resistencia al corte, como una forma de aumentar los factores de seguridad, el considerar sus variaciones dentro de los análisis permitiría generar soluciones más acotadas, sobre todo en zonas donde se conoce que el comportamiento del suelo no será del tipo saturado.

6.2. Recomendaciones

Debido al potencial de este tema de investigación, se recomienda continuarlo a través de estudios comparativos entre distintas metodologías de medición de succión. Una arista interesante de estudio podría ser comparar los resultados obtenidos por medio del método del papel filtro con mediciones in situ realizadas con tensiómetros.

En lo que respecta a la variación del comportamiento de los suelos, una línea de estudio podría estar abocada a la obtención de la curva de permeabilidad y correlacionarla con la curva característica del agua, para evaluar la capacidad de infiltración. Este tema podría generar interés sobre todo en obras de ingeniería tales como rellenos sanitarios o tranques de relaves.

Si se considera que la muestra utilizada en este estudio proviene de una zona donde se presentan fallas locales de taludes, es de gran interés establecer la variación de la resistencia con las curvas características del agua obtenidas en este trabajo. De esta forma se podría modelar la variación del factor de seguridad en función de las condiciones climáticas del sector, generando un mapeo de riesgo de desestabilización. Esto permitiría generar soluciones acordes a la zona de estudio.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ASTM D422 – 63 (Reapproved 1998), Standard Test Method for Particle – Size Analysis of Soils, 2008. 22p.
- ASTM D5298 – 10, Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, 2010. 6p.
- ASTM D6836 – 02 (Reapproved 2008), Standard Test Method Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge, 2008. 22p.
- ASTM D2435/D2435M – 11, Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, 2011. 15p.
- Alfaro, M., (2008). Geotecnia en Suelos no Saturados. *Ciencias de la Tierra XXXII (125)*, 471 – 481.
- Almeida, E., Teixeira, A., Silva Filho, F., Assis Júnior, R., & Oliveira Leão, R., (2015). Filter paper method for the determination of the soil water retention curve. *R. Bras. Ci. Solo*, 39, 1344 – 1352. doi: 10.1590/01000683rbc20140546.
- Bicalho, K., Gomes, A., Ferreira, S., Fleureau, J – M., & Marinho, F. Filter paper method of soil suction measurement.
- Brooks, R., & Corey, A., (1964). Hydraulics properties of porous media. En A.T. Corey, R. E. Dils, & V.M. Yevdjevich (Ed), *Hidrology papers* (pp. 1 – 37). Fort Collins, Colorado: Colorado State University.
- Childs, E., & Collins – George, N., (1950). The Permeability of Porous Materials. *Procedings of the Royal Society a Mathematical, Physical and Engineering Science*, 201(1066). doi: 10.1098/rspa.1950.0068.

- Fattah, M., Yahya, A., & Ahmed, B., (2012). Total and Matric Suction Measurement of Unsaturated Soil in Baghdad Region by Filter Paper Method. *Journal of Engineering*, 18 (5), 611 – 620.
- Fredlund, D., & Mongerster, N., (1977). Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103 (GT5), 447 – 466.
- Fredlund, D., Xing, A., & Huang, S., (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil – water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (3), 533 – 546.
- Fredlund, D., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (4), 521 – 532.
- Fredlund, D. (1995). The Scope of Unsaturated Soil Mechanics: an overview. *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*, Paris – Francia, pp 23.
- Fredlund, D., Xing, A., Fredlund, M., & Barbour, S., (1996). The Relationship of the Unsaturated Soil Shear Strength Function to the Soil – Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 32: 40 – 448.
- Fredlund, D., & Vanapalli, S., (2002). Shear strength of unsaturated soil. *Agronomy Soil Testing Manual*, 329 – 361.
- Fripiat, J. J., Interacción agua – arcilla [en línea] Portal de Revistas UCCOR Biblioteca Digital. < <http://revistas.bibdigital.uccor.edu.ar/index.php/AC/article/viewFile/723/575>> [consulta: 20 de Abril 2017]
- Gallegos, G., Rojas, E., Leal, J., & Mora, R. (2011). Efecto de la succión en la estabilidad de un talud de arena limosa. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIII (3), 271 – 281.
- Haines, W, (1930). Studies in the physical properties of soil. V. The hysteresis effect in capillary properties, and the modes of moisture distribution associated therewith. *The Journal of Agricultural Science*, 20 (1): 97 – 11. doi: 10.1017/S002185960008864X.

- Instituto Nacional de Normalización (INN). 1980. NCh 1532 Of.80: Mecánica de suelos: Determinación de la densidad de partículas sólidas. 20 de Diciembre de 1980. 11p
- Instituto Nacional de Normalización (INN). 1979. NCh 1515 Of.79: Mecánica de suelos: Determinación de la humedad. 22 de Diciembre de 1978. 7p
- Instituto Nacional de Normalización (INN). 1979. NCh 1517/1 Of.79: Mecánica de suelos – Límites de consistencia – Parte 1: Determinación del límite líquido. 14 de Febrero de 1979. 11p
- Instituto Nacional de Normalización (INN). 1979. NCh 1517/2 Of.79: Mecánica de suelos – Límites de consistencia – Parte 2: Determinación del límite plástico. 26 de Febrero de 1979. 11p
- Instituto Nacional de Vías. E – 157: Determinación de la succión de un suelo con el método del papel filtro. 5p.
- Laboratorio de Ensayes de Mecánica de Suelos ONE GEOTECNIA S.p.A. 2015, PUG – 05 Procedimiento Peso Unitario, de Marzo de 2015. 6p.
- López, N., & Mendoza, J., (2016). Study of Unsaturated Soils by Coupled Numerical Analyses of Water Flow – Slope Stability. *Groundwater – Contaminant and Resource Management*. 163 – 191.
- Mendes, J., Gallipoli, D., Augarde, C., Toll, D., & Medero, G. Suction measurements of a sandy – clay soil with the filter paper technique.
- Meza, V., (2005). *Influencia de la Succión Matricial en el Comportamiento Deformacional de dos Suelos Expansivos*, Magíster en Ingeniería no publicada, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Ministerio de Obras Públicas. 2012. Manual de Carreteras, Volumen N°8, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Diciembre 2011
- Morell, I., Lección 6, Infiltración [en línea] Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas. < <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionRH06.pdf> > [consulta: 18 de Julio 2016]

- Narasimhan, T., (2007). Central Ideas of Buckingham (1907): A Century Later. *Vadose Zone Journal* 6 (4), 687 – 693. doi: 10.2136/vzj2007.0080.
- Pan, H., Qing, Y., Pei – yong, L., (2010). Direct and Indirect Measurement of Soil Suction in the Laboratory. *EJGE*, 15.
- Servicio Nacional de Geología y Minería Subdirección Nacional de Geología, 2003. Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. 2003. 25p.
- Toro, Y., Contreras, V., & Galdames, S. (2009). *Comportamiento y criterios de evaluación de la estabilidad de taludes en suelos residuales y arcillas muy preconsolidadas*, Diploma mecánica de suelos aplicada no publicada.
- Van Genuchten, M., (1980). A Closed – form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, 44, 892 – 898.
- Wesley, L. (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils*. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc.

8. ANEXOS

A.1. PUG 19 Rev. 01 “Determinación del potencial de succión por medio del ensayo del papel filtro”

El siguiente anexo corresponde al procedimiento interno generado para la ejecución del ensayo del método del papel filtro, tanto en contacto como sin contacto. Dicho procedimiento se encuentra basado en la norma ASTM D5298 – 10.

Adicionalmente se han incluido las consideraciones necesarias para obtener probetas a diferentes humedades, ya sean naturales o remoldeadas, para así obtener cinco puntos de la curva característica del agua.

	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.	Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 1 de 11

PROCEDIMIENTO

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DEL PAPEL FILTRO

COPIA CONTROLADA

“Si este documento es impreso, la copia impresa pasará a ser una Copia No Controlada”

	Preparado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Nombre	Javiera Carrasco Elgueta	Omar Núñez Esper	Omar Núñez Esper
Fecha			
Firma			

Cualquier pregunta o comentario sobre este procedimiento debe ser dirigido a su administrador :

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

	<p align="center">DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO</p> <p align="center">Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.</p>	<p>Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 2 de 11</p>
---	---	--

<p><u>EI GERENTE DE CALIDAD</u></p>
--

1 OBJETIVO

Establecer la metodología para determinar empíricamente cinco (5) puntos de la curva característica del agua, tanto para probetas naturales como remoldeadas. Determinar empíricamente la curva característica del agua.

2 ALCANCE

En este procedimiento se definen los siguientes procesos

- Preparación de la muestra
- Ejecución del ensayo
- Cálculo

3 REFERENCIAS

- ASTM D5298 – 10, Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, 2010. 6p.
- Chile. Instituto Nacional de Normalización (INN). 1980. NCh 1532 Of.80: Mecánica de suelos: Determinación de la densidad de partículas sólidas. 20 de Diciembre de 1980. 11p.
- Laboratorio de Ensayos de Mecánica de Suelos ONE GEOTECNIA S.p.A. 2015, PUG – 05 Procedimiento Peso Unitario, de Marzo de 2015. 6p.

4 RESPONSABILIDAD


Gerente de Calidad: Tiene la responsabilidad de:

- Gestionar la implementación de los procedimientos internos y externo
- Mantener actualizados y aplicables los procedimientos internos y externo
- Gestionar la implementación de la normativa vigente.

Gerente Técnico. Tiene la responsabilidad de:

- Controlar la implementación de los procedimientos internos.
- Controlar y asesorar el uso de equipo e instrumentos de laboratorio.
- Asesorar sobre la ejecución de ensayos.
- Revisar los resultados de ensayo y controlar la supervisión de los trabajos de ensayo.
- Coordinar la digitación de informes.

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

	<p align="center">DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO</p> <p align="center">Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.</p>	<p>Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 3 de 11</p>
---	---	--

Jefe de Laboratorio. Tiene la responsabilidad de:

- Supervisar la ejecución de ensayos.
- Controlar la disponibilidad de insumos, herramientas o cualquier elemento necesario para la ejecución de ensayos.
- Controlar la aplicación de los procedimientos de ensayos.
- Cumplir con la ejecución del programa de trabajos de ensayos.
- Controlar el uso de equipos e instrumentos de laboratorio.
- Mantener comunicación con los clientes, con respecto a los trabajos de ensayo solicitados.
- Enviar programación, con los plazos de entrega de informes.
- Programar los ensayos a realizar.
- Mantener actualizada la información de los ensayos realizados.
- Controlar la producción de ensayos realizados.
- Revisar que los registros de ensayo estén conforme al control de registros.

Coordinador de Ingresos. Tiene la responsabilidad de:

- Recibir, revisar e ingresar las muestras nuevas.
- Recibir los registros de ensayo en terreno y estratigrafías.
- Coordinar con el Jefe de Laboratorio el almacenamiento de muestras nuevas.
- Identificar las muestras nuevas con un número muestra.
- Informar al Coordinador de ensayos de solicitudes específicas de los clientes.

Digitador. Tiene la responsabilidad de:

- Calcular los ensayos realizados.
- Digitar los ensayos realizados en las carpetas correspondiente a cada proyecto.
- Informar al Jefe de Laboratorio de cualquier desviación. (falta de información, corrección sin identificación).
- Digitar los informes finales.

Ayudante de Laboratorio. Tiene la responsabilidad de:

- Ejecutar los ensayos asignados.
- Chequear los elementos que necesita utilizar, para ejecutar los ensayos asignados.
- Aplicar lo descrito en los procedimientos de ensayo.

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

	<p align="center">DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO</p> <p align="center">Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.</p>	<p>Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 4 de 11</p>
---	---	--

5 TERMINOLOGÍA

Atmósfera: unidad de presión igual a 76 cm de mercurio o a 101 kPa a 0°C.

Succión matricial, hm (kPa): Presión negativa (expresada como un valor positivo), relativa a la presión atmosférica del agua presente en el suelo. La succión matricial es una función de la humedad relativa debido a la diferencia entre la presión de aire y la presión de agua a lo largo de la superficie del agua; la humedad relativa o la presión del vapor de agua disminuyen en la medida que el radio de curvatura de la superficie de agua disminuye.

Succión osmótica, hs (kPa): presión negativa a la cual un reservorio de agua pura debe ser sometido para lograr el equilibrio a través de una membrana semipermeable con un reservorio que contiene una solución idéntica en composición con el agua del suelo; la humedad relativa disminuye debido a la presencia de sales disueltas en el agua de los poros.

pF: unidad de la presión negativa expresada como logaritmo de base diez de la altura en centímetros de lo que una columna de agua se debe elevar por la acción de la capilaridad.

Humedad relativa del suelo: es la razón de la presión de vapor del agua de los poros del suelo, con respecto a la presión de vapor de agua pura libre.

Potencial total (kPa): corresponde a la suma de los potenciales gravitacionales, de presión, osmóticos y presión de aire. El potencial total puede ser identificado con la succión cuando los potenciales gravitacionales y de presión de aire son despreciados.

Succión total del suelo (kPa): presión negativa, relativa a la presión de aire, a la cual se ve sometido un reservorio de agua pura para llegar al equilibrio con el agua del suelo, a través de una membrana semipermeable que es permeable solamente a la moléculas de agua. La succión total del suelo (expresada como un valor positivo) es la suma de la succión osmótica (soluto) y la succión matricial.

Muestras Alteradas o Perturbadas: Porción de suelo cuya estructura no corresponde a la dispuesta en terreno, sin embargo, su distribución de partículas si es representativa de la condición natural.

Muestras Inalteradas o No Perturbadas: Porción de suelo que posee una estructura definida presentándose como un bloque intacto de material, es decir conservando sus condiciones de humedad y estructura respecto a las condiciones in situ.

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO	Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 5 de 11
	Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.	

6 DESCRIPCIÓN

6.1 Preparación de la muestra inalterada

1. Determinar el peso unitario seco y contenido de humedad de la muestra, de acuerdo al procedimiento PUG – 05 Rev. 04
2. Determinar la densidad de las partículas sólidas, de acuerdo a la norma NCh 1532 Of. 80.
3. Calcular el índice de vacíos teórico de acuerdo a la siguiente expresión:

$$e = \frac{G_s \gamma_o}{\gamma_d} - 1$$

Donde: G_s = densidad de las partículas sólidas,
 γ_o = densidad del agua, considerar 1,0 gr/cm³,
 γ_d = densidad seca del suelo, gr/cm³.

4. Calcular el grado de saturación de la muestra de acuerdo a la siguiente expresión:

$$S_0 = \frac{G_s w}{e}$$

Donde: w = humedad de la muestra.

5. Establecer cinco grados de saturación para la realización del ensayo. Se recomienda utilizar los siguientes valores:

$$S_1 = \frac{S_0}{5}$$

$$S_2 = \frac{2 * S_0}{5}$$

$$S_3 = \frac{3 * S_0}{5}$$

$$S_4 = \frac{4 * S_0}{5}$$


$$S_5 = S_0$$

6. Determinar el contenido de humedad teórico asociado a cada grado de saturación establecido, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$w = \frac{S e}{G_s}$$

7. Tallar 10 probetas de 7 cm de diámetro y 2 cm de altura.

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.	Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 6 de 11

8. Por cada ensayo de succión se utilizarán dos probetas de suelo las cuales deben encontrarse a la misma humedad. Para ello se debe estimar el peso húmedo de cada probeta, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$m_h = V * \gamma_d(1 + w)$$

Donde: m_h = masa húmeda de la probeta, gr,
 V = volumen de la probeta

9. Dejar las probetas secando al aire hasta que alcancen los pesos establecidos. Controlar con pesajes sucesivos. La periodicidad de los pesajes dependerá de la temperatura ambiente y el tipo de material a ensayar. Se recomienda inicialmente pesar cada una hora.

6.2 Preparación de la muestra alterada

- Determinar el peso unitario seco y contenido de humedad de la muestra, de acuerdo al procedimiento PUG – 05 Rev. 04
- Determinar la densidad de las partículas sólidas, de acuerdo a la norma NCh 1532 Of. 80.
- Calcular el índice de vacíos teórico de acuerdo a la siguiente expresión:

$$e = \frac{G_s \gamma_o}{\gamma_d} - 1$$

Donde: G_s = densidad de las partículas sólidas,
 γ_o = densidad del agua, considerar 1,0 gr/cm³,
 γ_d = densidad seca del suelo, gr/cm³.

- Calcular el contenido de humedad de la muestra al cual se tiene el 100% del grado de saturación, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$w_0 = \frac{S_0 e}{G_s}$$

Donde: S_0 = porcentaje de saturación, usar valor igual a 100%.

- Establecer cinco contenidos de humedad para la realización del ensayo. Se recomienda utilizar los siguientes valores:

$$w_1 = \frac{w_0}{6}$$

$$w_2 = \frac{2 * w_0}{6}$$

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.	Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 7 de 11

$$w_3 = \frac{3 \cdot w_0}{6}$$

$$w_4 = \frac{4 \cdot w_0}{6}$$

$$w_5 = \frac{5 \cdot w_0}{6}$$

6. Secar como mínimo 3000 gr de material a 60 ± 5 °C, hasta alcanzar masa constante.
7. Separar en cinco bolsas plásticas material seco (m_s). Se recomienda utilizar un mínimo de 500 gr por bolsa.
8. Agregar agua a cada bolsa para entregarle cada una de las humedades previamente definidas. La cantidad de agua a agregar se determina como sigue:

$$v_a = m_s * \frac{w_i}{100}$$

Donde: v_a = volumen de agua, ml,

m_s = masa de material seco contenido en cada bolsa, gr,


w_i = contenido de humedad previamente establecido, %.

9. Sellar la bolsa y dejar homogeneizar por 24 horas.
10. Remoldear 2 probetas de 7 cm de diámetro y 2 cm de altura, por cada bolsa.

6.3 Ensayo – Papel filtro

1. Secar el papel filtro en un horno de secado a 110 ± 5 °C, por al menos 16 horas, una vez transcurrido ese periodo, se deja el papel en un desecador hasta el momento en que sea utilizado.
2. Colocar la muestra de suelo inalterada o remoldeada dentro de un recipiente hermético, teniendo la precaución de que su masa sea entre 200 y 400 g. El volumen de la muestra debe llenar la mayor parte del recipiente, para reducir los tiempos requeridos para alcanzar el equilibrio.
3. Si se desea medir la succión total, se deben tomar dos papeles filtros del desecador y poner inmediatamente dentro del contenedor con la muestra, sin que se genere contacto con ella. Para ello se recomienda poner un o-ring entre la muestra y el papel, u otro elemento con área reducida. Este elemento debe ser inerte al efecto de la oxidación, por lo que no se recomienda usar metales.
4. Si se desea medir la succión matricial, se debe poner tres papeles filtros en contacto con el suelo. Los papeles filtros exteriores deben tener un diámetro entre 3 a 4 mm

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.	Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 8 de 11

milímetros mayores que el papel central. Esto ayuda a prevenir el contacto directo con el papel central. La Figura 1 esquematiza la correcta manera de poner los papeles filtros de acuerdo a cada una de las metodologías explicadas.

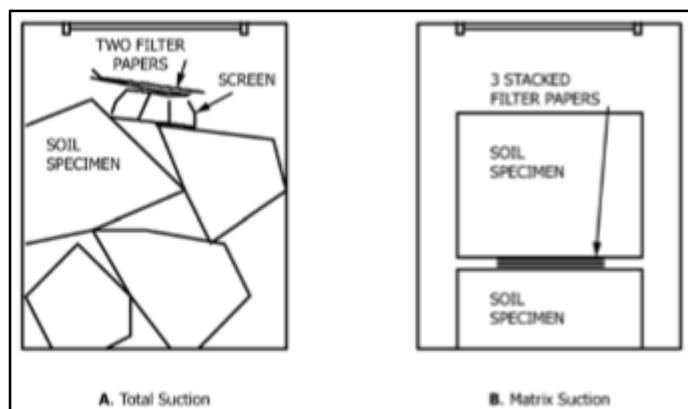


Figura 11: Esquema de la ubicación de los papeles filtro. (ASTM 5298 – 10)

5. Se cierra el recipiente herméticamente y se deja en un contenedor de poliestireno expandido que permita aislar de los cambios de temperatura, no permitiendo variaciones mayores a 3 °C. La succión entre el papel filtro y la muestra de suelo deberá llegar al equilibrio al cabo de 7 días.
6. Al final del periodo de equilibrio, tomar los dos papeles filtro (si se ha medido la succión total) o el papel central (si se ha medido la succión matricial), y registrar inmediatamente su masa. Se sugiere que para minimizar la pérdida de agua durante la medición de la masa, cada papel filtro sea colocado dentro de una bolsa plástica, a la cual se le debe determinar su masa previamente; y que la operación del traspaso desde el contenedor con la muestra a la bolsa no dure más de 5 seg. Utilizar guantes de látex y pinzas para esta operación.
7. Secar el papel filtro en un horno de secado a 110 ± 5 °C, por al menos dos horas, y luego colocar en el desecador entre 2 a 3 min. mientras se enfría. Traspasar el papel filtro a una bolsa plástica, a la cual se le debe determinar su masa previamente. Determinar la masa seca del papel. Utilizar guantes de látex y pinzas para esta operación.
8. Con los datos obtenidos determinar el contenido de agua del papel filtro y, usando las curvas de calibración, establecer la succión de la muestra de suelo.

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.	Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 9 de 11

6.4 Expresión de los resultados

Todos los cálculos para la realización del ensayo y posterior a éste serán realizados por los digitadores.

Cálculos para cada papel filtro:

$$M_f = M_2 - T_h$$

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c$$

Donde: M_f = masa seca del papel filtro, gr.,

M_2 = masa seca total, gr.,

T_h = masa bolsa plástica previa al pesado seco, gr.,

M_w = masa de agua del papel filtro, gr.,

M_1 = masa húmeda total, gr.,

T_c = masa bolsa plástica previa al pesado húmedo, gr.

El contenido de agua del papel filtro se calcula como sigue:

$$w_f = 100 \frac{M_w}{M_f}$$

Donde: w_f = contenido de agua del papel filtro, %.

Determinación de la succión:

$$h = mw_f + b$$

Donde: h = succión, kPa,

m = pendiente de la curva de calibración, \log_{10} kPa/%,

b = intercepción de la curva de calibración del papel filtro, \log_{10} kPa.

La curva de calibración responde a los siguientes parámetros:

Tabla 12: Valores curva de calibración. (ASTM 5298 – 10)

Rango de humedad	m	b
<45.3	5.327	-0.0779
>45.3	2.412	-0.0135

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.	Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 10 de 11

Determinar por iteración los parámetros de la curva característica del agua propuesta por Fredlund and Xing (1994).

$$\theta = \theta_s \left(1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 1000000/\psi_r)} \right) \left[\frac{1}{\ln(e + (\psi/a)^n)} \right]^m$$

Donde: ψ = Succión total en kPa,

e = número de Euler,

ψ_r = Succión total en kPa, correspondiente al contenido de agua residual θ_r ,

a = parámetro del suelo que se encuentra relacionado con el valor de entrada de aire, en kPa,

n = parámetro del suelo que controla el punto de inflexión de la curva característica del agua,

m = parámetro del suelo que se encuentra relacionado con el contenido de agua residual.

7 CORRECCIONES

Cuando se necesite hacer correcciones en la información registrada en los casilleros del formulario, se deberá hacer de la siguiente forma:

- a. Tachara la información anotada
- b. Registrar la información nueva (la ubicación debe ser lo más cercana al casillero original)
- c. Registrar las iniciales del nombre y sus dos apellidos, más la fecha de la modificación y la firma.

8 INCERTIDUMBRE

Para determinar la incertidumbre en este ensayo, se consideraran los siguientes factores:

- a) Registro de Calibraciones;
- b) Registro de verificaciones;
- c) Registro de mantenciones;

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO Sistema de Gestión Laboratorio de ensayos de Mecánica de Suelos. ONE GEOTECNIA S.p.A.	Código : PUG-19 Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017 Página : 11 de 11

- d) Registro de repetividad y reproducibilidad;
- e) Registro de producción;
- f) Registro de aptitudes;

Para efecto de revisión de los resultados obtenidos en laboratorio, se revisarán y compararán con registros estratigráficos y fotográficos. Todos los cálculos serán revisados con la planilla de cálculo de respectiva.

9 EQUIPOS


- Recipientes para humedad.
- Horno de secado regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza con precisión de 0.1g
- Guantes de Seguridad.
- Papel filtro tipo II, Whatman N° 42.
- Recipiente hermético.
- Bolsas plásticas.
- Caja de poliestireno expandido.
- Balanza analítica de 0.0001 gr. de legibilidad.
- Desecador.
- Gel de sílice.
- Guantes de látex.
- Pinzas.

Preparado por: Gerente Técnico	Revisado por: Gerente Calidad.	Aprobado por: Gerente General	Revisión : 01 Fecha : 24/03/2017
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

A.2. FUG 19 – 1 Rev. 01 “Formulario de registro de datos”

A continuación se presenta el formulario para la adquisición de datos elaborado como parte del procedimiento requerido por el departamento de calidad del laboratorio.

Un formato único de registro evita errores, pérdida de información, y permite establecer la trazabilidad de la información generada durante el desarrollo del ensayo.

	Ensayo del potencial de succión por medio del método del papel filtro Sistema de gestión Laboratorio de ensayos de mecánica de suelos ONE GEOTECNIA S.P.A	Código : FUG-19-1 Revisión: 1 Fecha: 14-12-2016 Página: 1 de 2
	Referencia: PUG 19 Rev.01	

Nº Proyecto		Fecha Ensayo	
Nº Muestra		Realizado por:	

1. IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS

Horno	HOR -
Balanza	BL -
Desecador	DSC -

2. DATOS

Masa Unitario seco [gr/cm ³]	
Cont. de humedad [%]	
Masa Especifico	

3. CONFECCIÓN DE PROBETAS INALTERADAS

Prob.	Diámetro [cm]			Altura [cm]		
	d1	d2	d3	h1	h2	h3
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Prob.	Masa húm. estimada [gr]	Masa Húmeda (hora 0) [gr]	Masa Húmeda (hora 1) [gr]	Masa Húmeda (hora 2) [gr]	Masa Húmeda (hora 3) [gr]	Masa Húmeda (hora 4) [gr]	Masa Húmeda (hora 5) [gr]	Masa Húmeda (hora 6) [gr]
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

4. CONFECCIÓN DE PROBETAS REMOLDEADAS

Bolsa	Masa seca [gr]	Humedad estimada [%]	Agua agregada [ml]
1			
2			
3			
4			
5			

REVISADO POR:		FECHA:	
----------------------	--	---------------	--

Nº Proyecto	Fecha Ensayo
Nº Muestra	Realizado por:

5. DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN TOTAL

Ensayo	Masas Húmedas [gr]				Masas secas [gr]			
	Bolsa 1	Total 1	Bolsa 2	Total 2	Bolsa 1	Total 1	Bolsa 2	Total 2
1								
2								
3								
4								
5								

6. DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN MATRICIAL

Ensayo	Masas húm. [gr]		Masas secas [gr]	
	Bolsa	Total	Bolsa	Total
1				
2				
3				
4				
5				

7. TIEMPO DE EQUILIBRIO

Ensayo	Fecha Inicio	Fecha Término
1		
2		
3		
4		
5		

8. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LAS PROBETAS

Ensayo	Masa suelo Húmeda + cápsula [gr]	Tara [gr]	Masa suelo seco + tara [gr]			Humedad [%]
			(hora 0)	(hora 1)	(hora 2)	
1						
2						
3						
4						
5						

8.1. IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS

Horno	HOR -
Balanza	BL -

REVISADO POR:	FECHA:
---------------	--------

A.3. Formato Informe y planilla de cálculo

El presente anexo se compone de dos partes. La primera, conformada por la primera hoja, corresponde a formato final con que se presentarán los resultados por parte del Laboratorio de Suelos ONE Geotecnia.

La segunda parte, formada por las cuatro páginas siguientes, corresponden a las planillas de cálculo a utilizar en el laboratorio.

Cabe destacar que este anexo corresponde a un único archivo de extensión .xlsx, por lo que al ser presentado como documento impreso no es posible revisar o evaluar las fórmulas incluidas en las celdas del mismo. Sin embargo, todos los cálculos que se realizan se encuentran claramente detallados en el Anexo A.1.

INFORME N° XXXX-0-16
ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE SUCCIÓN POR EL MÉTODO DEL PAPEL FILTRO

Proyecto		Fecha Inicio	
Ubicación		Fecha Término	
Mandante		Jefe Laboratorio	

Identificación de la Muestra

Muestra N°	
Pozo N°	
Estrato	
Prof. (m)	

Antecedentes de la Muestra

Clasificación USCS	
Tipo de probetas	Natural

Datos de la muestra

Densidad seca	[gr/cm3]	1,50
Cotenido de humedad natural	[%]	17,7
Peso específico		2,51
Índice de vacíos		0,67
Grado de Saturación	[%]	65,8

Potencial de Succión

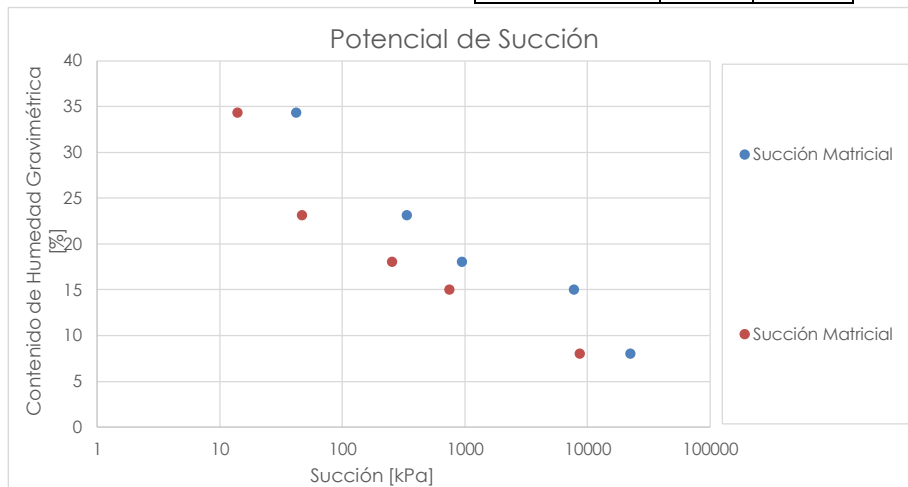
Contenido de Humedad [%]	Grado de Saturación [%]	Tiempo de Equilibrio [días]	Succión Total [Log ₁₀ kPa]	Succión Total [kPa]	Succión Matricial [Log ₁₀ kPa]	Succión Matricial [kPa]
8,0	29,8	7	4,4	22420,9	3,9	8656,6
15,0	55,9	7	3,9	7728,3	2,9	749,0
18,1	67,2	7	3,0	941,9	2,4	254,1
23,2	86,1	7	2,5	336,4	1,7	46,9
34,3	127,6	7	1,6	42,0	1,1	14,0

Curva Característica del Agua

$$\theta = \theta_s \left(1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 1000000/\psi_r)} \right) \left[\frac{1}{\ln(e + (\psi/a)^n)} \right]^m$$

Parámetros

		Total	Matricial
θ _s	[%]	39,5	39,5
ψ _r	[kPa]	10000000	100000
a	[kPa]	90	40
n		0,7	0,9
m		1	1



Observación: Ensayo realizado según procedimiento interno PUG 19 Rev. 01, basado en la norma ASTM D5298 - 10

DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO
Sistema de Gestión
Laboratorio de Ensayes de Mecánica de Suelos
ONE GEOTECNIA S.p.A.

1. CONFECCIÓN DE PROBETAS INALTERADAS

1.1 DATOS

Peso Unitario seco [gr/cm ³]	1,497
Cont. de humedad [%]	17,7
Gravedad específica	2,507
Índice de vacíos	0,67
Saturación inicial [%]	65,8

	Saturación [%]	Humedad [%]
1	13,2	3,5
2	26,3	7,1
3	39,5	10,6
4	52,6	14,2
5	65,8	17,7

Curva de calibración		
Humedad	m	b
<45,3	-0,0779	5,3270
>45,3	-0,0135	2,4120

1.2 Masas PROBETAS

Prob.	Diámetro [cm]			Altura [cm]			Volumen [cm ³]	Masa húmeda [gr]
	d1	d2	d3	h1	h2	h3		
1	7,00	7,02	6,98	1,98	2,01	1,99	76,71	118,90
2	6,89	7,12	7,04	2,03	2,00	1,99	77,59	120,27
3	6,95	7,03	6,99	1,96	1,98	1,98	75,73	121,39
4	7,05	6,98	7,02	2,14	2,10	2,06	81,20	130,17
5	7,03	7,14	7,09	1,99	1,97	2,00	78,36	129,76
6	6,97	6,88	6,91	1,97	1,96	1,95	73,72	122,07
7	7,20	7,12	7,16	2,06	2,05	1,99	81,87	139,91
8	6,93	6,95	6,96	1,96	1,96	1,95	74,16	126,73
9	7,14	7,12	7,10	2,01	2,00	2,03	80,16	141,24
10	6,91	6,96	6,95	2,08	2,05	2,01	77,42	136,41

2. DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN TOTAL

Ensayo	Masas Húmedas [gr]				Masas secas [gr]			
	Bolsa 1	Total 1	Bolsa 2	Total 2	Bolsa 1	Total 1	Bolsa 2	Total 2
1	1,9455	2,5448	2,1108	2,4480	2,6442	3,1763	2,4930	2,7929
2	1,9194	2,4365	1,8296	2,2137	2,4220	2,8589	2,1190	2,4429
3	1,8023	2,3762	1,9156	2,5279	1,1971	1,6382	2,2209	2,6908
4	1,9149	2,4385	1,8498	2,5303	2,1034	2,4883	2,0672	2,5681
5	1,8283	2,2913	1,9403	2,4143	2,0051	2,2972	1,9377	2,2370

Ensayo	M. seca papel [gr]		M. de agua [gr]		Cont. de agua [%]		Succión total [log ₁₀ kPa]			Estado
	Papel 1	Papel 2	Papel 1	Papel 2	Papel 1	Papel 2	Papel 1	Papel 2	Prom.	
1	0,5321	0,2999	0,0672	0,0373	12,6	12,4	4,3	4,4	4,4	Ok
2	0,4369	0,3239	0,0802	0,0602	18,4	18,6	3,9	3,9	3,9	Ok
3	0,4411	0,4699	0,1328	0,1424	30,1	30,3	3,0	3,0	3,0	Ok
4	0,3849	0,5009	0,1387	0,1796	36,0	35,9	2,5	2,5	2,5	Ok
5	0,2921	0,2993	0,1709	0,1747	58,5	58,4	1,6	1,6	1,6	Ok

3. DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN MATRICIAL

Ensayo	Masas húm. [gr]		Masas secas [gr]		Masa seca [gr]	M. agua [gr]	Contenido de agua [%]	Succión mat. [log ₁₀ kPa]
	Bolsa	Total	Bolsa	Total				
1	1,8761	2,1760	2,1303	2,3848	0,2545	0,0454	17,8	3,9
2	1,8361	2,0232	2,3233	2,4656	0,1423	0,0448	31,5	2,9
3	1,9558	2,3510	2,1821	2,4695	0,2874	0,1078	37,5	2,4
4	2,0513	2,8894	1,9399	2,4810	0,5411	0,2970	54,9	1,7
5	1,9014	2,4457	1,9214	2,2023	0,2809	0,2634	93,8	1,1

4. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LAS PROBETAS

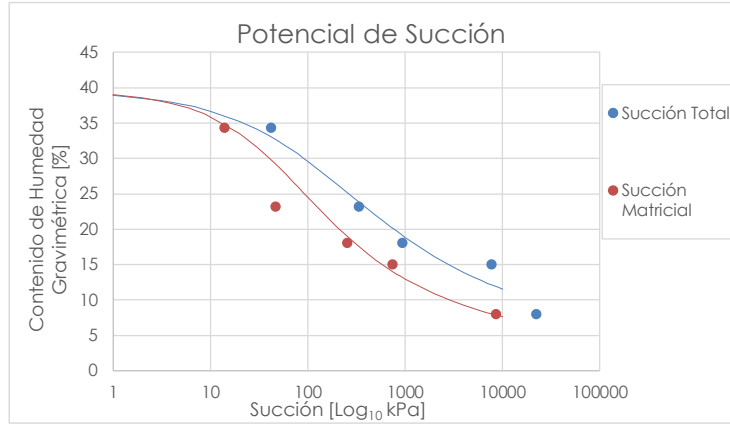
Ensayo	Masa suelo húmedo + cápsula [gr]	Tara [gr]	Masa suelo seco + tara [gr]			Humedad [%]
			(hora 0)	(hora 1)	(hora 2)	
1	256	75,6	242,8	242,6	8,0	
2	210	89,2	194,9	194,2	15,0	
3	227	101,6	208,6	207,8	18,1	
4	230	86	203,1	202,9	23,2	
5	240	102,3	205,2	204,8	34,3	

5. DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL AGUA

	Total	Matricial
Succión	Hum.	Hum.
kPa	%	%
1	38,892	38,985
2	38,526	38,554
3	38,221	38,159
4	37,953	37,789
5	37,709	37,438
6	37,483	37,103
7	37,273	36,783
8	37,075	36,475
9	36,887	36,179
10	36,708	35,894
20	35,243	33,474
30	34,126	31,597
40	33,208	30,073
50	32,424	28,798
60	31,738	27,709
70	31,127	26,764
80	30,576	25,933
90	30,075	25,195
100	29,615	24,534
200	26,385	20,319
300	24,411	18,094
400	23,016	16,663
500	21,953	15,642
600	21,104	14,866
700	20,402	14,25
800	19,808	13,743
900	19,296	13,318
1000	18,848	12,953
2000	16,149	10,887
3000	14,778	9,9017
4000	13,896	9,28
5000	13,259	8,8345
6000	12,768	8,4908
7000	12,373	8,2125
8000	12,043	7,9795
9000	11,763	7,7794
10000	11,519	7,6042

6. PARÁMETROS

	Total	Matricial
Θ_s	[%] 39,5	39,5
Ψ_r	[kPa] 10000000	100000
a	[kPa] 90	40
n	0,7	0,9
m	1	1



DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN POR MEDIO DEL ENSAYO DE PAPEL FILTRO
 Sistema de Gestión
 Laboratorio de Ensayes de Mecánica de Suelos
 ONE GEOTECNIA S.p.A.

1. CONFECCIÓN DE PROBETAS REMOLDEADAS

1.1 DATOS

Peso Unitario seco [gr/cm ³]	
Cont. de humedad [%]	
Gravedad específica	
Índice de vacíos	
Humedad al S=100% [%]	

Humedad [%]	
1	
2	
3	
4	
5	

Curva de calibración		
Humedad	m	b
<45,3	5,3270	-0,0779
>45,3	2,4120	-0,0135

1.2 PESOS PROBETAS

Bolsa	Masa seca [gr]	Cont. agua [ml]	Masa por probeta (2 por bolsa) [gr]
1			
2			
3			
4			
5			

2. DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN TOTAL

Ensayo	Masa húmedas [gr]				Masas secas [gr]			
	Bolsa 1	Total 1	Bolsa 2	Total 2	Bolsa 1	Total 1	Bolsa 2	Total 2
1								
2								
3								
4								
5								

Ensayo	M. seca papel [gr]		M. de agua [gr]		Cont. de agua [%]		Succión total [log ₁₀ kPa]			Estado
	Papel 1	Papel 2	Papel 1	Papel 2	Papel 1	Papel 2	Papel 1	Papel 2	Prom.	
1										
2										
3										
4										
5										

3. DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN MATRICIAL

Ensayo	Masas húm. [gr]		Masas secos [gr]		Masa seca [gr]	M. agua [gr]	Contenido de agua [%]	Succión mat. [log ₁₀ kPa]
	Bolsa	Total	Bolsa	Total				
1								
2								
3								
4								
5								

4. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LAS PROBETAS

Ensayo	Masa suelo húmedo + cápsula [gr]	Tara [gr]	Masa suelo seco + tara [gr]			Humedad [%]
			(hora 0)	(hora 1)	(hora 2)	
1						
2						
3						
4						
5						

5. DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL AGUA

Succión	Total	Matricial
kPa	Hum. %	Hum. %
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		
100		
200		
300		
400		
500		
600		
700		
800		
900		
1000		
2000		
3000		
4000		
5000		
6000		
7000		
8000		
9000		
10000		

6. PARÁMETROS

	Total	Matricial
Θ_s	[%]	
Ψ_r	[kPa]	
a	[kPa]	
n		
m		

