

RELACIONES SUCCIÓN-HUMEDAD Y COMPORTAMIENTO VOLUMÉTRICO DE ARCILLAS LACUSTRES FISURADAS POR DESECACIÓN.

Jorge Arturo Pineda Jaimes¹, Diego Alejandro García López²

¹PhD, MSc, Coordinador de Investigación, Facultad de Ingeniería Civil, Maestría en infraestructura Vial, Universidad Santo Tomás, Colombia.

²Auxiliar de Investigación, Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Colombia.

¹e-mail: jorgepineda@usantotomas.edu.co. ²e-mail: diegogarcial@usantotomas.edu.co.

RESUMEN

El subsuelo del occidente de la Sabana de Bogotá, en la cordillera Central de Colombia, está conformado por suelos arcillosos de origen lacustre que presentan fisuras superficiales causadas por pérdidas de humedad, las cuales han dado origen a patologías en estructuras livianas afectando el uso de estas. Para entender el comportamiento mecánico de estos suelos lacustres, ante cambios de humedad, es necesario determinar relaciones de succión-humedad, las cuales permitirán establecer parámetros que permitan la modelación del terreno para luego aplicar métodos que permitan mejorar los diseños y los procedimientos constructivos de obras civiles.

PALABRAS CLAVES: Arcilla, propiedades de retención de humedad, desecación, succión, arcillas fisuradas.

WATER RETENTION PROPERTIES AND VOLUMETRIC BEHAVIOR OF FISSURED-DESSICATED LACUSTRINE CLAYS.

ABSTRACT

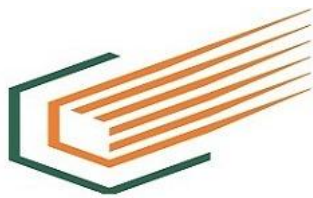
The subsoil of western "Sabana de Bogotá", in the central mountain range of Colombia, is made up of clay soils of lacustrine origin that have surface fissures caused by moisture losses, which have given rise to pathologies in lightweight structures affecting the use of these. To understand the mechanical behavior of these lacustrine soils face of changes in humidity, it is necessary to determine suction-moisture relations, which will allow establishing parameters that allow the modeling of terrain and then apply methods to improve the designs and constructive procedures of works civilians.

KEY WORDS: Clay, water retention properties, desiccation, suction, fissured clay.

1. INTRODUCCIÓN

El subsuelo del occidente de la Sabana de Bogotá, en la cordillera Central de Colombia, está conformado por un depósito profundo que contiene secuencias de arcillas y limos de alta compresibilidad y consistencia blanda, formado durante los últimos cinco millones de años en un gran lago que albergaba dicha zona. La frontera superficial de este material ha generado problemas en estructuras civiles, como se ilustra en la figura 1, donde el suelo presenta constantes cambios volumétricos generados por las variaciones de humedad por agentes como la vegetación y su absorción de agua para nutrirse o fenómenos de microclimas, evaporando más agua que la que ingresa al suelo por precipitación o escorrentía, estos agentes han causado la lenta recuperación de la humedad del suelo y sumado a las características expansivas del suelo, debido a la formación mineralógica de estos, sean sensibles a la variación de humedad. [1].

Implícitamente, el fenómeno de pérdida de humedad origina en los suelos arcillosos presiones de poros de agua negativas (llamadas también succión), permitiendo incluso condiciones de saturación parcial. Al presentarse los cambios de humedad en desecación, las fuerzas capilares controlan la respuesta volumétrica del material produciéndose contracciones que modifican propiedades tales como la resistencia al corte y la rigidez. Fenómenos secundarios como la pérdida de continuidad del suelo por agrietamientos profundos disminuyen considerablemente el nivel de servicios de la vía y estructuras en superficie [2,3], generando las patologías anteriormente mencionadas. Para estudiar el comportamiento mecánico del suelo arcilloso desecado en la



problemática descrita, las curvas de retención de humedad y las relaciones succión-comportamiento volumétrico, constituyen relaciones fundamentales que permiten determinar umbrales para los cuales se producen cambios de humedad que condicionan directamente la respuesta esfuerzo-deformación. Este artículo presenta los resultados preliminares de las relaciones succión-humedad para suelos superficiales arcillosos afectados por desecación.



Figura 1. Patologías en la vía Siberia – Tenjo, generadas por cambios volumétricos del suelo.

2. METODOLOGIA

El proyecto de investigación buscó realizar la determinación experimental de las propiedades de retención de humedad de un conjunto de arcillas superficiales, junto con la caracterización geotécnica y composicional de las mismas, en una zona localizada al occidente de la ciudad de Bogotá-Colombia, realizando dos sondeos como se ilustra en la figura 2.



Figura 2. Localización de la zona de estudio. Tomada y modificada de Google Maps (2014).

Coordenadas Sondeo 1 (S1): Latitud: $4^{\circ} 78' 03.95''$, Longitud: $-74^{\circ} 15' 87.11''$

Coordenadas Sondeo 2 (S2): Latitud: $4^{\circ} 78' 01.17''$, Longitud: $-74^{\circ} 15' 89.66''$

En la zona se realizaron dos sondeos identificados por la presencia de vegetación y la deformación de la vía; en el sondeo 1 la vegetación es escasa, en su mayoría césped y en el sondeo 2 cuenta con presencia de árboles, como se ilustra en la figura 3 a. y b. para el sondeo 1 y sondeo 2 respectivamente.

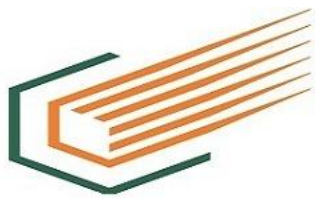


Figura 3. Zonas de extracción de muestras a. Sondeo 1 (izquierda) y b. Sondeo 2 (derecha).

Las muestras extraídas fueron sometidas a múltiples ensayos de laboratorio, con el fin de caracterizar, obtener propiedades y analizar el comportamiento del suelo, siguiendo las normas del INVIAS [4] y la ASTM [5], en la tabla 1 se muestra en detalle los ensayos realizados, norma aplicada y la cantidad de ensayos.

Ensayo	Norma		Cantidad
	INVIAS	ASTM	
Extracción de muestras tipo Shelby y SPT		D1452-09, D1586-11, D1587-08(2012)E1	55
Humedad Natural	E-122-07	D2216-10	62
Límite Líquido	E-125-07	D4318-10e1	25
Límite Plástico	E-126-07	D4318-10e1	29
Límite de Contracción	E-127-07	D4943-08	23
Gravedad Específica	E-128-07	D5550-06	29
Peso Unitario	E-217-07	D7263-09	19
Hidrometría	E-124-07	D4221-11	26
Materia Orgánica	E-121-07	D2974-13	31
Azul de Metileno	E-235-07	C837-09	10
Succión (método del papel filtro)	E-159-07	D5298-10	10

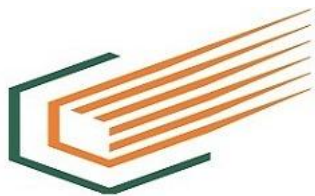
Tabla 1. Perforaciones y ensayos realizados.

Una de las muestras extraídas se ilustra en la figura 4, esta se extrajo a una profundidad no mayor de 2 metros y se identifica visualmente el alto contenido de materia orgánica, grietas, raíces y oxidaciones.



Figura 4. Muestra extraída tipo SPT.

El análisis de las propiedades de retención de humedad, en este tipo de suelos, se realizó mediante la determinación de la succión que ejerce el suelo a distintos contenidos de volumen de agua, por el método del papel filtro empleado por autores como: Fredlund [6], Lu y Likos [7], Pineda [3], entre otros y adaptado por las normas INVIAS [4] y ASTM [5].



Para determinar la succión matricial del suelo por el método del papel filtro se requiere usar un papel tipo cuantitativo; al dejar en contacto directo el papel filtro con una muestra de suelo se genera una transferencia de agua de la muestra de suelo al papel filtro o se produce un equilibrio de vapor, para lograr esto es necesario controlar la humedad y la temperatura exterior almacenando la muestra-papel filtro en un recipiente hermético. Al determinar el valor de la humedad del papel filtro se establece la succión ejercida por la matriz del suelo; para esta investigación se empleó el papel filtro Whatman # 42 calibrado por autores como: Chandler et al [8], Chandler y Gutiérrez [9] y Hamblin [10] los cuales presentan las ecuaciones (1) y (2) para determinar la succión ejercida por el suelo.

$$S \text{ (kPa)} = 10^{4,84-0,0622*\omega}; \text{ donde } \omega \leq 47\% \quad (1)$$

$$S \text{ (kPa)} = 10^{6,05-2,48*\text{Log}\omega}; \text{ donde } \omega > 47\% \quad (2)$$

Donde ω equivale a la humedad del papel filtro en porcentaje.

3. CARACTERIZACIÓN BÁSICA DEL SUELO

Las propiedades índices del suelo indican un comportamiento plástico, el límite líquido está en un rango de 100 % a 190 % indicando desde un principio que el material es de tipo arcilloso (CH-OH) y algunos casos con la presencia de limos (MH) del sistema unificado de clasificación de suelos con presencia de otros materiales que bajan el valor del límite líquido. En la figura 5 se observa los resultados obtenidos del límite de retracción (LC), límite plástico (LP), límite líquido (LL) y la humedad natural del suelo (ω_n).

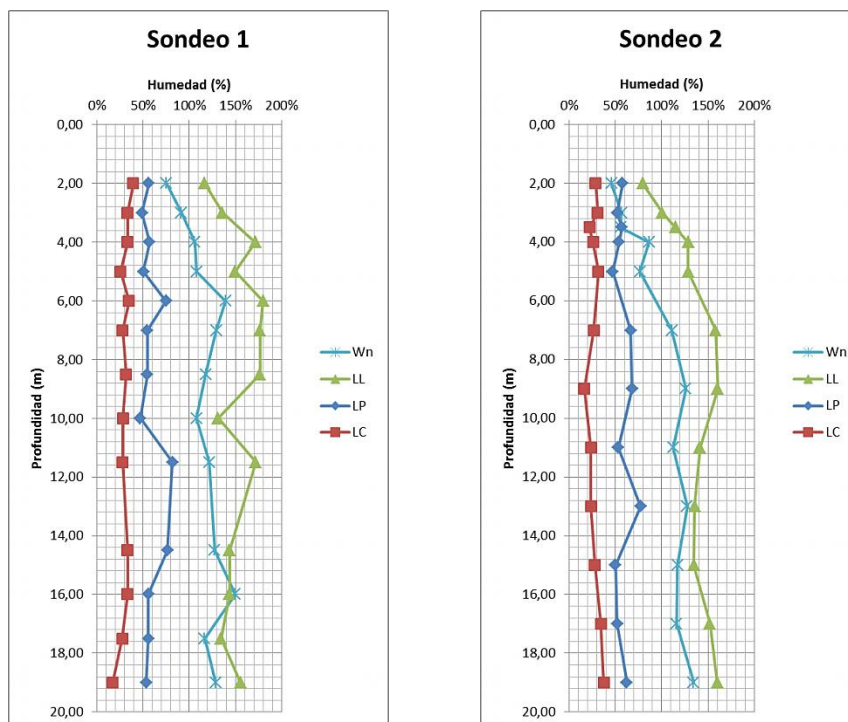
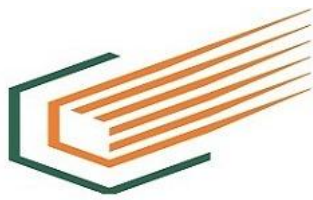


Figura 5. Propiedades índices del suelo a. Sondeo 1 y b. Sondeo 2.

La humedad natural del suelo en el sondeo 2 está cercana al valor del límite plástico con valores de humedad entre 50 % y 80 %, hasta 6 m de profundidad con un valor de límite plástico cercano al 50 %; en cambio en el sondeo 1 el límite de plasticidad también cercano al 50 % pero con valores de humedad cercanos al 100 %, esta diferencia entre los dos sondeos se presenta por los problemas de la vegetación y la absorción de agua del suelo, el Sondeo 2 está sufriendo una desecación considerable donde el suelo alcanza valores de humedad cercanos al límite de plasticidad en comparación con el Sondeo 1 donde se evidencia una menor desecación; la diferencia de humedad, entre los dos sondeos, varía en un 20 % hasta 6 m de profundidad, y a mayor



profundidad el valor de la humedad del suelo se tornan similares; por esta razón la zona de influencia de desecación oscila entre los 5 m y 6 m de profundidad.

Después de la zona de influencia, la humedad para los dos sondeos toma valores del 120 % a 130 %, estando cercanos a los valores del límite líquido que oscilan entre 140 % a 170 %, lo que da cabida a que en variaciones del contenido de agua del suelo el volumen igual será variable por las características expansivas que presenta el suelo compuesto de minerales arcillosos tales como montmorillonita e illita, como se observa la actividad de las arcillas producto de la relación del índice de plasticidad del suelo y el peso de las partículas inferiores a 2 μm expresado en porcentaje [11], ilustrada en la figura 6.

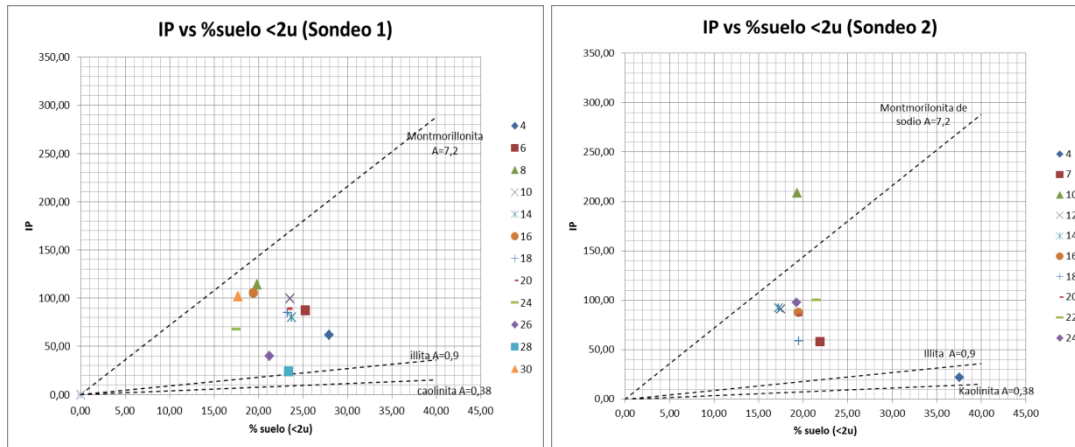


Figura 6. Actividad de las arcillas a. Sondeo 1 y b. Sondeo 2. Fuente propia.

Los minerales arcillosos con formaciones de montmorillonita e illita presentan enlaces de gibbsita de formaciones de magnesio, hierro o aluminio, al presentarse esta formación estructural fomenta una mayor atracción por el agua debido a la separación entre las capas de estas formaciones, atribuyéndole las propiedades expansivas del suelo [11,12].

La clasificación por el método del sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) indica que el material con el que se trabajó son Arcillas inorgánicas de elevada compresibilidad (CH), Arcillas orgánicas de compresibilidad media a alta (OH) y con presencia de algunos Limos inorgánicos (MH), para la clasificación se empleó la carta de Casagrande visualizada en la figura 7.

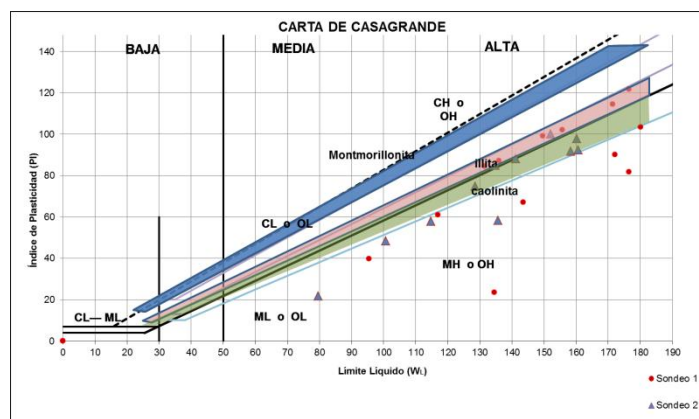
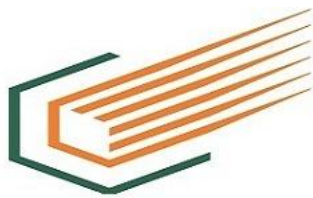


Figura 7. Carta de Casagrande, Clasificación del sondeo 1 y 2.

El peso específico relativo de los sólidos (G_s) interviene en todas las expresiones de las relaciones de fase y su valor es un indicativo acerca de la composición mineralógica de los materiales presentes en el subsuelo, con los datos obtenidos de G_s se clasificó el suelo siguiendo la recomendación de la tabla 2 del Instituto Nacional de Vías de Colombia [4], se obtuvo una variación de suelos comprendidos entre el límite de limos inorgánicos a unas arcillas poco plásticas y a mayor profundidad del suelo se encuentra arcillas plásticas.



La estratificación del suelo de la zona de estudio, se tuvo en cuenta variables como la clase de mineral del suelo según el índice de consistencia, la clasificación del suelo por el método SUCS y la variación de G_s con la profundidad del suelo, el resultado del análisis de estas clasificaciones se ilustra en la figura 8 y 9. Cabe destacar que el estrato predominante se compone de Arcillas plásticas de color gris.

Cenizas Volcánicas	2.20 a 2.50
Suelos Orgánicos	2.50 a 2.65
Arenas y Gravas	2.65 a 2.67
Limos Inorgánicos	2.67 a 2.72
Arcillas poco Plásticas	2.72 a 2.78
Arcillas medianamente plásticas y muy plásticas	2.78 a 2.84
Arcillas Expansivas	2.84 a 2.88
Suelos con Abundante Hierro	3.00

Tabla 2. Clasificación del suelo basado en el valor de G_s . Tomado de: Norma INVIAS [4]

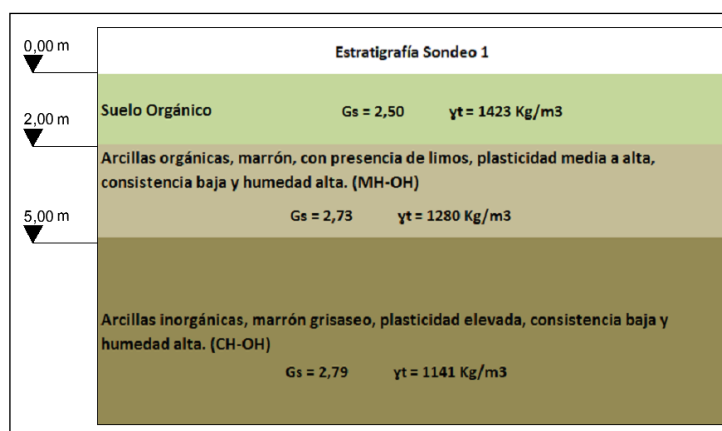


Figura 8. Estratificación del suelo, sondeo 1.

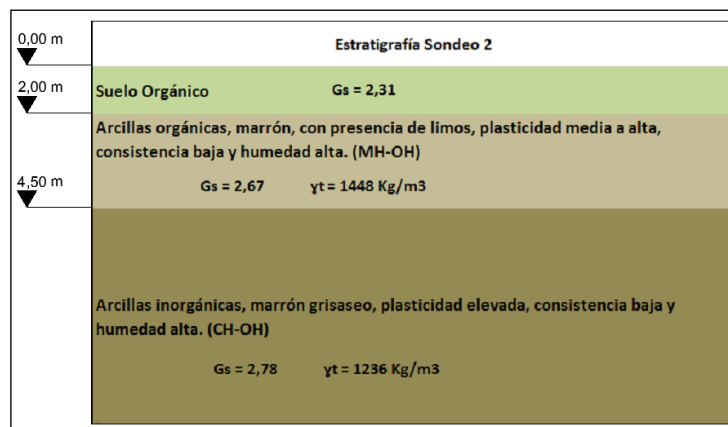


Figura 9. Estratificación del suelo, sondeo 2.

En campo se evidenció un suelo arcilloso de alta compresibilidad, color gris habano, con contenidos de humedad alta sin la presencia de nivel freático, un suelo en estado parcialmente saturado, lo cual hace más vulnerable estos suelos ante los cambios de humedad.

Es importante entender el estado en que trabaja el suelo para el análisis respectivo de las propiedades de retención de humedad, la saturación inicial del suelo varía entre un 75 % a 99 %, para el sondeo 1, en cambio para el sondeo 2 la saturación varía en un rango inferior, con valores entre un 70 % a 85 %. Estos rangos indican la variación del contenido de agua del sondeo 1 son mayores, ya que el consumo de agua es inferior al sondeo 2 debido a la presencia de vegetación en este punto y a profundidades mayores de 9 m la saturación es superior al 80 %. En la figura 10 se ilustra el comportamiento de la saturación de los dos sondeos realizados.

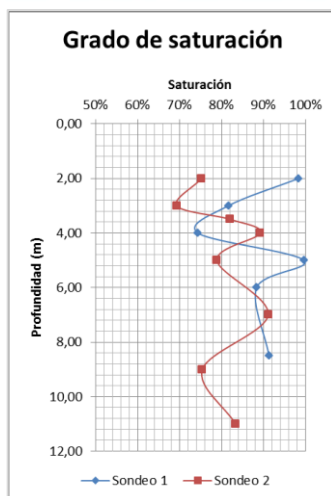
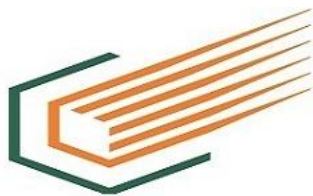


Figura 10. Grado inicial de la saturación del suelo.

El suelo estudiado cuenta con un alto contenido de arcilla tipo ilita, el cual es sensible ante cambios de humedad, al reaccionar con el agua estas arcillas se expanden o aumentan su volumen considerablemente. Igualmente cuando el contenido de agua es relativamente bajo estas arcillas disminuyen el volumen evidenciándose en las patologías vistas en la figura 3.

4. PROPIEDADES DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DETERMINADAS EXPERIMENTALMENTE.

El comportamiento hidromecánico del suelo se analiza desde las propiedades de retención de humedad, por ello se estableció la succión inicial ejercida por el suelo respecto a su profundidad, en la figura 11 se ilustra el comportamiento de la succión respecto a la profundidad. Este fenómeno actúa en los primeros 5 m de profundidad, generando succiones alrededor de 2000 – 3000 kPa, a partir de esta profundidad se genera succiones cercanas a 10 kPa. La variación en la succión se debe a la zona de influencia de la desecación y presenta un comportamiento similar a la variación de la humedad inicial del suelo, donde se estableció que la zona de influencia de desecación se encuentra hasta 5 m de profundidad.

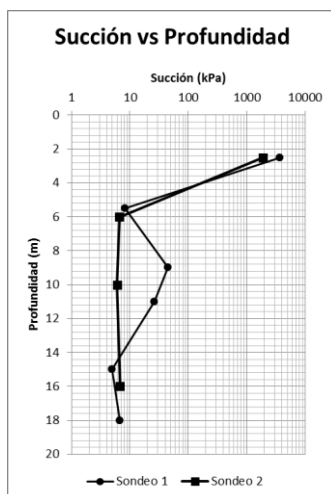


Figura 11. Variación de la succión inicial del suelo respecto a su profundidad.

Para establecer las curvas de retención de humedad se usó 10 muestras representativas de los dos sondeos, en la figura 12 y 13 se ilustran las curvas de retención de humedad para el sondeo 1 y sondeo 2 respectivamente.

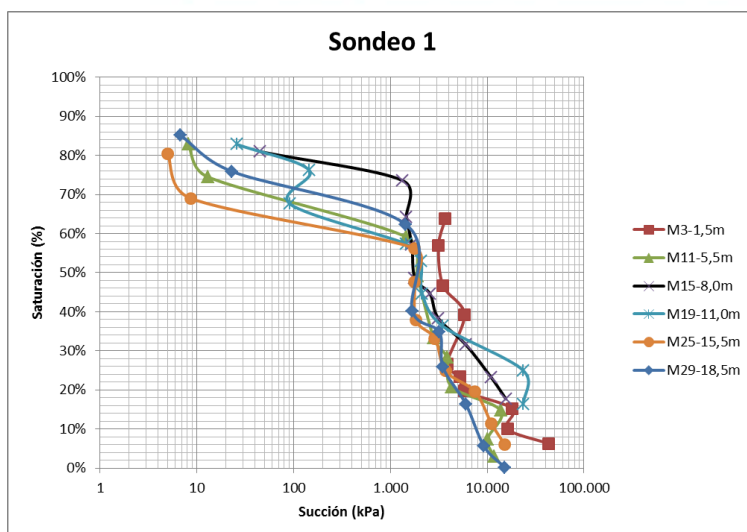
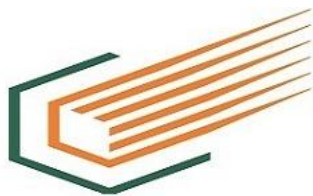


Figura 12. Curvas de retención de humedad experimentales del sondeo 1.

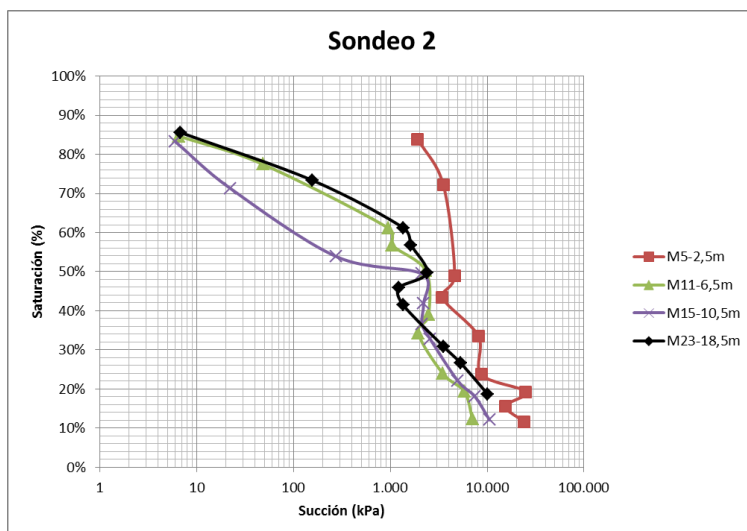
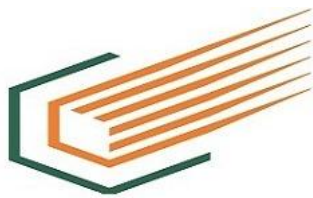


Figura 13. Curvas de retención de humedad experimentales del sondeo 2.

Las arcillas estudiadas presentan saturaciones iniciales cercanas a un 85 %, con succiones entre 8 a 10 kPa y alcanzan succiones cercanas a 20.000 kPa con saturaciones alrededor del 10 %, por otro lado para las muestras superficiales (hasta una profundidad de 3 m), debido a que la humedad del suelo ha sido afectada por la vegetación, la succión inicial alcanza valores superiores a los 1.000 kPa con una saturación del 60 %, donde el suelo actúa en un régimen de absorción identificado por superar el punto de inflexión de la curva, como se detalla en los dos sondeos.

Al realizar el análisis del suelo a profundidades mayores a 3 m se observa que el suelo trabaja en un régimen capilar identificado ya que el valor de la succión del suelo aún no ha llegado a valores cercanos del punto de inflexión de la curva el cual se conoce como Valor de Entrada de Aire (V.E.A), en el caso del suelo estudiado V.E.A ha tomado un valor de 1.000 kPa; el punto de inflexión en la curva se caracteriza por representar cambios en las propiedades de succión del suelo, definiendo propiedades de permeabilidad del suelo y propiedades de almacenamiento de agua, con el fin de comprender el comportamiento hidromecánico del suelo en modelaciones [6]. Antes del V.E.A (1.000 kPa) el comportamiento de la succión incrementa con una tasa relativamente baja llegando a saturaciones cercanas al 60 %, después de este valor la tasa de incremento de la succión es alta, donde el suelo trabaja en un régimen de absorción descendiendo hasta una saturación de 10 %, el suelo al alcanzar dicha saturación cambia sus propiedades de retención de humedad y a partir de este valor

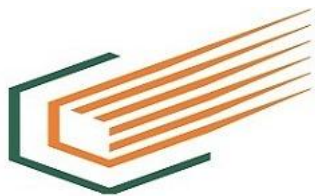


el suelo actúa en un régimen de absorción residual, caracterizado por un segundo punto de inflexión en la curva que toma un valor aproximado de 10.000 kPa.

En resumen el suelo trabaja en tres regímenes: el régimen capilar trabaja con valores de saturación entre el inicial de 85 %, ejerciendo una succión menor a 10 kPa, hasta una succión de 60 %, ejerciendo una succión de 1.000 kPa; el suelo trabaja en un régimen de absorción cuando el valor de la saturación se encuentra alrededor de un 60 % hasta un 10 % con valores de succión entre los 1.000 kPa y 10.000 kPa respectivamente y finalmente el suelo trabaja en un régimen de absorción residual cuando la saturación es inferior a 10 % ejerciendo una succión mayor de 10.000 kPa.

5. CONCLUSIONES

- El suelo que compone el occidente de la Sabana de Bogotá, es un suelo arcilloso de consistencia baja; como es de gran espesor se hace inviable remover este material y reemplazarlo por materiales de mejores propiedades mecánicas; a través del análisis del comportamiento hidromecánico de los suelos se establecen herramientas como las curvas de retención de humedad las cuales son fundamentales para dicho análisis.
- Las arcillas, en un estado parcialmente saturado, generan esfuerzos internos conocidos como presión negativa de poros, causante de la disminución de la resistencia y su rigidez, formando grietas a medida que aumenta la succión, problemas reflejados en asentamientos diferenciales de estructuras “rígidas”, deformaciones en las vías, entre otras.
- La zona de afectación del suelo estudiado está comprendido hasta 5 m de profundidad, evidenciados en las variaciones de humedad y los regímenes de succión con los que trabaja el suelo.
- Se distingue las diferencias en las propiedades del suelo asociadas a la presencia de vegetación: en el sondeo 1, con menor presencia de vegetación, las condiciones de humedad fueron ligeramente mejores con relación al contenido de humedad del sondeo 2, reflejándose en los estados de succión que trabaja el suelo.
- La succión inicial del suelo depende de la profundidad en que se realice el análisis, debido a la variación de humedad del suelo; inicialmente el suelo trabaja en un régimen de absorción con una succión superior a 1.000 kPa y a mayor profundidad se tiene mayor contenido de agua y el suelo trabaja en un régimen capilar, con valores cercanos a los 10 kPa.
- En las curvas de retención de humedad se observa una tendencia de la succión antes y después de 1.000 kPa, este es el punto de inflexión de la curva, representando el valor de entrada de aire, antes de que la succión alcance 1.000 kPa la succión actúa en un régimen capilar, a partir de los 1.000 kPa la succión trabaja en un régimen de absorción y cuando la succión alcanza los 10.000 kPa se entra a una zona residual de absorción, identificada por otro punto de inflexión en la curva.
- En los primeros 5 metros de profundidad del suelo, la succión trabaja en régimen de absorción, con valores de succión de 1.000 kPa y saturaciones del 70 %, dado que este es el punto de inflexión de la curva de retención de humedad o V.E.A, las propiedades mecánicas del suelo llegan hacerse críticas, presentando fallas como grietas.
- Las tasas de incremento de la succión dependen del proceso de secado y humedecimiento al cual ha sido sometido el suelo, antes del valor V.E.A el comportamiento de la curva depende de la profundidad del suelo, antes de la zona de afectación depende de la humedad inicial y por debajo de esta el comportamiento de la curva es similar ya que la variación de la humedad es mínima, al superar el valor V.E.A las curvas presentan la misma tasa de incremento de la succión, independientemente de la profundidad del suelo.



REFERENCIAS

1. RUEDA, M y PINEDA, J. “Patologías asociadas a desecación en pavimentos en el sector Siberia-Tenjo al occidente de la Sabana de Bogotá”. *XVIII Simposio de ingeniería de pavimentos*, Cartagena, 2011.
2. VESGA, L. “Agrietamientos en los suelos del occidente de la Sabana de Bogotá”. *Boletín Colombiano de Geotécnica*, 2000, núm. 8 pág. 35-46
3. PINEDA, Jaimes. “Comportamiento volumétrico de arcillas de la Sabana de Bogotá en procesos de secado”, Tesis Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2003.
4. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Normas de ensayos de materiales de construcción para carreteras, 2007.
5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Geotechnical Engineering Standards, 2014.
6. FREDLUND, Delwyn; et al. *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012. ISBN 978-1-118-133559-0.
7. LU, Ning y LIKOS, William. *Unsaturated soil mechanics*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. ISBN 978-0-471-44731-3.
8. CHANDLER, R; CRILLY, M y MONTGOMERY, G. “a low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings”. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1992, vol 92, núm 2, pp. 82-89.
9. CHANDLER, R y GUTIERREZ, C. “The filter-paper method of suction measurement”. *Geotechnique*, 1986, vol. 36, pp. 265-268.
10. HAMBLIN, A. “Filter paper method for routine measurement of field water potential”. *Journal of Hydrology*, vol. 53, 1984, pp. 27-42.
11. LAMBE, William y WHITMAN, Robert. *Mecánica de suelos*, New York: Wiley, 1996. ISBN 968-1-818-946.
12. DAS, Braja. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, New York: Wiley, 2001. ISBN 970-6-860-614.