

ESTUDIO GEOTÉCNICO DE UN SUELO TROPICAL PARA DETERMINAR SU ESTADO DE METEORIZACIÓN Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

GEOTECHNICAL STUDY OF A TROPICAL SOIL TO DETERMINE THE STATE OF WEATHERING AND THE EFFECT ON THE MECHANICAL PROPERTIES

YAMILE VALENCIA GONZÁLEZ ^a, OSCAR ECHEVERRI RAMÍREZ, KATHERIN R. CANO ROJAS, JULIANA PATIÑO RESTREPO ^{a,b}, JULIÁN HIDALGO OSPINA, SERGIO A. OJEDA PINTO.

Recibido 03-04-14, aceptado 11-06-14, versión final 27-06-14
Artículo Investigación

RESUMEN: El clima es uno de los factores que influyen en el comportamiento del suelo y tiene gran importancia en el proceso de meteorización. En la presente investigación se analizó un suelo en un clima tropical húmedo, con el fin de establecer su estado de meteorización y el efecto que dicha meteorización tiene en las propiedades mecánicas del suelo; para tal fin se caracterizó el material mediante ensayos de laboratorio específicos para suelos tropicales, cuyos resultados permiten describir un suelo laterítico joven con baja cantidad de sesquióxidos y pocas agregaciones que le confieren una baja erodabilidad interna y poca capacidad de desagregación.

PALABRAS CLAVE: Meteorización, suelo laterítico, zona tropical.

ABSTRACT: The weather is one of the factors that influence the behavior of the soil and has great importance in the weathering process. In view of this, we studied a soil in a humid tropical weather, in order to establish its state of weathering and the effect that such weathering has on the mechanical properties of the soil; which were performed for various characterizations of the material by specific laboratory tests for tropical soils, that led to discover a young lateritic soil with low amount of sesquioxides and few aggregations, that confer a negligible internal erodibility and low capacity of disaggregation.

KEYWORDS: Lateritic soil, tropical region, weathering.

^aDepartamento de Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.

^bjpatinor@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En regiones tropicales, las cuales son altamente influenciadas por las condiciones variadas de temperatura, humedad y precipitación, existe la posibilidad de encontrar horizontes en estados avanzados de meteorización, entendida ésta como la afectación del material rocoso mediante procesos físicos y/o químicos del ambiente en el que se encuentre llegando a un material no consolidado (suelo) en cuyo proceso de alteración se puede tener presencia de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio (suelo laterítico) que modifican notablemente la estructura del suelo, y por consiguiente su comportamiento geotécnico (Aristizábal *et al.*, 2011). Se presenta a continuación el estudio de un horizonte de un perfil de meteorización localizado en el municipio de Guarne, Antioquia (Colombia); buscando detallar el comportamiento geotécnico del suelo para analizar su estado de meteorización y efecto en las propiedades mecánicas, mediante pruebas específicas de suelos tropicales (miniatura compactada tropical, medida de la succión por el método del papel filtro, *pinhole* test, desagregación) y pruebas físicas y mecánicas (granulometría por hidrómetro, límites de Atterberg, gravedad específica, propiedades índice, corte directo y consolidación).

2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en el municipio de Guarne, ubicado al oriente del departamento de Antioquia, Colombia; a una distancia de 25 km de la ciudad de Medellín, con coordenadas cartesianas ($6^{\circ}17'26,52''N$ y $75^{\circ}26'58,49''W$), temperatura promedio de $17^{\circ}C$, humedad relativa de aproximadamente 84% y una precipitación media anual de 1700 a 2000 mm, siendo éstas más pronunciadas en los meses de abril, mayo, agosto y noviembre (Kennedy, 2009; SIATA, n.d.), con una altitud que oscila entre los 2.100 y los 2.400 metros sobre el nivel del mar.

3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

El suelo analizado se deriva de la meteorización de rocas ígneas de composición cuarzo diorítica (batolito Antioqueño, cordillera central de Colombia); esta formación geológica ígnea intrusiva se caracteriza por su poca variabilidad petroquímica y su facilidad para la meteorización en ambientes húmedos, lo que propicia perfiles profundos de meteorización (Londoño G, 1998). Es común encontrar suelos residuales del batolito bajo “techos colgados” de anfibolita. En las zonas bajas el paisaje lo dominan terrazas y depósitos aluviales. Las pendientes de la zona se encuentran entre moderadas a pronunciadas (Botero, 1942; Berrío *et al.*, 2013).

Mediante una descripción visual en campo se logran identificar 5 horizontes de meteorización: una capa de suelo orgánico seguido de cenizas, a continuación se tienen mantos limosos rojizos;

se seleccionó este horizonte para el estudio teniendo en cuenta que los suelos superficiales son los que presentan el mayor estado de meteorización; posteriormente, se aprecia un suelo arenoso con presencia de cuarzo de tamaños perceptibles a simple vista; suprayaciendo la roca parental se identifica el saprolito, en el cual se advierten estructuras heredadas. En todo el perfil de meteorización se detectó la presencia de cuarzo siendo éste de menor tamaño en horizontes superficiales.

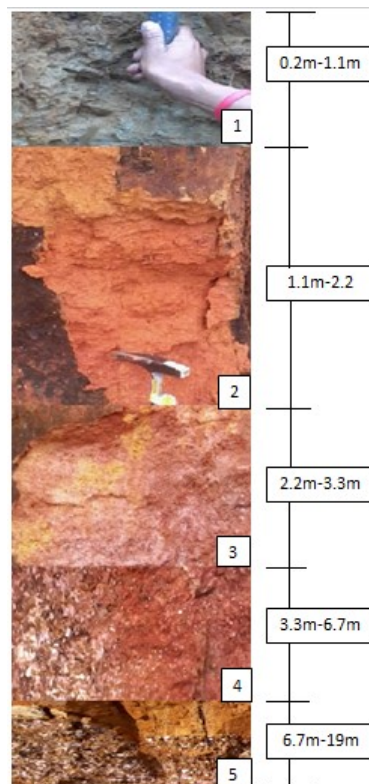


Figura 1: Perfil de meteorización. Elaboración propia.

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para efectuar la caracterización se recolectaron muestras alteradas e inalteradas de forma manual, algunas conservadas en bolsas plásticas y otras en forma de bloque protegidos con parafina para evitar cambios en la humedad natural del suelo. Las muestras inalteradas se utilizaron en los ensayos de corte directo, consolidación, microscopía electrónica de barrido, succión, *pinhole* y desagregación; las alteradas para los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, contenido de humedad natural, difracción de rayos x, gravedad específica y pH. Para cada uno de los ensayos se hicieron tres determinaciones para garantizar la confiabilidad de los resultados.

4.1. Ensayos para la caracterización física

El procedimiento para determinar el contenido de humedad, la gravedad específica, límites de Atterberg y granulometría por hidrómetro, se ejecutó de acuerdo con las normas ASTM D 2216, ASTM D 854, ASTM 4318 and ASTM D 422, respectivamente. Los límites de consistencia se realizaron con aproximadamente 150 g de material seco al aire y 150 g en la humedad natural ($W_n = 30\%$) para comprobar la afectación que genera el secado en las muestras. En términos generales, los ensayos de clasificación deberían aplicarse a los suelos con su humedad natural, a menos que pueda establecerse que el secado indicado en la norma ASTM no afecta los resultados. (Geological Society Professional Handbooks, 1997).

Además se utilizó el ensayo miniatura compactada tropical (MCT) - rápida, propuesto por Nogami & Villibor (1995) y permite clasificar el material en dos grupos, laterítico (L) y no laterítico (N) y a su vez en subgrupos, Arenas (A), Arenoso (A'), Arcilloso (G') y limoso (S').

4.2. Análisis Químico, mineralógico y estructural

4.2.1. Delta de pH (ΔpH)

Se realiza esta prueba con la finalidad de determinar la acidez o alcalinidad del material lo cual insinúa la presencia de diversos minerales. Se determinó el pH (potencial de hidrógeno) del suelo en agua y KCl; la diferencia entre estos dos valores ($pH_{KCl} - pH_{H_2O}$) indica, en el caso de ser mayor que cero, la presencia de oxihidróxidos de hierro y aluminio en el suelo y si el valor ΔpH es menor que cero, insinúa la presencia de arcillo minerales ASTM G51 - 95. (2012).

4.2.2. Difracción de rayos X

Es un procedimiento muy usado para la identificación de minerales de tamaño fino. Permite determinar espaciamientos entre los planos atómicos de los minerales y los ángulos de difracción de los rayos X incidentes. En general los rayos X penetran el cristal pasando por varios millones de capas atómicas que se difractan dentro o fuera de fase. En el primer caso se registran como picos y en el segundo caso como llanos en un difractograma (Mendes, 2004) (EMBRAPA, 1997).

4.2.3. Microscopia electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido permite la visualización tridimensional de la microestructura del suelo, esto se hace por medio de un rayo de electrones acelerado a través de un campo electrónico para adquirir energía cinética que incide sobre la muestra y por disipación produce señales que generan la imagen. Por medio de este instrumento se puede además, estudiar la composición química del suelo y corroborar la presencia de ciertos minerales a través de su morfología o de los elementos presentes (EMBRAPA, 1997).

4.3. Caracterización mecánica

Para la clasificación mecánica se realizaron ensayos tradicionales de corte directo CD (consolidado drenado) con la finalidad de obtener los parámetros de resistencia del suelo tanto sobre especímenes con humedad natural y saturados, este ensayo se rige por la norma ASTM D 3080. Por otro lado se ejecutó la consolidación duplo-edométrica que al igual que en el corte directo se realiza en condiciones de saturación y para el contenido de humedad natural, el procedimiento de este ensayo se describe en la Norma ABNT-MB 3336. Otros ensayos más específicos se describen a continuación.

4.3.1. Desagregación

El ensayo de desagregación es cualitativo y consiste en extraer del suelo en estudio dos cubos de 6 cm de lado. Una de las muestra se somete a una inmersión total en agua destilada, y la otra a una inmersión parcial, agregando agua destilada el equivalente a $1/3$ de la altura de la muestra cada 15 minutos, hasta que quede sumergida (en cada fase se debe observar el comportamiento de la muestra). Después de 24 horas se revisa y se comparan las dos muestras describiendo el estado en el cual quedaron.

4.3.2. *Pinhole test*

El ensayo *Pinhole* fue concebido para proporcionar una medida cualitativa y cuantitativa de la erodabilidad interna de los suelos, consiste en hacer fluir agua a través de un agujero de 1 mm de diámetro en una muestra de suelo, simulando el flujo a través de una grieta u otra estructura de debilidad. Se realiza el procedimiento con varias cargas hidráulicas obteniendo un promedio de caudales para cada gradiente hidráulico como se describe en la norma brasilera ABNT-NBR14114. Aunque generalmente los suelos tropicales no presentan alta dispersión por su bajo contenido de sodio (Na), Santos (1997) propuso analizar este comportamiento en los suelos tropicales estudiando el efecto que causaba la velocidad del flujo en el desplazamiento de las partículas (Camapum de Carvalho *et al*, 2006) mediante la relación carga descarga vs cabeza hidráulica.

4.3.3. Succión por el método del papel filtro

El método del papel filtro es uno de los métodos existentes para calcular la succión total y matricial en laboratorio, donde se relaciona el contenido de agua del papel filtro con la succión existente en el suelo como se explica en la Norma ASTM D5298-10. En el ensayo una muestra cilíndrica de suelo se pone en contacto en una de sus caras con un papel filtro calibrado y en la otra cara se coloca una malla que permite el cálculo de la succión total (succión matricial más succión osmótica), esto con el fin de mostrar si existe algún efecto químico en el suelo. Se montan 11 cuerpos con humedades distribuidas (secando y humedeciendo) desde 2 % hasta 39 % (humedad de saturación máxima) dejando equilibrar el sistema durante 15 días. De acuerdo con el contenido de humedad de los papeles y usando las ecuaciones de calibración, se determina la succión matricial y total de

los cuerpos (HOY03).

Finalmente, obtenida la succión para cada espécimen y calculada la humedad final de cada muestra se obtiene la curva característica o de retención agua como se muestra en los análisis de resultados.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Caracterización física

La Tabla 1 muestra las propiedades índices del suelo en estudio, resultado de los ensayos de caracterización física. El resultado de la gravedad específica (2,8) puede estar influenciado probablemente por la presencia y las proporciones cuantitativas de los distintos minerales presentes en el suelo. En el análisis DRX Figura 4 se advierte la presencia de minerales con gravedades específicas bajas como la caolinita, cuarzo y gibsita; asimismo de minerales con gravedad específica altas como la hematita.

Tabla 1: Resultados propiedades físicas del material

Contenido de humedad natural (%)	30	
Saturación inicial (%)	76.3	
W de saturación total (%)	39.3	
Límite Plástico (LP %)	Humedad natural	33,4
	Seco al aire	35,7
Límite líquido (LL %)	Humedad natural	57,9
	Seco al aire	55,7
Índice de Plasticidad (IP %)	Humedad natural	24,5
	Seco al aire	19,9
Gravedad específica de los sólidos (Gs)	2,8	
% Finos	Con defloculante	57
	Sin defloculante	56
Índice de vacíos inicial (e)	1,1	

5.1.1. Granulometría

Las curvas granulométricas del suelo en estudio no presentaron grandes diferencias con o sin uso de defloculante, lo que indica que el agente no causó una notable desagregación del material (Figura 2). Se observa además que predomina la fracción fina con un 56 % en promedio, lo que muestra la actuación del proceso de meteorización que causa una disminución en el tamaño de la partícula del material. La poca dispersión obtenida indica la presencia de agregaciones fuertes, comunes en suelos sometidos a procesos intensos de meteorización como ocurre en los suelos Lateríticos (EMBRAPA, 1997).

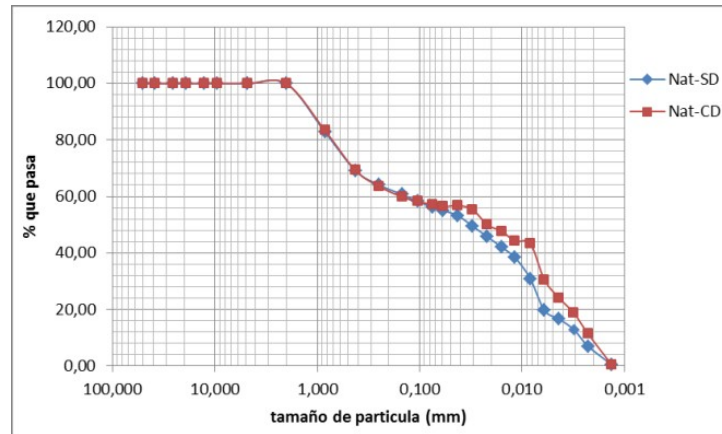


Figura 2: Resultados hidrómetros

5.1.2. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg del suelo en condiciones de humedad natural presentan poca variación respecto a los hechos con el suelo seco al aire, lo cual indica la escasa presencia de minerales que sufren deshidratación irreversible, como la haloisita. Según la carta de plasticidad de Casagrande, el suelo se clasifica como un MH, limo de alta plasticidad.

5.1.3. MCT

Según la clasificación MCT el suelo se clasifica como LA' (Arenas arcillosas Lateríticas) – LG' (arcillas Lateríticas y arcillas Lateríticas arenosas), que frente a la clasificación de Casagrande, arroja un resultado coherente, pues una de las correlaciones de la clasificación MCT con la clasificación unificada es precisamente la de un limo de alta plasticidad (Nogami & Villibor, 1995). Si bien, mediante el ensayo MCT se evidencia la presencia de un suelo laterítico, el ΔpH arrojó un valor de -2,5 lo que insinúa la presencia de arcillominerales en el suelo, soportado por la alta plasticidad del material y la presencia de arcillominerales en el ensayo de difracción de rayos x, como la caolinita.

5.2. Estructural y mineralógico

5.2.1. Microscopia electrónica de barrido (MEB)

Las imágenes obtenidas en el microscopio electrónico de barrido (Figura 3) muestran un suelo con presencia de macro, micro poros y poros intermediarios, típica de suelos tropicales, lo que lleva a pensar que se tiene un material laterítico joven (Camapum et al, 2006).

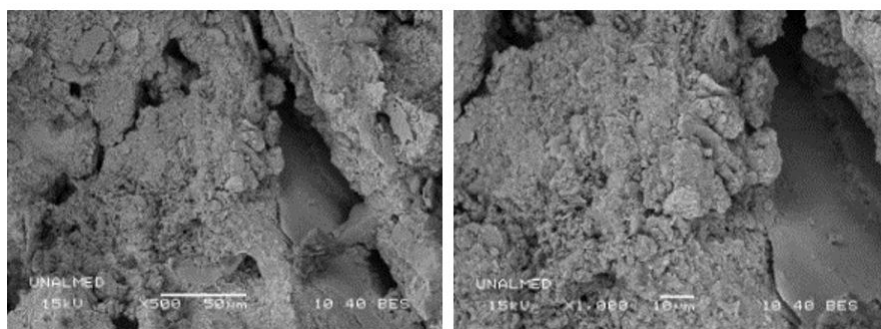


Figura 3: Imagen microscópica del suelo (aumento 500x izquierda, 1000x derecha)

5.2.2. Difracción de rayos X (DRX)

El ensayo de DRX muestra un suelo que presenta gran cantidad de cuarzo, que es característico de los suelos del oriente antioqueño (Londoño, 1998). Se observa además la presencia de caolinita que podría explicar en parte la estabilidad del suelo en presencia de agua. Adicionalmente, hay concordancia entre la presencia de Gibsita y la clasificación MCT (Figura 4).

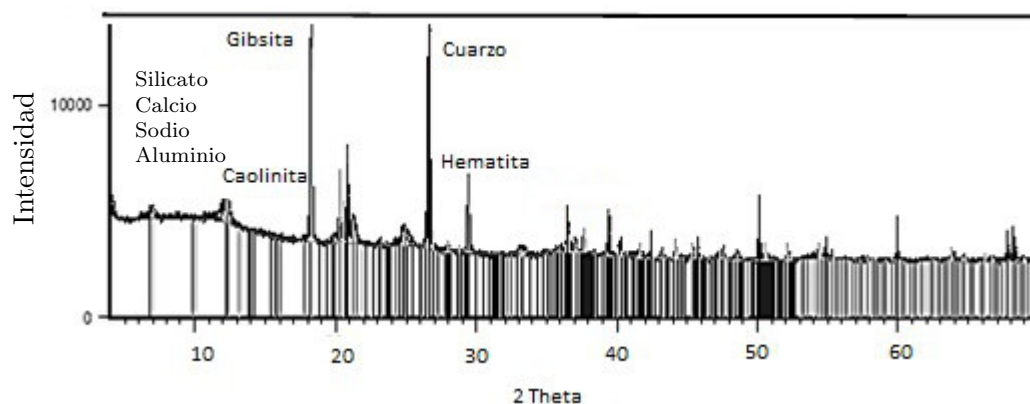
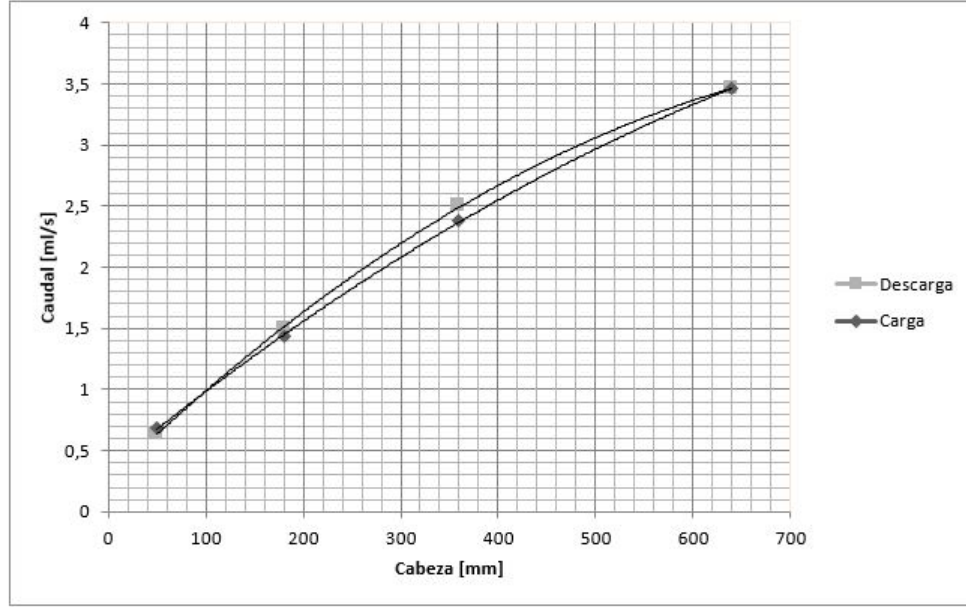


Figura 4: DRX Suelo natural

5.3. Caracterización mecánica

5.3.1. *Pinhole test*

Este ensayo muestra que el suelo es no erodable ya que los caudales resultantes de la carga y la descarga para una misma cabeza hidráulica no presentan una diferencia significativa; además el agua durante el ensayo no presentó turbidez, por lo cual no se presume arrastre de partículas internas aunque se haya evidenciado un leve aumento del diámetro del orificio por el cual circula el agua (Figura 5), esto puede estar asociado a la presencia de arcillominerales que le dan estabilidad a la estructura.


 Figura 5: Resultados del *Pinhole test*

5.3.2. Colapsibilidad del suelo, ensayo duplo-edométrico

La Figura 6 muestra los resultados del ensayo de consolidación sobre muestras en la condición de humedad natural (Nat-NS) y saturada (Nat-S). A partir de estos resultados se determinó el potencial de colapso utilizando las expresiones que se presentan a continuación (ecuación 1 y 2):

$$CP = \frac{\Delta e_c}{\left[1 + \left(\frac{e_{nat}}{e_{0(nat)}} \right) \times e_{0(medio)} \right]}, \quad (1)$$

donde:

$$\Delta e_c = \left[\left(\frac{e_{nat}}{e_{0(nat)}} \right) - \left(\frac{e_{sat}}{e_{0(sat)}} \right) \right] \times e_{0(medio)},$$

$$e_{0(medio)} = \frac{(e_{0(nat)} + e_{0(sat)})}{2} \quad (2)$$

e_{nat} , e_{sat} son los índices de vacío final y $e_{0(nat)}$, $e_{0(sat)}$ son los índices de vacío iniciales de una muestra para una tensión aplicada, tanto para la muestra con la humedad natural como para la muestra en estado saturado (Jennings & Knight, 1975). Para la muestra de suelo en estudio el mayor valor de CP obtenido fue de 2,9 para una carga de 800 kPa. Este valor de CP al compararse con la clasificación de colapsibilidad propuesta por Jennings & Knight (1975), el suelo presenta un colapso de gravedad moderada. Esto puede estar relacionado a la estructura que tiene el suelo, tal como se observa en las imágenes obtenidas en la microscopía electrónica de barrido. En general este ensayo indica que el suelo es estable; primero por sus bajos índices de colapso y las bajas

deformaciones sufridas durante el ensayo (Figura 5) del orden de 0,76 mm sin saturar y de 1,52 mm cuando la muestra se encuentra saturada, esta pequeña diferencia confirma que la deformación del suelo ante cargas diferentes no varía significativamente.

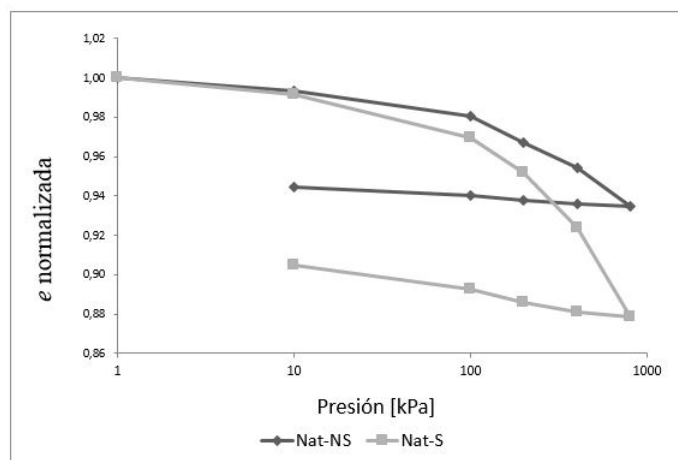


Figura 6: Resultado consolidación

5.3.3. Desagregación

Con relación a la desagregación, el cubo extraído del suelo natural que estuvo bajo inmersión total presentó desprendimiento de partículas principalmente en las esquinas y en los bordes de la muestra, pero en términos generales mantuvo su forma y tamaño original (Figura 7). Por otro lado, la muestra que se sometió a una inmersión parcial presentó fracturamiento. La muestra se quebró en dos fragmentos, una de las caras mantuvo su forma y la otra sufrió dispersión (se evidencia por la “nube” coloidal). Este tipo de comportamiento se debe principalmente a la expansión osmótica que se presenta cuando la concentración de iones en la fase sólida es mayor que el que tiene la solución del ambiente, el agua tiende a moverse dentro de la muestra de suelo a fin de disminuir esta concentración, causando así la expansión y luego el fracturamiento (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006)



Figura 7: Desagregación, Izquierda: Inmersión total; Derecha: Inmersión parcial

5.3.4. Succión

En la curva característica obtenida se dificulta observar claramente las zonas de micro poros y macro poros pues ésta no cuenta con una forma bimodal propia de suelos lateríticos; sin embargo se insinúa un predominio de poros de tamaño intermedio (Figura 8). Adicionalmente, en esta figura se aprecia una diferencia entre las curvas de succión total y matricial indicando un efecto químico propiciado por el agua que se infiltra y circula dentro de la estructura del material.

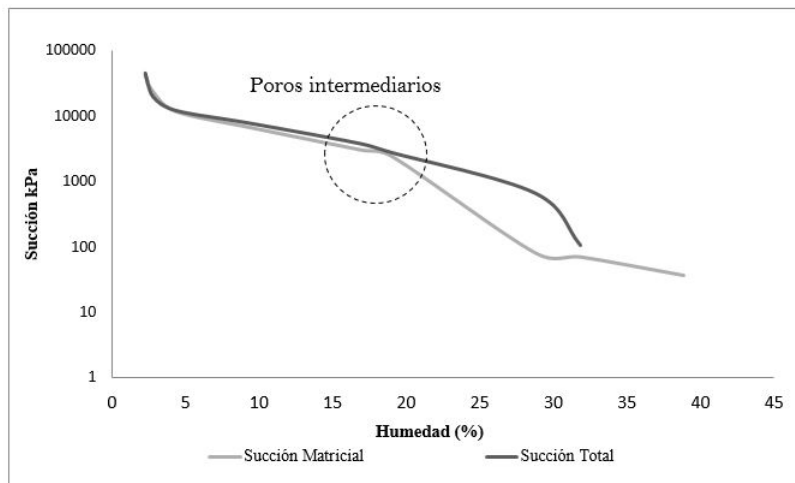


Figura 8: Curva característica

5.3.5. Corte Directo (CD)

Los parámetros de resistencia al corte del material en estado natural fueron: ángulo de fricción $\phi = 25$ y cohesión $c = 35$ kPa que son coherentes con las características propias de la región del batolito antioqueño (Escobar, 2012). Se presume además que otra razón para tener un material tan resistente a 30% de humedad (humedad natural) se explicaría por los altos valores de succión que presenta la muestra en este rango (Figura 9). Luego al saturar la muestra se aprecia una caída significativa de la cohesión ($c = 3$ kPa), esto se debe a que a altas humedades (superiores a la humedad natural) la succión disminuye fuertemente (MEL10).

6. CONCLUSIONES

El suelo analizado presenta un nivel de desagregación bajo como se evidencia en las curvas granulométricas, revelando la presencia de agregaciones resistentes; esto es confirmado también con los resultados del ensayo *pinhole test*, donde el suelo se considera no erodable ya que los caudales de carga y descarga no presentan cambios significativos. Adicionalmente, el tamaño de partículas finas permite deducir que el material ha sido afectado por procesos de meteorización;

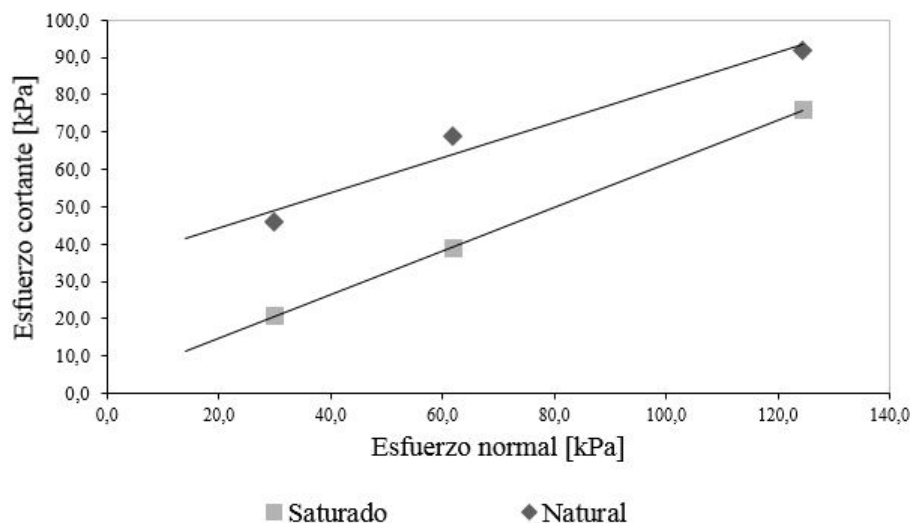


Figura 9: Envoltura de falla, muestra en estado natural y saturado

así como la presencia de minerales propios de los suelos lateríticos como la gibsita y la hematita permite resaltar que el suelo se presenta en una etapa insipiente de laterización debido a que las proporciones de dichos minerales son bajas. Las clasificaciones realizadas para el suelo, tanto la convencional como la MCT, coinciden en su resultado mostrando un suelo con alta predominancia de partículas finas identificadas como arcillominerales. Asimismo, la presencia de macro, micro poros y poros intermediarios en la muestra observados en las imágenes del MEB, lleva a pensar que se tiene un material con un cierto grado de meteorización. En cuanto al comportamiento mecánico, se tiene un suelo estable, pues no presenta deformaciones excesivas, ni un índice de colapso alto, lo cual está directamente asociado a la estructura del material (índice de vacíos bajo). Al realizar el ensayo de corte directo al suelo el parámetro de cohesión se ve afectado ante la presencia del agua, este cambio está relacionado con la succión, donde se puede ver por la curva característica como ante valores de humedad mayores a la humedad natural, el suelo pierde resistencia.

En conclusión, los resultados permitieron determinar que se cuenta con un suelo laterítico joven, que le confieren una baja erodabilidad interna, poca capacidad de desagregación y únicamente una pérdida en la cohesión al saturar el material.

Referencias

ABNT. NBR 14114. (1998), Solo - Solos argilosos dispersivos. Identificação e Classificação por meio do ensaio do furo de agulha (Pinhole Test), Rio de Janeiro, RJ.

- ABNT MB 3336. (1991), Ensaio de adensamento unidimensional, Associao Brasileira de Normas Técnicas, Sao Paulo, 13 p.
- ASTM D-422. (1963), Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D-5298. (1992), Standard test method for measurement of soil potential (Suction) using filter paper. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D-3080. (2004), Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2216. (2005), Standard Test Methods For Laboratory Determination Of Water (Moisture) Content Of Soil And Rock By Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D854. (2010), Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318. (2005), Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soil. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM G51 - 95. (2012), Standard Test Method for Measuring pH of Soil for Use in Corrosion Testing International, West Conshohocken, PA.
- Aristizábal, E.; Valencia, Y.; Guerra, A.; Velez, M. & Echeverri, O. (2011), Caracterización geotécnica de perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ígneas en ambientes tropicales. *Boletín De Ciencias De La Tierra*, 30, 93 – 106.
- Berrío Alzate, A.; Ordoñez, F.; Benavidez, M.; Toscano, D. & Otros. (2013), Comportamiento Físico-Mecánico de un suelo residual tropical del batolito antioqueño contaminado con jabón. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- Botero, G. (1942), Contribución al conocimiento de la petrografía del Batolito Antioqueño. *Revista Minería*, XX, 115–117.
- Camapum de Carvalho, J.; Martines Sales, M.; Moreira de Souza, N. & Da silva Melo, M. T. (2006), *Processos Erosivos No Centro-Oeste Brasileiro*. FINATEC. pp. 464.
- EMBRAPA. (1997), *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 212p.
- Escobar Toro, L. J. & Valencia, G. Y. (2012). Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín-Bogotá en el tramo de vía entre Marinilla y Santuario. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 31, 51–64.

- Hoyos Patiño, F. (2003), Suelos Residuales Tropicales. Hombre Nuevo Editores. Ed. Geological Society, London. 235p.
- Jennings, J., & Knight, K. (1975), A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. *Proceedings 6th African Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 99–105.
- Kennedy, K. H. (2009), Google Earth. doi:10.1002/9780470548776.ch5
- Londoño G, A. C. (1998), Geoformas Asociadas al Batolito Antioqueño. *Geología Colombiana*, 23, 133–143.
- Melo Zabala, X. E. (2010), *Influencia de la Succion en la Resistencia al corte de suelos reconstituidos derivados de rocas lodosas*. [Tesis de maestría] Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
- Nogami, J., & Villibor, D. (1995), *Pavimentacao de baixo custo com solos lateríticos*. Sao Paulo, Brasil: Ed. Vilibor, p. 213.
- SIATA. (citado 27 de mayo de 2013), Sistema inmediato de alerta temprana de Antioquia. Available: <http://siata.gov.co/newpage/index.php>