

VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ARCILLAS ALÓFANAS EN COLOMBIA AL VARIAR EL GRADO DE SATURACIÓN

✉ YULIANA BETANCUR GUIRALES*
MANUEL BUILES BRAND**
ÁLVARO MILLÁN ÁNGEL***

RESUMEN

Las erupciones volcánicas pueden destruir los ecosistemas a su alrededor y las cenizas que producen lo cubren todo a su paso. No obstante, esas cenizas devastadoras originan algunos de los más productivos y complejos suelos del mundo. Bajo el propósito de conocer las propiedades y el comportamiento de estos suelos en condiciones naturales, el presente estudio muestra cómo, a través de ensayos de laboratorio, se relacionó la variación constante en el tiempo del grado de saturación del suelo con sus parámetros de resistencia. Muestras de suelo extraídas de la ciudad de Pereira, fueron llevadas a la falla para obtener los parámetros de resistencia al corte en condición UU. En los resultados obtenidos se evidencia una tendencia de variación de la cohesión con la variación del grado de saturación. Causas alternativas para este comportamiento del suelo son discutidas, así como su aplicación en la optimización del quehacer ingenieril en estos suelos.

PALABRAS CLAVES: cenizas volcánicas; saturación; resistencia al corte.

VARIATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOPHANE CLAY IN COLOMBIA VARYING THEIR SATURATION DEGREE

ABSTRACT

Volcanic eruptions can destroy the ecosystems around them; producing ash that covers everything in its path. However, these ashes devastating originate some of the most productive and complex soils of the world. Under the purpose of knowing the properties and behavior of these soils under natural conditions, this study shows how through laboratory tests, the variation was associated constant over time the degree of saturation of the soil, with its strength parameters.

Soil samples taken from the city of Pereira, were taken to the failure to obtain the shear strength parameters. The results obtained are evidence of a trend of variation of cohesion with the variation in the degree of saturation. Alternative causes for this behavior of the soil are discussed, and their application in engineering optimization task in these soils.

KEYWORDS: Volcanic Ash; Saturation; Shear Strength.

* Ingeniera civil, Universidad de Antioquia. Ingeniera Junior Integral S.A. Medellín (Colombia).

** Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Magíster en Ingeniería Civil (geotecnia) Universidad de Tokio Japón. Ingeniero consultor y de diseños geotécnico. Profesor Asociado, Escuela de Ingeniería de Antioquia —EIA—. Envigado, (Colombia).

*** Maestría en Ciencias, Universidad de Iowa, Estados Unidos. PhD. Universidad de la Florida, Estados Unidos. Ingeniero Senior Álvaro Millán Ángel & Cía Ltda.

✉ Autor de correspondencia: (Y. Betancur-Guirales). Carrera 46
N. 52-36, Medellín (Colombia). Tel: 511 54 00
Correo electrónico: ybetancur@integral.com.co

Historia del artículo:
Artículo recibido: 15-III-2013 / Aprobado: 18-X-2013
Discusión abierta hasta diciembre de 2014

VARIACAO DAS PROPRIEDADES MECÁNICAS DE ARGILA ALÓFANA EM COLÔMBIA AO VARIAR O GRAU DE SATURACAO

SUMÁRIO

As erupções vulcânicas podem destruir os ecossistemas em seu entorno, e as cinzas que produzem cobrem tudo no seu passo. Não obstante, essas cinzas devastadoras originam alguns dos solos mais produtivos e complexos do mundo. Com o fim de conhecer as propriedades e o comportamento desses solos em condições naturais, este estudo mostra como a través de ensaios de laboratório, relacionou-se a variação constante no tempo de grau de saturação do solo, com seus parâmetros de resistência.

Amostras de solos extraídas da cidade de Pereira foram levadas à falha para obter os parâmetros de resistência ao corte em condição UU. Nos resultados obtidos evidencia-se uma tendência de variação da coesão com a variação do grau de saturação. Causas alternativa para este comportamento do solo são discutidas, assim como a sua aplicação na otimização das tarefas engenheiras desses solos.

PALAVRAS-CHAVE: Cinzas Vulcânicas; Saturação; Resistência ao Corte.

1. EL SUELO Y EL AGUA

A lo largo del tiempo, el suelo ha estado sometido a variaciones en su humedad y en su saturación por estar expuesto a agentes naturales como lluvias y cercanía a ríos, lagos y lagunas, variaciones estacionales en la precipitación, variaciones en los rangos de humedad y evapotranspiración que se presentan entre el día y la noche. El agua que cae como precipitación en una ladera que tiene cobertura vegetal, se convierte en intercepción, retención superficial y humedad del suelo. Posteriormente se inicia el proceso de infiltración y se genera el movimiento del agua dentro del suelo representado en flujos subsuperficiales y de agua subterránea. (Valverde, 2008).

Los principales factores que facilitan la infiltración del agua son:

- El tipo de cubierta vegetal
- Las características hidráulicas del suelo
- La humedad del suelo
- La intensidad de la lluvia

La conformación general de los suelos está dada por partículas sólidas, agua y aire, aunque la disposición de estos componentes varía dependiendo del tipo del material parental, y del proceso de meteorización al que haya sido sometido a lo largo del tiempo. Cuando el agua ha ocupado todo el volumen dispuesto para partículas diferentes a las sólidas (espacios intersticiales), se habla de la saturación total del suelo.

A nivel mundial, existen algunas investigaciones sobre la influencia del grado de saturación en las propiedades de resistencia al corte en algunos tipos de suelo originarios especialmente de países como Japón, en donde Yoshidata Yoshida, Jiro Kuwano y Reiko Kuwano (1991) han intentado estudiar este fenómeno, comprobando que existe una clara dependencia entre el grado de saturación y las propiedades mecánicas de las muestras de suelo estudiadas, las cuales principalmente tenían características arenosas.

En suelos altamente variables, los chinos, a través de Zhu, Jee and Jiang, han hecho lo propio con buenas aproximaciones. También se han obtenido resultados muy acertados con Wesley (2003) quien ha estudiado los suelos originados a partir de erupciones volcánicas en Nueva Zelanda.

En Colombia, estudios adelantados por la Universidad de los Andes y la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER) se han enfocado en la caracterización mecánica básica de estos materiales, pero no han llegado a este tipo de fenómenos (Hermelín, *et al.*, 2006). Por su parte, Gómez *et al.* (2009) ha investigado sobre la anisotropía inherente en el mismo tipo de suelo que es objeto de estudio de la presente investigación, pero no se ha descrito hasta ahora una relación directa entre el grado de saturación del suelo y las propiedades mecánicas del mismo.

Lizcano, *et al.* (2006), ha dado explicación acerca de los mecanismos que gobiernan las propiedades



físicas, el comportamiento mecánico y las principales consecuencias geotécnicas, por medio del estudio de propiedades químicas, térmicas, eléctricas y mecánicas, y su interpretación en términos de estructura interna, composición e interacción entre partículas y fluidos.

Se concluye de estos estudios que: «las características geomecánicas de las cenizas derivadas de erupciones volcánicas de la zona, presentan una dispersión elevada en sus valores. Por esta razón, no es posible asignarles valores típicos que agrupen el comportamiento de la totalidad de las cenizas».

La resistencia al corte es la condición más desfavorable del suelo. Teniendo en cuenta los amplios grados de saturación a que el suelo puede estar sometido en la naturaleza, los principales factores que afectan esta resistencia son la densidad seca (o el índice de poros), el contenido de humedad y el tipo de estructura (Lambe y Whitman, 1959); Seed y Chan, (1959); aunque si se habla de altos niveles de grado de saturación, también debería tenerse en cuenta la participación en la resistencia del suelo la densidad húmeda y el mismo grado de saturación.

Esta situación evidencia que debido a la poca información que hay sobre este tema, a la dificultad de caracterizar estos materiales y a la importancia que representa tratar de conocer el comportamiento mecánico de suelos con dichas particularidades, se ha planteado la idea de investigar este tipo de comportamiento de los suelos con el fin de poder, a largo plazo, tratar de mejorar el grado de conocimiento que se tiene del material, el cual ha originado a lo largo del tiempo muchos problemas de estabilidad de terrenos y, con esto, altos costos de reparación. Aún más, también debe considerarse las secuelas sociales producto de los múltiples deslizamientos que se han presentado en nuestro país, principalmente en las épocas invernales por los inadecuados manejos antrópicos que se les dan a los suelos.

Como prueba de lo anteriormente descrito, se cita que la Sociedad Colombiana de Geotecnia realizó en el periodo de 1989-1991, un inventario regional de deslizamientos y otros procesos de inestabilidad en América Latina. Para el caso específico de Colombia se menciona que a causa de las lluvias, el 70 % de la red vial nacional sufre frecuentes obstrucciones o destrucción, al igual que varias líneas vitales de energía. (Montero, 2005)

Con respecto al inventario de movimientos en masa en Colombia, se debe mencionar que de 43 registros obtenidos, el 63 % de los casos fueron detonados por lluvias o por mal manejo de aguas, el resto se debe a eventos sísmicos o factores antrópicos.

Estos hechos hacen que se pierdan cuantiosos bienes, cosechas, puestos de trabajo, interrupción de círculos económicos, destrucción de sistemas de seguridad social y pueden causar la descomposición de estructuras sociales históricas.

A mediano plazo, las obras de reconstrucción consumen importantes recursos públicos y privados, lo cual obstaculiza las inversiones necesarias para un desarrollo económico a largo plazo. (Cárdenas, 2005)

2. CENIZAS DE ORIGEN VOLCÁNICO

Las cenizas volcánicas son un tipo de suelo residual producto de la meteorización debido al intemperismo mecánico y químico al que han estado sometidas las cenizas provenientes de las erupciones volcánicas. Los suelos de cenizas volcánicas representan aproximadamente el 0,84 % de los suelos a nivel global y se localizan predominantemente en regiones tropicales. (Quantin, 1986; Shoji, *et al.*, 1993).

La morfología y textura de las cenizas volcánicas varía desde que son emanadas hasta su depositación. Las propiedades superficiales de las partículas depositadas dependen ampliamente de la abrasión que soportan durante su transporte. La distancia de transporte depende de características de las partículas que incluyen forma, esfericidad, rugosidad, superficie específica, composición química y carga electrostática (Riley, *et al.*, 2003).

En general, la distancia de depositación lleva a texturas arenosas cerca de los volcanes y limo-arcillosas en zonas alejadas.

Las cenizas volcánicas son convencionalmente clasificadas de acuerdo con su composición, en particular con base en el contenido de sílice. Decreciendo en el contenido de sílice las cenizas se clasifican en riolíticas, dacíticas, andesíticas, y basalto-andesíticas (Shoji, *et al.*, 1993). La mayor parte de las cenizas que han llevado a la formación de suelos en Colombia son de tipo dacítico, ricas en feldespatos plagioclasas, vidrio volcánico, anfíbola y piroxena y pobres en cuarzo. (Arango, 1993)

La meteorización del material parental depende de la presencia de minerales ácidos o básicos. En general, los minerales ácidos (e.g. cuarzo, feldespato, horblenda, mica) son más resistentes a la meteorización que los minerales básicos (e.g. olivino, piroxena y plagioclasa cálcico; Townsend, f., 1985).

Las cenizas volcánicas que se extrajeron para el presente estudio son producto de las emanaciones durante las erupciones del complejo de volcanes Ruiz-Tolima en el Holoceno y Pleistoceno (recientes 20 000 años) del período Cuaternario; las cuales ocupan cerca del 11,6 % del territorio y se localizan en regiones de importante crecimiento demográfico y económico. Estos suelos se extienden desde el Eje Cafetero (departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda y Quindío) en el centro del país, hasta los departamentos de Tolima, Cauca y Nariño hacia el sur oeste del mismo. En regiones como Bogotá y los Llanos Orientales, se han encontrado depósitos de estos suelos, distribuidos aleatoriamente, sin que presenten un patrón definido.

Estas regiones de la Cordillera Andina presentan grandes aportes de cenizas volcánicas y por su ubicación, en zonas de media a alta pendiente, presentan procesos erosivos y movimientos en masa, lo que afecta su estabilidad y desarrollo evolutivo. Por esta razón se consideran los suelos más jóvenes y menos alterados que los de las regiones planas colombianas, son de ciclo corto, con gran influencia de los materiales orgánicos.

Este tipo de suelos ha sido poco estudiado; en el mundo, las primeras aproximaciones provienen de Wesley (1974) quien ha estudiado las cenizas provenientes de las erupciones volcánicas en Nueva Zelanda; sus análisis muestran que estos tipos de suelos presentan propiedades inusuales en comparación con los sedimentarios (Wesley, 1974).

En efecto, su caracterización geotécnica requiere de métodos diferentes a los convencionales, pues dado que son suelos altamente sensibles a la manipulación de las muestras y a las técnicas de laboratorio utilizadas, los resultados son más susceptibles a ser incoherentes con respecto a las propiedades in situ del mismo.

Esta situación se puede evidenciar en el hecho de que muchos criterios de diseño y construcción de estructuras geotécnicas, conocidos extensamente, deben ser manejados con mucha precaución en presencia de

estos materiales; problemas de tipo geotécnico comúnmente asociados a estos suelos incluyen inestabilidad de taludes, alta sensibilidad, agrietamiento y problemas durante su manejo como materiales de construcción (excesiva humedad, consistencia muy blanda).

En estado inalterado, los suelos derivados de cenizas volcánicas parecen estar formados por agregaciones de tamaño arena o limo y presentan baja plasticidad o no son plásticos. Sin embargo, cuando son remoldeados su apariencia cambia a la de suelos finos con elevada plasticidad y humedad (NZ Geotechnical Society, 2005).

2.1. Geología y tectónica

El departamento de Risaralda está localizado sobre la vertiente occidental de la Cordillera Central y la vertiente oriental de la Occidental, ambas con unidades geológicas y geotectónicas diferentes, y por tanto, con características geomorfológicas especiales.

Es una zona montañosa y quebrada, con sectores planos en las cercanías del río Risaralda y en los valles del Cauca y el San Juan. Se destacan los cerros Caramanta, Tamañá y Tatamá, los altos Bocato, Paramillo y Serna, y los nevados del Quindío y Santa Isabel.

Las variaciones topográficas en el departamento determinan una amplia gama de pisos térmicos desde el cálido tropical que va desde los 910 msnm aproximadamente, al clima frío y de nieves perpetuas que pueden alcanzar los más de 4.000 msnm en el Parque Nacional de los Nevados (ubicado en la zona limítrofe con los departamentos de Tolima y Caldas).

Presenta un régimen de lluvias bimodal en la vertiente occidental, parte baja de la cordillera Central donde se registran los valores más bajos, inferiores a 1.800 mm al año; en la vertiente occidental de la cordillera Occidental se presentan los mayores valores de precipitación, 5.000 mm anuales, debido a la gran masa boscosa que existe, sumada a la proximidad al área selvática chocoana. Los meses más lluviosos corresponden a abril-mayo, y octubre y noviembre; el promedio de precipitación para el departamento es de 3.000 mm al año. El departamento presenta 5 pisos térmicos desde el valle de los ríos San Juan, Risaralda y Cauca, hasta el nevado de Santa Isabel; el cálido representa el 9 % del total departamental, con temperaturas promedio de 24 °C; el templado, entre 18 y 24 °C, representa el



51 %; el frío, con temperaturas inferiores a 12 °C, ocupa el 8 %, y el nevado, que cubre el 1 % del área total del departamento. Comparte el parque nacional natural Tatamá con los departamentos de Chocó y Valle del Cauca; y el parque nacional natural de Los Nevados con los departamentos de Caldas, Tolima y Quindío.

Los mínimos de precipitación corresponden a los meses de enero, julio y agosto; Pueblo Rico y Mistrató son los municipios donde se presentan las mayores precipitaciones, Belén de Umbría tiene una zona con una de las mayores precipitaciones del departamento por año (6.446 mm en 1984). La zona de La Virginia, Balboa y Pereira presenta las menores precipitaciones. (Ingeominas)

Las muestras analizadas son procedentes de Pereira, esta zona se caracteriza por ser producto de la erupción de los volcanes del Nevado del Ruiz, en Caldas, y el Nevado del Quindío y Santa Isabel, en el Tolima (González y Núñez, 1991), lo que la convierte en un gran depósito volcánico-sedimentario, conocido como «Glacis del Quindío» o formación Armenia.

Los materiales que conforman el glacis mencionado, provienen de la Cordillera Central, en la cual se encuentran más de 23 volcanes activos identificados, de alta actividad en el pasado; las erupciones volcánicas generaron flujos piroclásticos e indujeron lahares por deshielo de los glaciares, descendiendo principalmente por los cauces de los ríos Quindío y Otún y demás corrientes que drenan el sector, depositando su carga en un antiguo valle o depresión intercordillera.

Finalmente, erupciones volcánicas de tipo explosivo, aportaron gran cantidad de material piroclástico de caída o tobas volcánicas, tipo cenizas, que cubrieron la región con una capa de 3 a 20 m de espesor promedio, ocultando los flujos mencionados.

Estudios tectónicos regionales aluden la actividad sísmica del Eje Cafetero a la convergencia del bloque Panamá-Costa Rica, el bloque Norandino y las placas litosféricas de Nazca y Suramérica. Así, las fuentes sísmogénicas son la Zona de Subducción y las Fallas del Sistema Romeral. Las fallas mencionadas afectan los depósitos del Glacis del Quindío de la Edad Pliocuaterna, se presentan rasgos morfotectónicos contundentes y anomalías en los patrones de drenaje, asociados con ruptura del terreno por actividad tectónica.

La respuesta dinámica en superficie de estos suelos, dependen principalmente la profundidad de los depósitos de cenizas, que es la variable geométrica principal. El espesor de los depósitos define zonas con diferente comportamiento sísmico.

3. FASE EXPERIMENTAL

Con el objeto de encontrar las diferencias de las propiedades del suelo aumentando su grado de saturación, definida como la relación que existe entre el volumen de agua en los espacios entre el volumen de vacíos (Das, B.M. 2001) en comparación con unas muestras de suelo inalterada (se define muestra inalterada como aquella que no sufrió variación en su grado de saturación, y por el contrario la muestra definida como alterada es aquella que sí sufrió dicha variación en su grado de saturación, pero a una escala de presión atmosféricamente constante), se hizo necesario que durante su obtención, transporte y almacenamiento, se preservara la estructura natural del material, haciendo que en el laboratorio, éstas fueran una representación fiel de las condiciones del suelo in-situ para después proceder a dicha comparación.

Las muestras inalteradas fueron extraídas a niveles de profundidad muy superficiales que variaron entre los 0,5 m y 3 m, y con el propósito de que conservaran sus propiedades, se tuvo en cuenta precauciones tales como la extracción en posición vertical, el taponado de los huecos en los extremos, así como su sellado, etiquetado en la parte superior e inferior de la muestra, colocación en recipientes especiales, y aislamiento de agentes externos, para lo cual cada muestra se recubría con aluminio, «papel chicle», parafina y, posteriormente, papel periódico; todo esto para garantizar que las condiciones de humedad in situ permanezcan en la muestra a lo largo del tiempo.

3.1. Ensayos de laboratorio

Una vez en el laboratorio, por cada tiempo de saturación establecido, se ensayaron por corte directo tres muestras del mismo suelo; a su vez, a cada muestra se le estimaba la humedad natural, peso específico seco y saturado, límite líquido, límite plástico, gravedad específica y grado de saturación.

Para la realización del ensayo de corte directo, por cada tiempo definido de saturación, se fallaron seis

probetas de suelo (tres en estado natural y tres en estado alterado), cada grupo de tres con una carga normal diferente, para determinar los efectos que inducía en la resistencia al corte y el desplazamiento.

Con el objetivo de que los datos registrados fueran significativos para el estudio y que permitieran establecer las correlaciones entre los diferentes parámetros involucrados, la adquisición de los datos se tomó a una velocidad de un dato cada 1 segundo, lo que a su vez garantizaba obtener la curva completa de esfuerzo-deformación.

La selección de la velocidad de aplicación de la carga se hizo con respecto a las condiciones del ensayo (no consolidado, no drenado), asumiendo un valor correspondiente al promedio de las velocidades que normalmente se utilizan en este tipo de pruebas, que corresponde a una velocidad de 1 mm/min.

Uno de los factores más importantes en la ejecución de este estudio era garantizar que el proceso de saturación de las muestras fuera constante en el tiempo, para esto se ideó un método usando equipos de micro goteo (utilizados para suministrar suero y medicina intravenosa en el campo de la salud) y confinando la muestra a ensayar con una lámina de zinc recortada y sujeta por una abrazadera especial para evitar la erosión laminar que se pudiera presentar con el ingreso constante de los volúmenes de agua y garantizar, en lo posible, que el nivel de saturación se distribuyera de manera uniforme en la muestra a utilizar. Para esto se colocaron en la parte superior e inferior de manera intercalada capas de papel filtro y tela porosa, que garantizaran la distribución del agua en la superficie.

El procedimiento descrito anteriormente fue aplicado para todas las muestras y para todos los tiempos de saturación (2 meses, 1 mes, 15 días, 8 días, 4 días, 2 días, 8 horas y 4 horas). Para cada tiempo se hidrataban 3 muestras para las diferentes combinaciones de carga ya mencionadas antes.

Es importante mencionar que el caudal de irrigación utilizado fue de 0,04 cm³/s, este valor fue seleccionado ya que se relacionó con la precipitación media de la ciudad de Pereira. Dicho caudal se logró controlar mediante el equipo de micro goteo mencionado anteriormente, dejando caer una gota cada 15 segundos aproximadamente, el recipiente que contenía el agua estaba a una altura de 1,70m.

A cada muestra ensayada se le sometía a los ensayos de laboratorio ya definidos para la caracterización de las muestras de suelo (contenido de humedad, límite líquido y plástico, densidad húmeda y seca, gravedad específica); siguiendo los procedimientos, las normas ASTM para cada ensayo, resumiendo el procedimiento es el siguiente:

1. Se recuperan las muestras de suelos.
2. Se cortan en las dimensiones para la máquina de corte.
3. Se introducen en una membrana impermeable.
4. Se cubren con papel filtro y tela superabsorbente.
5. Se introducen en una celda metálica que impide la erosión lateral.
6. Se saturan por goteo, según el tiempo necesario.
7. Se extraen las muestras para ensayo.
8. Se ensayan en la máquina de corte.

3.2. Interpretación y modelación de los resultados

Con los datos del ensayo y la utilización de una hoja de cálculo utilizando Microsoft Excel, elaborada a partir de las ecuaciones establecidas para el cálculo del esfuerzo cortante siguiendo la teoría de Mohr-Coulomb y el esfuerzo normal equivalentes, se obtuvo la curva esfuerzo-deformación. De la interpretación obtenida con esta última, se determinaron los parámetros de cohesión y de fricción para cada tiempo de saturación.

Así, a cada tiempo de saturación estudiado se le determinó una humedad natural promedio antes y después del corte, al igual que la densidad seca y húmeda, gravedad específica, grado de saturación, relación de vacíos y porosidad.

Es muy importante aclarar en este punto que se tenía como objeto fundamental medir la succión que se genera en el suelo, por tal motivo esta variable no está involucrada en los cálculos que se van a presentar.

4. RESULTADOS

Las muestras inalteradas recuperadas en las perforaciones ejecutadas están clasificadas según la Carta de Plasticidad de Casagrande en la zona correspondiente a suelos MH.

Se puede referir que, en general, corresponden a limos arenosos y arcillosos de alta a media compresibilidad.



Tabla 1. Resumen de los ensayos obtenidos

	VALORES DE S (%)		VALORES DE HUMEDAD (%)		VALORES DE DENSIDAD SECA (kN/m ³)		VALORES DE DENSIDAD HUMEDA (kN/m ³)		GRAVEDAD ESPECÍFICA	LL (%)	LP (%)
	Natural	Saturada	Natural	Saturada	Natural	Saturada	Natural	Saturada			
2 meses	77	96	62	70	8,4	9,1	13,7	15,2	2,53	66,10	50,00
1 mes	79	96	107	110	5,8	6,5	11,9	13,4	2,51	134,60	116,70
15 días	84	91	60	67	9,3	8,9	14,4	15,1	2,58	66,80	-
8 días	86	91	71	74	8,2	8,6	14,2	14,6	2,62	83,60	-
4 días	87	91	70	85	8,5	7,5	14,1	13,7	2,57	-	-
2 días	89	90	115	138	6,1	5,4	12,2	12,6	-	87,90	-
8 horas	69	71	65	73	7,6	7,1	12,4	13,1	2,57	82,50	61,10
4 horas	96	97	62	72	8,6	9,7	13,9	15,6	2,51	81,00	52,20

De los ensayos realizados, se identifican rangos del Índice de Plasticidad entre 16,1 y 28,8; y del Límite Líquido entre 66,1 % y 134,6 %.

Los valores de humedad se ubican entre el 60 % y el 107 % para las muestras sin saturar, y para las muestras saturadas entre el 67 % y el 138 %.

El peso unitario seco se ubicó entre 5,8kN/m³ y 9,3kN/m³ para las muestras sin saturar y para las muestras saturadas entre 5,4 kN/m³ y 9,7 kN/m³.

El peso unitario húmedo para las muestras sin saturar se ubicó entre 11,9 kN/m³ y 14,4 kN/m³ y los valores de las muestras saturadas estuvieron entre 12,6 kN/m³ y 15,6 kN/m³.

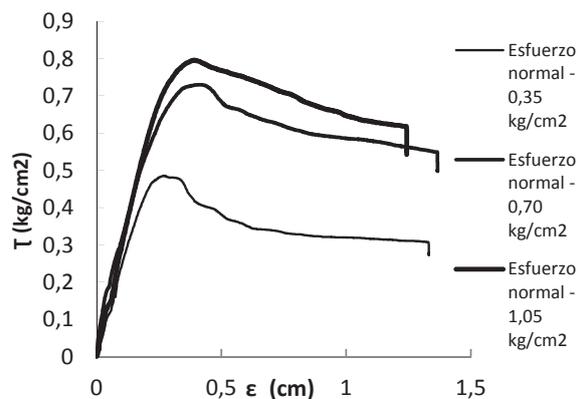
Las curvas Esfuerzo - Deformación presentan una configuración típica en la que el esfuerzo cortante crece rápidamente con el desplazamiento, hasta alcanzar el esfuerzo de falla o esfuerzo pico.

A partir de ese punto, el esfuerzo comienza a decaer gradualmente conforme crece el desplazamiento, incluso tornándose constante.

Una vez encontrados los resultados de caracterización de las muestras, y para el objetivo trazado, se encontraron las relaciones existentes entre el grado de saturación y los valores de cohesión y fricción.

Los suelos analizados son derivados de cenizas volcánicas depositados a partir del pleistoceno medio y tardío (son suelos jóvenes desde el punto de vista geológico). Su caracterización es muy compleja, debido a la dispersión que

Figura 1. Ejemplo de Curva esfuerzo – deformación obtenida para la muestra saturada a 4 días



se presenta en los parámetros estimados para muestras de la misma zona. Poseen una alta relación de vacíos, cementación no despreciable y frecuentemente se encuentran en estado particularmente saturado. La combinación de estos tres factores le confieren a este tipo de suelos características de alta sensibilidad y los convierte en colapsables para condiciones de carga específicas. (CIMOC, 1999).

Una explicación posible a la evidencia de cambios apreciables en las propiedades mecánicas del suelo mostradas en los resultados a medida que se incrementa el grado de saturación, ya que se aumenta la cohesión y se disminuye el ángulo de fricción, puede deberse a que el suelo cambia su configuración inicial. Lo anterior puede deberse al cambio en la composición interna de

Figura 2. Curva de variación de la cohesión vs. el grado de saturación

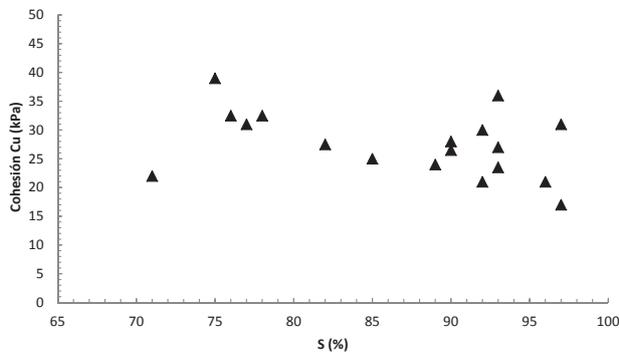


Figura 3. Variación del ángulo de fricción con el grado de saturación

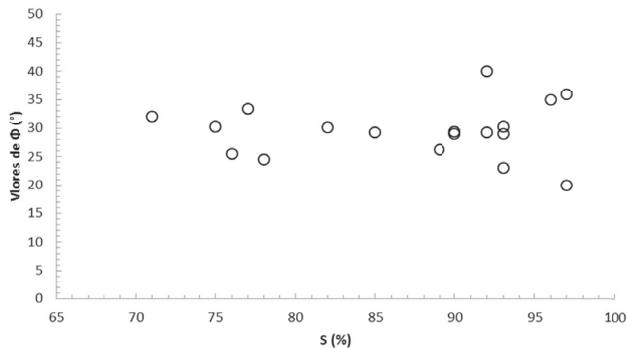
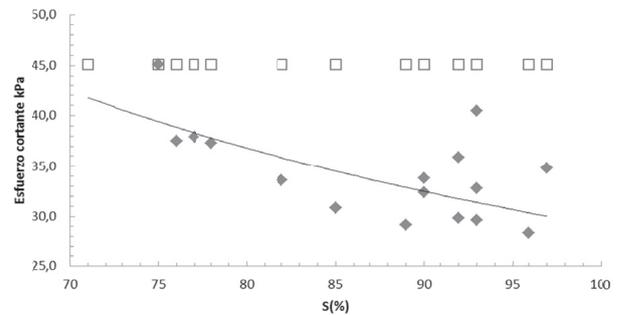


Figura 4. Variación del esfuerzo cortante vs. el grado de saturación



considera constante para cualquier grado de saturación del suelo, debido a que no es una de sus variables, pero cuando se analiza el esfuerzo cortante en función de los parámetros obtenidos en las Figuras 2 y 3, se observa que sí hay una variación cercana al 40 % en el caso que se acerca al mayor grado de saturación.

En cuadros abiertos se presenta el resultante del esfuerzo cortante del suelo calculado de manera tradicional siguiendo la teoría de Mohr-Coulomb, sin tener en cuenta la variación de la saturación, en los rombos llenos se observa cómo va cambiando el esfuerzo cortante a medida que se aumenta el grado de saturación.

Por último, con esta investigación se espera contribuir a la información existente al respecto, dado la notoria importancia de conocer las propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas que por presentar peculiaridades incomparables con otros suelos residuales, los análisis tradicionales de la ingeniería geotécnica no aplican en ellos, ampliando así las discusiones que existen al respecto. Se propone continuar investigando en este campo, en aspectos que correlacionen otros parámetros mecánicos y estados del suelo, con los esfuerzos aplicados.

la masa de suelo al aumentar el volumen de agua y por consiguiente el volumen de vacíos. Se observa que para cambios en el grado de saturación, se presentan cambios considerables cercanos al 43 % en la cohesión, cuando pasa de un grado de saturación del 70 al 95 %, esta valoración es realizada entre la muestra en estado natural que tiene un grado de saturación del 71 % y la muestra con el mayor grado de saturación que fue de 97 %.

Cuando se analiza el comportamiento del ángulo de fricción, se tienen comportamientos similares, en donde se presenta una variación entre la muestra en estado natural con un grado de saturación cercano al 70 % y la muestra con el mayor grado de saturación alcanzado que es del 97 %, entre estos dos puntos se presenta una variación cercana al 34 %.

Cuando se analizó el resultado en términos del esfuerzo cortante máximo (en esfuerzos efectivos) presente en el suelo, se encuentra que cuando se sigue la formulación tradicional de Morh-Coulomb, esta se

4. CONCLUSIONES

Variaciones muy significativas se encontraron cuando se estudió el comportamiento de las arcillas alófanicas bajo el efecto de cambiar el grado de saturación, las cuales pueden prever comportamientos disimiles en el ejercicio práctico. Se debe determinar la influencia de la succión en el comportamiento mecánico de este suelo en particular. Se observa una variación muy significativa en la cohesión y en la fricción y por ende en la resistencia al corte de este suelo, que puede llevar a comportamientos erráticos en campo.



REFERENCIAS

- Duque, G. (1998). Manual de Geología para Ingenieros. Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, D. V. (2009). Evaluación de la anisotropía inherente en cenizas de origen volcánico. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Hermelín, M. y Toro, G. (2006). Tefraestratigrafía colombiana. *Revista Universidad Eafit*, 86. pp. 81-84.
- Lizcano, A.; Herrera, M. y Santamarina J. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6(2). pp. 167-198.
- Malagón, D. (2003). Los suelos de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Montero, J. (2005). *Movimientos en masa en la región Andina*. III Curso latinoamericano de movimientos en masa. Bogotá, Colombia.
- Quantin, P. (1986). Properties and Genesis of Andisols. *Pédologie ORSTOM*, 70-74, XXII(1), pp. 105-111.
- Seguel, O. and Horn, R. (1995). Mechanical Behavior of a Volcanic Ash Soil (Typic Hapludand) Under Static and Dynamic Loading. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile. Chile.
- Shoji, S.; Nanzyo, M. and Dahlgren, R.A. (1993). Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization. Amsterdam: Elsevier Science.
- Townsend, Frank. (1985). Geotechnical Characteristics of Residual Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*. 111(1), pp. 77-94.
- Ugolini, F. and Dahlgren R., (2002). Soil Development in Volcanic Ash. pp. 9-20
- Valverde, Judy S. (2008). *Inestabilidad de taludes por deslaves*. Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. Colombia.
- Wesley, L. Geotechnical Engineering in Residual and Volcanic Soils. Department of Civil Engineering. University of Auckland.
- Wesley, L. (2003). Geotechnical Properties of Two Volcanic Soils. Geotechnics on the Volcanic Edge. Tauranga, March 2003. New Zealand. Geotechnical Society Symposium. The Institution of Professional Engineers New Zealand.
- Wesley, L. (2003). Geotechnical Characterization and Behavior of Allophone Clays. Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils.– Tan *et al.* (eds). Swets & Zeitlinger, Lisse.
- Wesley, L. (2001). Consolidation behavior of allophone clays. *Géotechnique*, 51(10), pp. 901-904.
- Wesley, L. (1973). Some Basic Engineering Properties of Halloysite and Allophone Clays in Java, Indonesia. *Géotechnique*, 23(4), pp. 471-494.
- Wesley, L. (1990). Influence of Structure and Composition on Residual Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 166(4), pp. 589-603.
- Wesley, L. (1977). Shear Strength Properties of Halloysite and Allophone Clays in Java, Indonesia. *Geotechnique*, 27(2), pp. 125-136.
- Wesley, L. (1974). Structural Behavior of Residual Soils of the Continually Wet Highlands of Papua New Guinea – Discussion. *Géotechnique*, 23, pp. 471-494.
- Yamin, L.; Caicedo, B. y Solano E. (1999). Evaluación de la respuesta dinámica del suelo en depósitos volcánicos y sus implicaciones para el diseño sísmico.
- Yoshitada, Yoshida; Jiro Kuwano; Reiko Kuwano. (1991). Effects of Saturation on Shear Strength of Soils. *Soils and foundations*, 31(1), pp. 181-186.
- Yoshitada Yoshida; Jiro Kuwano; Reiko kuwano. (1991). Rain – Induced Slope Failures Caused by Reduction in Soil Strength. *Soils and foundations*, 31(4), pp. 187-193.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Betancur-Guirales, Y.; Builes-Brand, M. y Millán-Ángel, A. (2013). Variación de las propiedades mecánicas de arcillas alófanicas en Colombia al variar el grado de saturación. *Revista EIA*, 10(20) julio-diciembre, pp. 173-181. [Online] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2013.10.20.173-181>