Resistencia al corte de cenizas de origen volcánico considerando su anisotropía inherente

Dina V. Gómez (1), Manuel A. Builes (2), & Alvaro Millán (3)
(1)INTEINSA, Medellin- Colombia
(2)SOLINGRAL, Medellín- Colombia
(3)Álvaro Millán Ángel & Cía. Ltda., Pereira - Colombia

2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference

ABSTRACT
Volcanic eruptions can destroy ecosystems around them. However, those devastating ashes rise some of the most productive and complex soils of the world. The Colombian Eje Cafetero has a significant proportion of soil deposits with those characteristics, because of the volcanic chain that is in the area. In order to know the properties and behavior of these soils in natural conditions, it shows how through laboratory tests, related conditions inherent soil anisotropy, performing direct shear tests on a non-consolidated undrained with different angles relative to vertical. Soil samples from the city of Pereira, were taken to the failure to obtain the shear strength parameters. In the results there is a tendency of variation of cohesion with the variation of the angle of load application

RÉSUMÉN
Las erupciones volcánicas pueden destruir los ecosistemas a su alrededor. No obstante, esas cenizas devastadoras originan algunos de los más productivos y complejos suelos del mundo. El Eje Cafetero colombiano posee una significante proporción de depósitos de suelos con esas características, debido a la cadena volcánica que hay en la zona. Con el propósito de conocer las propiedades y el comportamiento de estos suelos en condiciones naturales, se muestra cómo a través de ensayos de laboratorio, se relacionaron las condiciones de anisotropía inherentes del suelo, realizando ensayos de corte directo en condiciones no consolidadas, no drenadas a diferentes ángulos de inclinación con relación a la vertical. Muestras de suelo de la ciudad de Pereira, fueron llevadas a la falla para obtener los parámetros de resistencia al corte. En los resultados obtenidos se presenta una tendencia de variación de la cohesión con la variación del ángulo de aplicación de la carga.

1 INTRODUCCION

La actividad volcánica en todo el mundo produce diferentes materiales cada vez que hacen erupciones. Esta actividad se produce principalmente en torno al conocido cinturón de Fuego del Pacífico, que cruza casi todos los países que bordean el Océano Pacífico.
Entre los múltiples materiales que surgen de las erupciones volcánicas, se encuentra uno que llama atención: la ceniza volcánica, la forma en que se comporta este material será el objeto de estudio.
Una vez que este material ha sido depositado y se encuentra en la superficie, se transforma en un material muy singular debido a un proceso de meteorización, singular en cuanto a combinación de forma y composición química, lo que le confiere un comportamiento muy particular mecánicamente hablando. La erosión hace que este proceso inicial de cambio de ceniza volcánica a alófana e imogolita, luego a haloisita, luego a caolinita, luego a sesquióxidos y, por último, en laterita (Wesley1973). Este rápido cambio en el material produce dos materiales que participan en la anterior descripción, alófana imogolita. La primera es una partícula esférica irregular, hueca y con diferen- tes diámetros pasando de 3 a 5 µ. Por otra parte, la imogolita es un material paracristalino, lo que significa que sólo se cristaliza en una dirección y en una forma llamada “nanotubos” (Verdugo, 2008).

Con esta singular e inusual morfología de las partículas, el presente artículo se centrará en el comportamiento de esta arcilla alófana, involucrando la anisotropía inherente como una característica importante de su formación geológica.

2 ARCILLAS ALÓFANAS

Las arcillas alófanas se derivan principalmente de la meteorización in situ de las cenizas volcánicas; también pueden ser derivados de otros materiales volcánicos. Este material puede ser básico o ácido en la naturaleza, y parece que la principal condición para la formación es que las arcillas alófanas sean un mate- rial con una composición no cristalina (o una estructura mal ordenada). La ceniza volcánica reúne este criterio, ya que está formado por el rápido enfriamiento del grano fino del material piroclástico, el proceso de enfriamiento es demasiado rápido para la formación de estructuras cristalinas bien ordenadas.

Además de lo anterior, acerca de la no exigencia de un material parental cristalino, parece que el medio ambiente debe estar bien drenado, con la infiltración de agua verticalmente hacia abajo a través del depósito de cenizas. Las altas temperaturas también parecen favorecer o acelerar la formación de arcillas alófanas. En general, el contenido de tales arcillas alófanas en

Indonesia es sustancialmente más alto que en las arcillas similares en el clima templado de Nueva Zelanda (Wesley, 1990). El proceso de me- teorización es esencialmente un proceso de conversión química y de lixiviación de sílice por infiltración del agua. Un requisito para el proceso de meteorización de arcilla alófana a haloisita y a caolinita (y a sesquióxidos) parece ser un clima cálido húmedo como el que se encuentra en el trópico húmedo.

3 ANISOTROPÍA EN SUELOS

La influencia de la orientación de las partículas sobre el comportamiento constitutiva de los suelos ha sido largamente reconocida. La relación esfuerzo-deformación y la resistencia al corte, son dependientes de la dirección de carga con respecto a la dirección de orientación de partículas (Seeds y Duncan, 1966; Arthur Menzies, 1972; Mitchell, 1972).

Las propiedades del suelo son altamente influenciadas por fuerzas geológicas durante el proceso de formación, los cuales son muy importante cuando los suelos están sujetos a diferentes niveles de esfuerzos. Por ejemplo: en el análisis estabilidad de taludes, regularmente las muestras de suelo se toman en la dirección vertical, y la resistencia al deslizamiento del suelo tiende a cambiar la inclinación de la superficie hace falta, como se ve en la Figura 1.

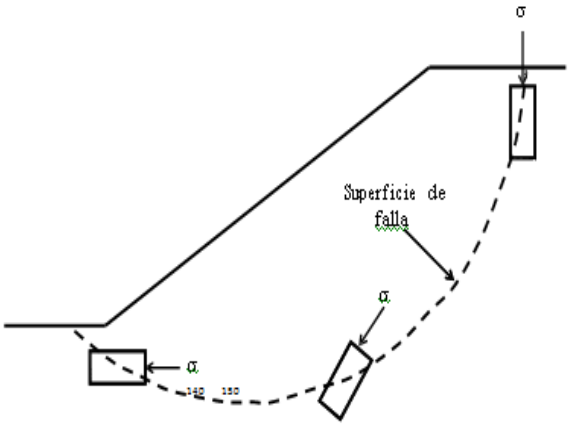

Figura 1. Variación de los esfuerzos según el plano de falla

Dos tipos de anisotropía podrían encontrarse en la naturaleza del suelo. La primera está dada por la formación del suelo que es inherente a cada suelo y depende principalmente de factores geológicos. Por otra parte, la segunda se da debido a la interacción humana, donde el suelo cambia debido a la estructura natural de la acción humana y el esfuerzo que se le induce al suelo.

En un análisis tradicional de estabilidad de las laderas o taludes, un procedimiento de laboratorio rutinario es la realización de un ensayo de corte directo para evaluar la resistencia al corte de una muestra de suelo obtenida sólo en la dirección vertical, ya que con regularidad todas las muestras de suelo se recuperan en esta dirección. Sin embargo, con el procedimiento habitual, el esfuerzo principal presenta una variación según el plano de falla, la cual generalmente no se aplica, esto genera una sobreestimación de las propiedades del suelo. Además, la evaluación de los factores de seguridad no da la perspectiva más exacta del análisis de estabilidad.

4 PROGRAMA DE LABORATORIO

Muestras de suelo a diferentes profundidades fueron tomadas en la ciudad de Pereira, localizada en la parte central de Colombia, en la zona del Eje Cafetero en inmediaciones del volcán nevado del Ruiz, Quindío y Tolima. Muchos de ellos contribuyen a los cambios en la topografía local debido a la enorme cantidad de ceniza volcánica lanzada a la atmósfera. En esta parte de Colombia se pueden encontrar depositas de cenizas volcánicas con profundidades de hasta 20 m.

Las muestras fueron tomadas en la ciudad de Pereira, mediante procedimientos estándar de uso continuo en la consultoría, su transporte, manipulación y almacenamiento fueron cuidadosa- mente seguidos para asegurarse de mantener sus condiciones naturales. Las muestras fueron cubiertas con cera y plástico y transportadas cuidadosamente al laboratorio garantizando la alta calidad de las muestras.

Los ensayos laboratorio se centraron en primer lugar en propiedades índice, límites Atterberg y, por último, sobre el ensayo de corte directo, en la figura 2 se presentan algunos de los resulta- dos de estos ensayos. La rutina de laboratorio consistió en la preparación de muestras de suelo para el ensayo de corte, la muestra tiene un diámetro interior de 6 cm, y el ángulo de la muestra se fue variando desde completamente vertical hasta horizontal por completo. Se denotará en este artículo que las muestras de suelo completamente vertical fueron llamadas 0° grados y completamente horizontales fueron llamadas de 90°.

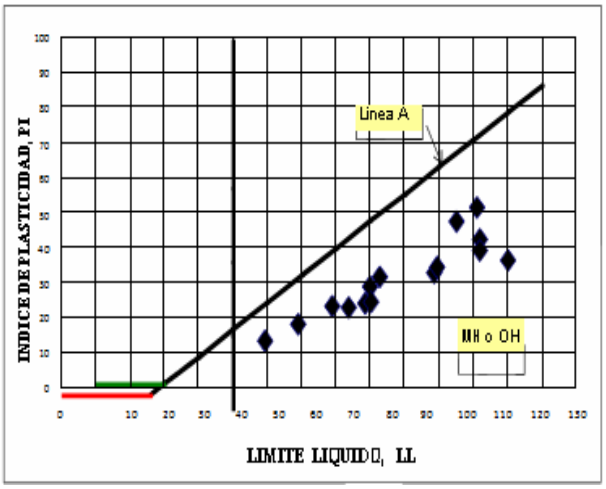

Figura 2. Carta de Plasticidad

Cuarenta ensayos experimentales en este suelo se llevaron a cabo en 0°, 30°, 60° y 90°. El equipo utilizado fue una máquina de corte directo marca Humboldt, en donde se realizaron ensayos, no consolidado no drenado (UU) y consolidado no drenado (CU), el esfuerzo vertical fue aplicado mediante pesas calibra- das, los desplazamientos horizontales se midieron con transductores digitales acoplados a un PC, para la transferencia de carga de corte se utilizó una celda de carga calibrada y acoplada a un PC, en donde se tomaban las lecturas tanto de la celda de carga como de los deformímetros de manera simultánea, tomando lecturas a una velocidad de dos datos por segundo. Los valores típicos de contenido de humedad, peso unitario húmedo y seco de algunas de las muestras de suelo a prueba pueden resumirse en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla resumen valores típicos de humedad y pesos unitarios de algunas de las muestras analizadas.

ω	γ_n	γ_d
%	kN/m³	kN/m³
64.32	15.80	10.40
67.19	14.10	8.40
70.28	15.00	8.70
64.00	14.50	8.80
98.98	13.70	10.30
60.56	14.80	9.00
76.28	13.70	7.80
71.22	14.00	8.20
53.68	15.40	11.70
65.80	14.70	8.70
125.50	12.60	5.10
117.90	13.70	6.30

5 RESULTADOS DE LABORATORIO

Una curva típica de esfuerzo deformación se presenta en la Figura 3, se observa como la deformación aumenta de manera proporcional con relación a la carga, se presenta una alta linealidad a muy bajas deformaciones independiente del nivel de esfuerzo normal aplicado.

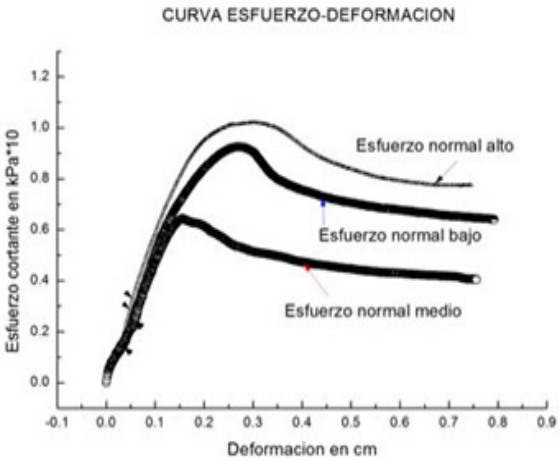

Figura 3. Curva típica de esfuerzo-deformación para la arcilla alófana

Como se muestra en la figura 3, cuando se aplica un bajo es- fuerzo normal, no hay un comportamiento lineal definido y sólo se presenta una falla súbita sin presentar degradación del material; cuando el esfuerzo normal se incrementa, se presenta un comportamiento lineal, con una leve zona de degradación justo antes de la falla, la linealidad desaparece cuando se acercar a los 6 kPa de esfuerzo, y a partir de este punto se presenta la falla, cuando el esfuerzo normal es incrementado nuevamente, el comportamiento es lineal hasta alcanza un valor cercano a los 9.5 kPa, de allí en adelante se presenta una falla gradual con cierto comportamiento elastoplástico formando una zona de falla ligeramente circular y se degrada completamente.

A bajas deformaciones, el suelo muestra una alta linealidad independiente del nivel de esfuerzos normales aplicados, como se muestra en la Figura 4.

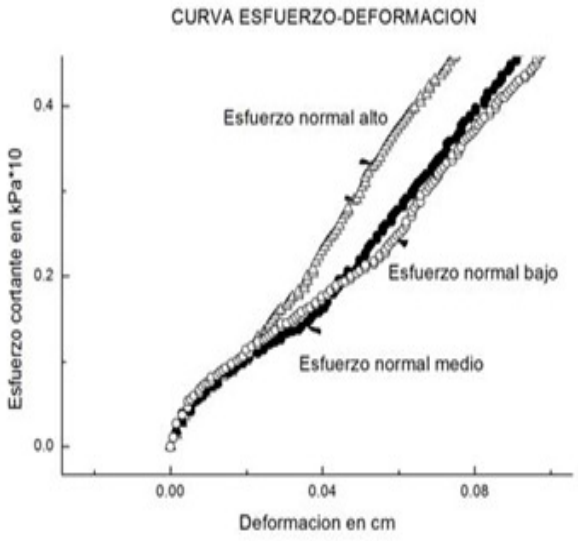

Figura 4. Comportamiento lineal a bajas deformaciones

En la Figura 5, la línea continua muestra la curva de los resulta- dos cuando se realizó el ensayo consolidado no drenado (CU), y la línea discontinua muestra la curva de los ensayos en la prueba no consolidada no drenada (UU).

Como se muestra en la Figura 5, las dos metodologías de ensayo muestran la misma tendencia. El valor de la cohesión cambia cada vez que el ángulo de inclinación de la muestra de suelo varía con respecto a la dirección vertical. La cohesión del suelo disminuye a medida que el ángulo de inclinación (δ) aumenta de cero grados hasta un valor cercano a 60°. Esta variación puede ser considerada como lineal. Después de este punto, la cohesión aumenta hasta alcanzar el valor más alto mostrando una tendencia lineal.

La reducción de la cohesión, cuando alcanza los 60° es de aproximadamente el 40% de su valor original, y después de esta inclinación, aumenta se podría decir de manera linealmente hasta que llega a un valor de cerca de 40% por encima de su valor original.

La diferencia entre estas dos curvas depende de la forma en que el suelo se ensayó. En el ensayo CU, debido al proceso de consolidación, la relación de vacios disminuye aumentando su peso unitario, el cual incrementa la resistencia al cortante, otorgándole una mayor cohesión en comparación con el valor del suelo en un ensayo UU. En este tipo de prueba de presión de poros y la relación de vacíos se mantienen con los valores iniciales del suelo in situ.

Es probable que la reducción de la cohesión mostrada en la fi- gura 5, cuando el ángulo de inclinación vertical (δ) se cerca a los 60°, pueda presentar una relación particular con la orientación de los nanotubos o microestructuras tubulares que se encuentran en este tipo de material según su formación geológica y estado de esfuerzos a los que haya estado sometido a lo largo del tiempo (Verdugo, 2008).

Como se ha mencionado anteriormente, la imogolita es un material paracristalino, lo que significa que sólo se cristaliza en una sola dirección. Esta forma particular llamada “nanotubos” puede ser el responsables de esta variación en el comportamiento mecánico a nivel micro presentando un valor de la cohesión mucho menor a su valor inicial. En este punto, el esfuerzo aplicado podría ser superior a la resistencia de los nanotubos, y el suelo se vuelve más débil en este plano generando una menor capacidad de aglutinamiento de todas las partículas en virtud de este ángulo de inclinación.

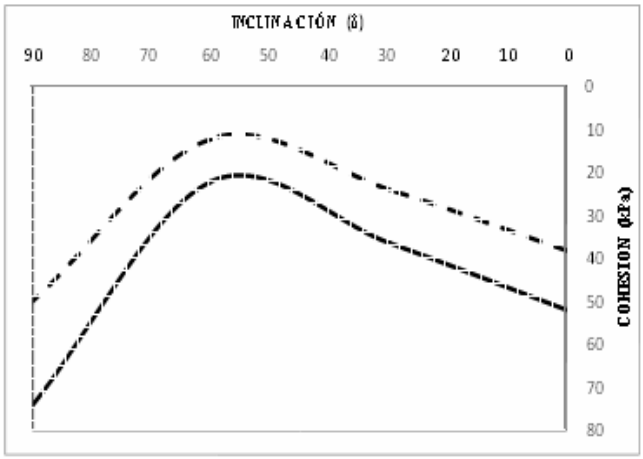

Figura 5. Curva de anisotropía inherente de la arcilla alófana

Se realizó una normalización de la cohesión para evaluar los cambios con respecto a la cohesión vertical

como se muestra en la Figura 6.

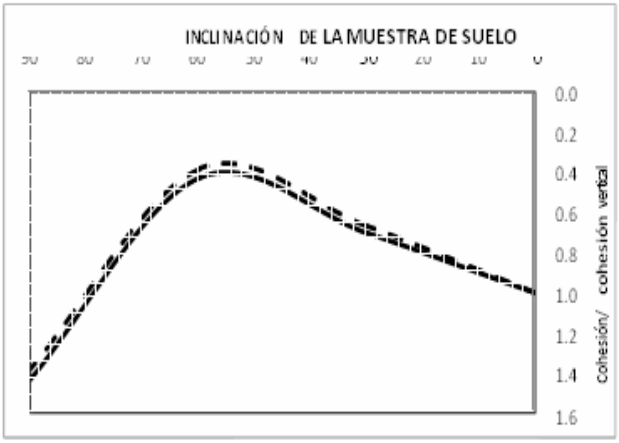

Figura 6. Normalización de la cohesión

Como se muestra en la figura 6, no hay una variación significativa en los valores de la cohesión en función del tipo de ensayo realizado, debido a que una vez se normaliza con el valor de la cohesión vertical, ambos tipos de ensayo adquieren la misma tendencia.

La línea puenteada es la normalización la cohesión vertical en la prueba UU, y la línea continua muestra la tendencia en la prueba CU.

De la Figura 6, ambos tipos de prueba muestran la misma tendencia y comportamiento independiente del tipo de ensayo, lo que muestra su independencia de la metodología utilizada. Este comportamiento indica que la variación de la cohesión en relación con la obtenida de los 0º es la misma, independiente al ensayo realizado.

6 CONCLUSIONES

Una serie de pruebas de corte directo se realizaron en arcilla alófanas, un material muy particular generado por la meteorización de las cenizas volcánicas a alta temperatura y humedad.

Para evaluar la anisotropía de arcillas alófonas, una serie de experimentos se llevaron a cabo para evaluar la cohesión en términos de ángulo de inclinación (δ) de las muestras, el comportamiento a bajas deformación y una normalización de los resultados con relación a los procedimientos rutinarios también fue realizado.

De los resultados de la prueba, el parámetro de la cohesión pre- sentó un mayor valor cuando realizó la prueba CU en comparación con la prueba UU. Este comportamiento es debido al proceso de consolidación. Se constató que la cohesión en virtud de un ensayo UU presentó una variación lineal de la disminución de su valor original hasta alcanzar el ángulo aproximado de 60° (δ =60°). En este punto, la cohesión toma un valor de cerca del 40% de su valor original. Desde este punto (δ = 60°) el aumento de la cohesión es lineal hasta que se obtiene una inclinación de 90° (δ = 90°). En esta posición la cohesión alcanza un valor de cerca de 40% por encima de su valor original. Cuando los ensayos se realizaron haciendo ensayos CU las mismas tendencias fueron encontradas.

La variación de la cohesión de su valor original a un valor menor a 60° de inclinación podría interpretarse como la reducción de la fuerza de la totalidad de los nanotubos, que podría encontrarse en el suelo debido a la formación geológica de este suelo. Teniendo en cuenta que la formación geológica y los procesos de erosión tienen un papel muy importante en el comportamiento mecánico de este tipo de suelo.

No se encontró una variación significativa cuando el procedimiento de normalización se utiliza para ambos tipos de pruebas, ya que los valores de cohesión mostraron la misma variación bajo diferentes ángulos de inclinación de las muestras. La cohesión normalizada mostró una tendencia similar a muchos otros tipos de suelo reportados en la literatura disponible.

En este documento, la evaluación del valor de la cohesión bajo diferentes ángulos de inclinación fue estudiada, aplicando dos de las más conocidas metodologías de prueba de corte directo. Esta investigación tiene muchos usos prácticos, la estabilidad de taludes, ingeniería de fundaciones, muros y muchas otras estructuras geotécnicas involucran este tipo de fenómenos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores hacemos extensivos nuestros agradecimientos a todos aquellos que contribuyeron con el desarrollo de este proyecto de investigación de pregrado; sin la cooperación desinteresada de ustedes, no hubiese sido posible su finalización.

REFERENCIAS

Arthur, I. R. F. & Menzies, B. K. (1972). *Inherent anisotropy in sand.*Geotechnique, 22(1), 115-128.

Duncan, J. M. & Seed, H. B. (1966). *Anisotropy and stress reorientation in clay*. J. Soil Mech. Fdn Engng Div. Am. Sot. Ciu. Engrs 92, SM5, 21-50.

Mitchell, R. J. (1972). *Some deviations from isotropy in lightly over- consolidated clay*. Geotechnique, 22(3), 459-467.

Verdugo, R. (2008). *Singularities of geotechnical properties of complex soils in seismic regions*. Journal of geotechnical and geoenviron- mental engineering, 134(7), July 1.

Wesley, L. D. (1973). *Some basic engineering properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia*. Geotechnique, 23(4), 471-494.

Wesley, L. D., (1977). *Shear strength properties of halloysite and allo- phane clays in Java, Indonesia*. Geotechnique, 27(2), 125-136