

RESISTENCIA CORTANTE EN LAS TEFRAS TIERRA BLANCA JOVEN: CEMENTACION EN LA UNIDAD D

Walter Hernández¹
whernandez@marn.gob.sv
Patricia de Hasbún²
pdhasbun@ing.uca.edu.sv
Francisco Montalvo¹

RESUMEN

Se presentan aspectos que tienen incidencia en la resistencia al corte, propiedad mecánica que nos permite evaluar si ante un determinado estado de esfuerzos el suelo será competente. Los suelos volcánicos presentan comportamientos de suelos parcialmente saturados, en los que la succión tiene un papel importante en su resistencia, puesto que la succión está relacionada con la humedad relativa y el fenómeno de la capilaridad en los suelos, donde los cambios ambientales (en la humedad del suelo) involucran cambios en la resistencia del suelo. La microfábrica es otra característica relacionada con la forma y tamaño de los granos, en la manera en que estos se agrupan y está relacionada con la resistencia friccionante. La cementación de los suelos volcánicos ocurre por procesos posdeposicionales en la que se forma por los agentes cementantes de minerales sulfatados y silicatados. La cementación produce cambios mineralógicos que se ven reflejados por los cambios físicos y mecánicos que experimentan estos suelos.

1. INTRODUCCIÓN

Las principales ciudades de El Salvador están asentadas sobre suelos volcánicos, es menester prestar atención al comportamiento físico y mecánico de los mismos. Unos de los aspectos a tratar en este trabajo, es analizar los distintos factores que pueden influir en la resistencia cortante de los suelos parcialmente saturados de TBJ, caracterizados por tener baja a muy baja consolidación, en parte, por tratarse de suelo de reciente formación 430 años DC (Dull et al, 2001).

La ausencia de minerales arcillosos en los productos piroclásticos de TBJ, indica que estos materiales no son cohesivos, ya que están compuestos predominantemente por limos arenosos (ML) y arenas limosas (SM); además, estos suelos no poseen finos plásticos, por lo que se esperaría que estos suelos no presentaran cohesión o que fuera muy baja. Esta aseveración puede ser correcta cuando se refiere a depósitos sedimentarios cuyos granos pueden ser poco hasta bien redondeados, pero cuando se trata de suelos volcánicos, hay que considerar factores como la succión, la microfábrica y la cementación, que influyen de algún modo, para que las partículas de los suelos se mantengan unidas. Estos tres factores juegan papeles importantes en la estabilidad de los taludes de TBJ, predominantemente constituidos por flujos piroclásticos o ignimbritas, cenizas de caída y escasa presencia de oleadas piroclásticas. En este trabajo se analizan solamente el segundo tipo de material por tener mayor distribución espacial, y se compara con el primero por ser el más abundante. La mineralogía secundaria da lugar al surgimiento de la cohesión verdadera a través de los enlaces entre las partículas del suelo y los minerales, dando resistencia cohesiva “real o verdadera” a través de los agentes cementantes sulfatados y silicatados. Los coloides de sílice (geles de SiO_2), por otro lado, constituyen un cementante que produce uniones débiles entre los granos muy angulares y que ayuda a mantener verticales los taludes en la época seca, que puede considerarse un tipo de resistencia cohesiva.

2. MECANISMOS ERUPTIVOS

El tipo de erupción de un volcán determina el tipo de material que expulsará. Cuando las erupciones son del tipo pliniana como ocurre con las del volcán de Ilopango y Coatepeque, son altamente explosivas y debido a la recurrente interacción de agua del lago con el magma, se generan eventos altamente explosivos que producen fragmentación magmática, que se caracteriza por la producción de gran cantidad de cenizas muy finas que son transportadas por el viento, y como este medio es un excelente seleccionador de partículas, produce suelos bastante uniformes, por ende, son suelos mal graduados. En este mismo evento eruptivo cuando la columna eruptiva densa por algún motivo pierde presión, se producen colapsos de esa columna que da lugar a otro tipo de material volcánico que se conoce como flujo

piroclástico, que se transporta por las quebradas y hondonadas, las que rellena a su paso formando un depósito que se conoce como ignimbrita. La figura 1 muestra las distintas unidades y su descripción genérica de cada depósito de TBJ.

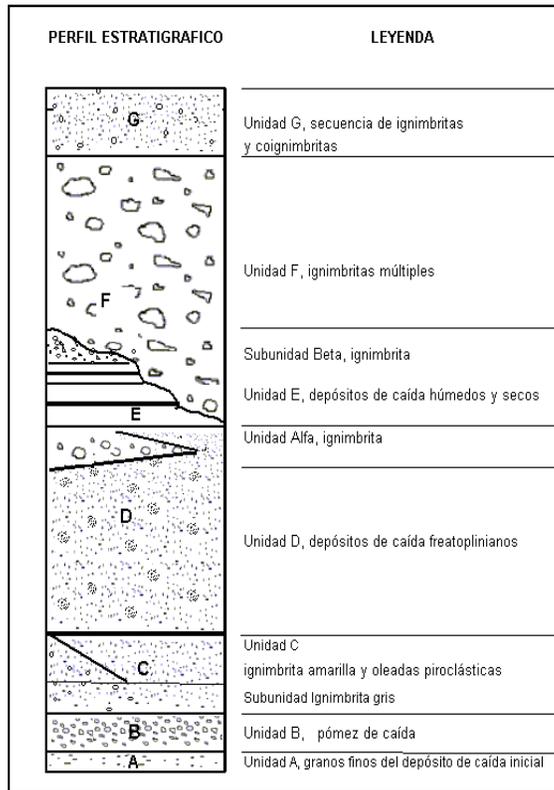


Figura 1. Perfil estratigráfico de las unidades de Tierra Blanca Joven.

Hernández (2004)

Existen otros tipos de depósitos volcánicos pero los depósitos de caída y las ignimbritas por su extensión y volumen respectivamente, son los de mayor interés desde el punto de vista de la ingeniería. Estos suelos que han tenido dos mecanismos distintos de formación y depositación, reflejan también diferencias en sus propiedades físicas y mecánicas.

3. RESISTENCIA CORTANTE

Los mecanismos físicos que controlan la resistencia cortante en los suelos son distintos a los de la mayoría de los materiales ingenieriles. La falla del suelo ocurre cuando los esfuerzos entre las partículas son tales que ellas deslizan o rotan pasando unas sobre otras, pudiendo ocurrir aplastamientos entre ellas. Coduto (1998) sostiene que la resistencia al corte depende principalmente de las interacciones entre las partículas y no de su resistencia interna. La interacción entre partículas puede dividirse como es sabido, en resistencia friccionante y resistencia cohesiva.

Resistencia friccionante- La resistencia cortante debida a la fricción es $s = \sigma' \tan \phi'$, donde:

s = resistencia cortante

σ' = esfuerzos efectivos actuando sobre el plano de falla

ϕ' = ángulo de fricción efectivo

La resistencia es expresada en términos de esfuerzos efectivos porque únicamente las partículas sólidas participan en la resistencia friccionante, y los esfuerzos efectivos describen los esfuerzos normales transmitidos por las partículas sólidas.

Resistencia cohesiva- Algunos suelos tienen resistencia cortante aún cuando el esfuerzo efectivo σ' , es cero, o al menos parece ser cero. Esta resistencia es la llamada *resistencia cohesiva*, y se describe usando la variable c' , que es llamada *cohesión efectiva*. Si un suelo tiene ambas resistencias cohesiva y friccionante, entonces la ecuación se expresa como:

$$s = c' + \sigma' \tan \phi'$$

La resistencia cohesiva se divide en dos tipos: cohesión verdadera y cohesión aparente (Coduto, 1998). La *cohesión verdadera* es la resistencia al corte que es realmente el resultado de los enlaces entre las partículas del suelo. Esos enlaces son los siguientes:

La *cementación*, causada por los enlaces químicos debido a la presencia de agentes cementantes como el carbonato de calcio (CaCO_3), óxido de hierro (Fe_2O_3) u otro tipo.

Atracciones electrostáticas y electromagnéticas mantienen las partículas unidas, pero estas fuerzas son muy pequeñas y no producen resistencia cortante significativa en los suelos.

Enlaces primarios de valencia, es un tipo de soldadura que ocurre en las arcillas cuando llegan a estar sobre consolidadas.

La cohesión aparente es la resistencia cortante que parece ser causada por enlaces entre las partículas del suelo, pero en realidad se trata de una resistencia friccionante disfrazada (Coduto, 1998). Las fuentes de cohesión aparente incluyen lo siguiente:

- *Presión de poros negativa*. No es considerada en el análisis de esfuerzos pero esta presión de poros negativa está presente en los suelos arriba del nivel del freático y se conoce también como **succión**. La resistencia cortante que corresponde a este esfuerzo efectivo adicional parece ser cohesiva, sin embargo, es realmente friccionante.

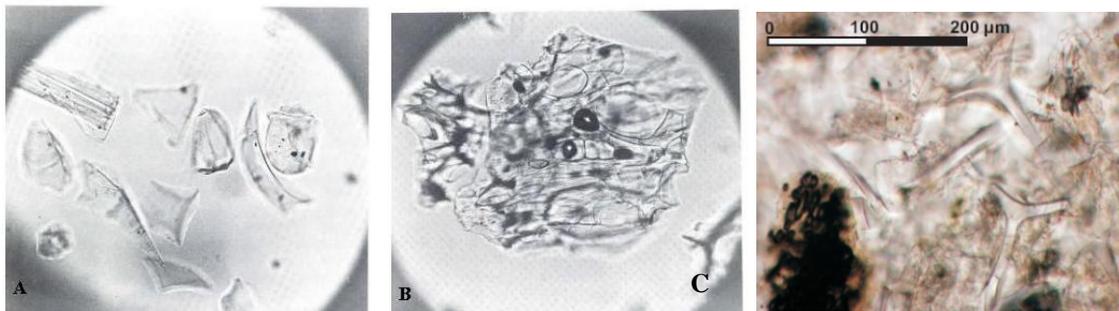
- *Fuerzas mecánicas aparentes*. Son aquellas fuerzas que se deben al entrelazado de partículas, y que se pueden desarrollar en suelos en los que la trabazón de los granos ofrecen cierta resistencia, dando como resultado una cohesión aparente. Esas fuerzas mecánicas aparentes son mayores cuando las partículas son muy angulares y de formas muy variadas, tal como ocurre con las trizas de vidrio volcánico de TBJ, cuya propiedad se le conoce como microfábrica.

Podemos resumir que los suelos volcánicos son influenciados por la microfábrica, la succión y la cementación.

3.1 Microfábrica

La microfábrica está relacionada con la textura de los suelos: tamaño y forma de los granos, estos dos aspectos están íntimamente relacionados con los mecanismos eruptivos. Las partículas de TBJ constituidas principalmente por vidrio volcánico, poseen formas particulares llamadas trizas, que son angulares y constituyen plaquitas irregulares y arqueadas, tubos alargados (agujas) y tubos en forma de “Y” (Figuras 2A y 2C). Estas formas de fragmentos producen mayores ángulos de fricción que los granos redondeados. Los granos con formas geométricas en TBJ son escasos y corresponden a los cristales primarios: plagioclasa,

anfíboles, piroxenos, ilmenita y magnetita. Estas partículas cuando se entremezclan con gravas compuestas por pómez vesicular (Figura 2B), cenizas tamaño arena, limo y arcillas no plásticas y posiblemente hasta partículas coloidales de sílice, todas se entrelazan y se amarran entre sí manteniéndose unidas, constituyendo lo que se denomina microfábrica. La microfábrica genera fuerzas mecánicas que producen resistencia cortante. Las partículas coloidales de sílice bajo la forma de gel, juegan un papel importante en estos suelos volcánicos parcialmente saturados, porque mejoran la unión entre los granos en presencia de humedad al producir una débil cementación (Bommer et al, 1998), haciendo un papel similar a la succión. Cuando la humedad se pierde, los geles se secan y se convierten en un cemento débil, que mantiene unidas las partículas del suelo, tornándose entonces en un tipo cohesión verdadera.



Hart y Steen-McIntyre (1983).

Kutterolf et al. (2008).

Figura 2. Fragmentos piroclásticos de vidrio volcánico, tamaño arena fina, colocados en base de aceite y vistas a través del microscopio. A) Trizas de vidrio alargadas, curvadas y plaquitas con puntas. B) Fragmento de pómez vesicular. C) Fotografía de trizas en forme de Y obtenidas a través de microscopio electrónico.

Guzmán y Melara (1996), relacionaron la verticalidad que presentan los taludes de TBJ, con la resistencia cortante producto de la interrelación de los granos (microfábrica). Este comportamiento no es una propiedad particular de TBJ, sino que es de todos los productos piroclásticos de cualquier centro eruptivo: ignimbritas, oleadas piroclásticas y cenizas de caída. Los suelos como los depósitos de caída de las unidades C, D y G, son mal graduados, por tanto, fácilmente erosionables, tienden a presentar menores ángulos de fricción porque los contactos entre los granos es menor que aquellos mejor graduados, como los de las ignimbritas, además, la relación de vacíos es más alta en esas unidades. El caso contrario

ocurre con los flujos piroclásticos Gris y Amarillo (unidades C), Alfa, Beta y F, los cuales en general poseen buena graduación, lo que se traduce en mayor número de contactos entre las partículas del suelo, generando valores más altos de ángulo de fricción y sus taludes son más estables.

3.2 Succión

En muchas partes del Area Metropolitana de San Salvador (AMSS), el agua subterránea se encuentra muy profunda, sin embargo, los suelos de TBJ presentan presiones de poros negativas debido a la humedad natural del terreno adquirida a partir de las lluvias. La succión es una fuerza activa que participa en el mantenimiento de los taludes verticales estables, mientras no lleguen al punto de saturación, de lo contrario, la succión desaparece por pérdida de la presión de poro negativa, y entonces los taludes se vuelven inestables y el derrumbe puede ocurrir por la acción de ambos procesos; pérdida de la succión y a su vez por el incremento de σ debido al peso producido por el agua. Bommer et al. (1998, 2001) y Rolo et al (2003), estudiaron las propiedades mecánicas, particularmente la succión. Llevaron a cabo mediciones para conocer la fuerza que opera en la succión, en las unidades superiores de la TBJ. El agua se encuentra formando meniscos entre las trizas del suelo de TBJ, produciendo fuerzas capilares que mantienen unidas a las partículas tan gruesas como las arenas y gravas de pómez y tan finas como los limos y las arcillas sin plasticidad (polvo volcánico).

3.3 Cementación

La cementación es el enlace químico producido por la presencia de agentes cementantes entre los granos del suelo. Se ha observado en el campo que ciertos taludes de TBJ se encuentran verticales aún cuando podrían haber perdido totalmente la humedad por evaporación, ocurriendo en respuesta a la pérdida de agua el proceso de formación de costras de minerales en la cara del talud cuando hay mineralización en los intersticios de los granos del suelo; también ocurre el proceso de la exfoliación, este último es la formación de discontinuidades paralelas a la cara del talud, debido a la contracción-dilatación por exposición a la acción solar (Hernández, 2004). La cementación ocurre en TBJ por el surgimiento de minerales

secundarios, los cuales se forman bastante después de la erupción y se desarrollan entre los intersticios de las partículas de esos depósitos. Estos minerales han sido observados en las caras de ciertos taludes de TBJ, donde ha tenido lugar el apareamiento de una costra de minerales claros. El proceso posdeposicional de la cementación podrá explicar en parte, la existencia de taludes verticales por largo tiempo en situaciones extremas de disparos por sismo y fuertes precipitaciones, en las cercanías del borde caldérico. La cementación en las cenizas de TBJ ocurre por el desarrollo de minerales sulfatados tales como epsomita, yeso y minerales silicatados: sodalita y fluorapofilita. Aún en pequeñas cantidades estos minerales pueden proveer significativa resistencia cohesiva.

Sobre la cara del talud de las Unidades C, D y en la base de la ignimbrita Alfa, se ha desarrollado una costra de minerales (Figura 3). El proceso de formación de esa mineralización, ocurre cuando al calentarse por acción solar la porción más externa de la superficie del talud, el agua intersticial se evapora y dicho vapor en el trayecto hacia la cara del talud arrastra consigo cationes y aniones desde los depósitos piroclásticos. La costra es formada gradualmente en la medida que más minerales son precipitados y las reacciones químicas para la formación de los cristales tienen lugar a la temperatura ambiente y presión atmosférica. Por eso, esa mineralización es estable a esas condiciones y forma costras esponjadas de 1 a 2 cm de espesor.



Figura 3. Mineralización secundaria en la unidad D de color blanquecino, compuesta por sulfatos y silicatos, en un talud de la quebrada El Arenal, tributario del Río Las Cañas, en el sector de la Carretera de Oro.

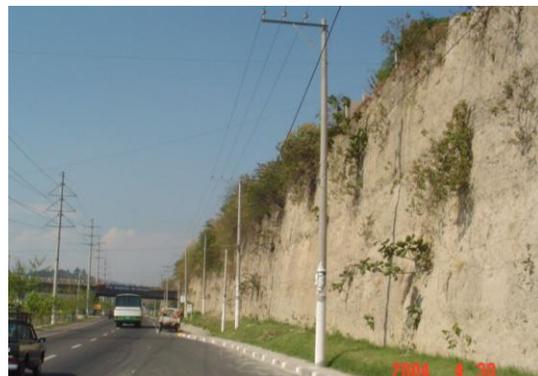


Figura 4. Taludes verticales en la Autopista San Salvador-San Miguel, cerca de Unicentro Alta Vista.

Una muestra de esa costra de minerales en la unidad D fue sometida al análisis de Difracción de Rayos X, para la determinación de la composición mineralógica, cuya composición deriva del tipo de cementante dentro de la formación. La Tabla 1 presenta los tipos de minerales secundarios, las composiciones químicas y los porcentajes correspondientes. El porcentaje de esos minerales indican que los minerales sulfatados son los más abundantes entre estos la epsomita presenta el 44 %, y los minerales silicatados ocupan el segundo lugar.

Tabla 1. Mineralógica secundaria en la unidad D.

Mineral	Composición química general	Unidad D (%)
Epsomita	sulfato de Mg	44
Yeso	sulfato de Ca	11
Melanterita	sulfato de Fe	3
Sodalita	silicato de Al, Na, Cl	12
Fluorapofilita	silicato de K y Ca	7

Los taludes de la autopista conocida como “Carretera de Oro”, fueron cortados hace casi 30 años (Véase figura 4), y su actual verticalidad evidencia que dichos taludes han soportado las lluvias torrenciales del huracán Mitch en 1998, que produjeron gran cantidad de deslizamientos y derrumbes en Centroamérica, los terremotos de octubre de 1986, y los de enero y febrero de 2001. Gran parte de los taludes de esa carretera están compuestos por ignimbritas (unidad F) y por depósitos de cenizas de caída en el techo (Unidad G), en las que juegan papeles importantes, la succión y la microfábrica. Se infiere por la presencia de minerales silicatados secundarios, la existencia de partículas coloidales de SiO₂ bajo la forma de geles en las tefras de TBJ, y se asume que sean la fuente de SiO₂ para la formación los minerales silicatados secundarios.

En taludes donde no existe cementación, los coloides producen uniones o ligaciones débiles entre las partículas del suelo cuando se secan, probablemente esa resistencia es la que se suma

a la resistencia producida por la microfábrica, que permiten que los taludes se mantengan verticales y no se caigan cuando la succión se vuelve cero en los meses de marzo y abril, que son los más secos del año. Lo anterior indica que la succión, la microfábrica y los geles, juegan el papel más importante en la época seca para la estabilidad de los taludes.

En la estación lluviosa son más frecuentes los desprendimientos de estos materiales como consecuencia de la pérdida de la presión negativa, debido al frecuente arribo al punto de saturación generando consecuentemente desprendimientos de volúmenes pequeños de tierra por la existencia de discontinuidades paralelas a la cara del talud. Esto podrá explicar los derrumbes repentinos que se dan en la época lluviosa, durante un día de sol y ausencia de sismos, donde el agua circula lentamente por los intersticios y se concentra al encontrar niveles de granulometría más fina, produciendo la saturación y el consecuente desprendimiento del talud.

4. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA UNIDAD D

La unidad D en el sector de la colonia Jardines de San Bartolo, Soyapango, es la que presenta la granulometría más fina y más uniforme. Es deleznable y posee granulometría de finos del 67 % al 73 % que pasan la malla 200. El espesor mayor medido es de 8.72 m en el talud del río Las Cañas. En la Tabla 2 el número 1 de la muestra indica la zona proximal (3 km del borde caldérico) y el 2 indica zona intermedia (11 km del borde caldérico). En la unidad D en las zonas intermedia y distal, la resistencia cortante depende más de cohesión aparente, mientras que en la zona proximal, dicha resistencia depende de la cementación. La resistencia friccionante depende de la microfábrica, la succión y de la presencia de coloides. La unidad D en estas zonas presenta las propiedades mecánicas y físicas menos apropiadas para la estabilidad de taludes, pero en la zona proximal cuando está cementada, deja de ser suelo y se ha convertido en una toba, que es una roca de baja dureza.

El peso específico del suelo de la unidad D es de 1.365 t/m^3 y se incrementa con la cementación alcanzando valores de 1.789 t/m^3 . La cohesión reportó el valor de 0.062 k/cm^2

pero en la muestra cementada se incrementa considerablemente a 0.778 k/cm^2 , lo que también influye en el ángulo de fricción interna que de 31.5° se incrementa a 38.15° (Tabla 2). Por otro lado, la relación de vacíos se ve disminuida al estar cementada y el color cambió de blanco a café oscuro. En la porción más baja de la planta de tratamiento de la urbanización Vista al Lago, también se observó cementación en la base de las unidades de la porción inferior de la TBJ.

Tabla 2. Parámetros físicos y mecánicos de la unidad D.

Muestra	Símbolo SUCS	w (%)	c kg/cm ²	ϕ (°)	Gs	Pvh Ton/m ³	Pvs Ton/m ³	n (%)	e	S (%)
D1	ML	20	0.778	38.2	2.400	1.789	1.491	37.8	0.608	78.9
D2a	ML	16	0.062	31.5	2.484	1.453	1.252	49.6	0.984	40.4
D2b	ML	18	0.081	31.4	2.388	1.365	1.156	51.6	1.066	40.3
Leyenda										
c: cohesión			w: contenido de humedad			e: Relación de vacíos				
Pvh: Peso volumétrico			ϕ : Ángulo de fricción			Gs: Gravedad específica de los sólidos				
n: Porosidad			Pvs: Peso volumétrico seco			S: Grado de saturación				

Nota: Laboratorio de suelos y materiales del ITCA-FEPADE

(Hernández, 2004).

5. CONCLUSIONES

- La secuencia piroclástica de la Tierra Blanca Joven (TBJ) está compuesta por 9 unidades vulcanológicas, las que son heterogéneas debido a la conjugación de varios factores: Cambios granulométricos dentro de cada unidad en la medida que alejan del centro eruptivo, incidencia de diferentes procesos eruptivos asociados a distintos mecanismos de deposición y cambios abruptos de espesores producidos por el relleno de los flujos piroclásticos sobre la paleotopografía. Tal complejidad, se refleja en los cambios de los parámetros físicos y mecánicos que hace que una misma unidad presente cierta dispersión de valores en sus parámetros.
- Los suelos de TBJ poseen ciertas propiedades como la microfábrica, la succión y la cementación, que operan de manera conjunta en estos suelos volcánicos. Cada una de esas propiedades individualmente tiene un nivel de influencia en dichos suelos, mejorando las resistencias friccionante y cohesiva. Las trizas del vidrio volcánico caracterizadas por ser muy irregulares como: placas, tubos rectos y curvilíneos, tubos en forma de “Y” y fragmentos de pómez vesicular; este conjunto de granos por sus formas particulares durante el proceso de

deposición quedan trabados entre sí, produciendo una pequeña resistencia friccionante. En taludes donde no existe cementación, los geles producen uniones débiles entre las partículas del suelo cuando se secan, esa resistencia se suma a la producida por la microfábrica, permitiendo que los taludes se mantengan verticales y no se caigan cuando la succión se vuelve cero en los meses más secos del año. La succión, los geles y la microfábrica, mantienen los taludes verticales en la época lluviosa mientras no lleguen al punto de saturación.

- Los resultados de los análisis granulométricos por el método mecánico y del hidrómetro, indicaron a excepción de la unidad D (ML), que las unidades de TBJ se clasifican como limos arenosos (ML) o arena limosa (SM), con componentes granulométricos de grava y arcilla no plástica. En la parte proximal presenta procesos de cementación, los cuales producen cambios físicos y mecánicos en estos suelos, reduciendo la porosidad y la relación de vacíos e incrementan el peso unitario, la cohesión, el ángulo de fricción interna. Los ángulos de fricción interna para la unidad D varían entre 31.37° y 38.15° (cementada) y los valores de cohesión en general son más bajos cuando los depósitos están más lejos del borde caldérico (0.290 kg/cm^2 en C y 0.062 kg/cm^2) y los más altos por cementación están más cerca de la fuente de emisión con 0.778 kg/cm^2 . El peso unitario seco más bajo es 1.15 Ton/m^3 y se incrementa a 1.49 Ton/m^3 cuando está cementado. La gravedad específica G_s no presenta variaciones significativas. La Unidad D en la zona intermedia y distal posee la granulometría más fina y no posee ningún tipo de mineralogía secundaria.

- Como resultado de la cementación mineralógica, se observan tres tipos de cambios: físicos, mecánicos y mineralógicos. Los cambios mecánicos aumentan c y ϕ , aumentando consecuentemente s . Los cambios físicos conllevan a cambios en la reducción de la porosidad y relación de vacíos, aumenta el peso específico del suelo debido a la cristalización de los minerales que reducen la porosidad, consecuentemente aumentan la consistencia del suelo transformándolo en toba, aumentado así la estabilidad de los taludes por el incremento de las resistencias friccionante y cohesiva. Los cambios mineralógicos ocurren por la interacción de minerales primarios con el agua con sulfatos y silicatos dando lugar al intercambio de iónico.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales con la empresa LaGeo por permitir la realización de los análisis de DRX en su laboratorio y a la geóloga Elizabeth de Henríquez por hacer los análisis y sus comentarios oportunos sobre la mineralogía secundaria. Al laboratorio de suelos del ITCA por el apoyo en los análisis de suelos.

6. REFERENCIAS.

- Bommer J, J., de Hasbún, P., Rolo R. y Fernández P. 1998. Propiedades Mecánicas de la Tierra Blanca y la Inestabilidad de Taludes. Revista ASIA, No. 129, El Salvador.
- Bommer J.J., Rolo R., Mitroulia A., and Berdousis P. 2001. Geotechnical Properties and seismic Slope stability of volcanic Soil. Elsevier Science Ltd. 12th European Conference on Earthquake Engineering.
- Bommer J.J. and Rodriguez, C. 2003. Earthquake-induced landslides in Central America. Engineering Geology and International Journal. Geologic and Engineering Characterization of Tierra Blanca Pyroclastic Deposits. Imperial College London.
- Coduto, D. P. 1998. Geotechnical Engineering. Prentice may, NJ. USA.
- Dull R.A.; Southon J.R. and Sheets P. 2001. Volcanism, Ecology and Culture: A reassessment of the volcan Ilopango TBJ eruption in the Southern Maya Realm. Latin American Antiquity Vol. 12 Number 1, Society for American Archeology.
- Guzmán M.A., y Melara E. 1996. Propiedades Ingenieriles del Suelo del Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador, C.A. Revista ASIA. No. 122. El Salvador.
- Hart, W.J., and Steen McIntyre, V. 1983. Tierra Blanca Joven Tephra from the AD 260 Eruption of Ilopango Caldera: in Archeology and Volcanism in Central America. University of Texas Press, Austin, Texas, p. 14-34.
- Hernández, W. 2004. Características geomecánicas y vulcanológicas de las tefras de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango. El Salvador. Tesis de Maestría en Tecnologías Geológicas. Universidad Politécnica de Madrid.
- Hernández, W. 2006. Mecanismo de ruptura de taludes en ignimbritas de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango, El Salvador. Revista ASIA-Asociación de Ingenieros y Arquitectos. 10 pag. El Salvador.
- Kutterolf, S, Freundt, A., Pérez, W., Schminke, U. 2008. The Pacific offshore record of plinian arc volcanism in Central America, part 2: Distal tephra from volcanoes in Guatemala and El Salvador as well as along-arc eruption chronology. IFM-GEOMAR, Kiel, Germany.
- Poetsch, T. 2004. Forms and dynamics of silica gel in a tuff-dominated soil complex: Results of micromorphological studies in the Central Highlands of Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, V.21 núm.1 p. 195-201. Universitat Hamburg.
- Rolo R., Bommer J., Houghton B., Vallance J., Berdousis P., Mavrommati Ch., and Murphy W. 2004. Geologic and Engineering characterization of Tierra Blanca pyroclastic ash deposits. Imperial College London. In Natural Hazards in El Salvador. The Geological Society of America. Special paper 375.

- Vallance J., and Houghton B. 1998. The AD 260 eruption at Lake Ilopango, El Salvador: A complex explosive eruption through a caldera lake. National Science Foundation, Research Proposal.
- William H., and Meyer-Abich H. 1953. El origen del Lago de Ilopango: Comunicaciones del Instituto Tropical Investigaciones Científicas v. 26; p. 1-8.