

8 PROCESOS DESESTABILIZADORES DE TALUDES

Cuando se construye una carretera con cortes altos o cuando por la acción natural de la corriente de un río, se forman taludes profundos, en ambos casos, esos taludes pasan a una situación de desequilibrio, por haber perdido el empuje lateral que los mantenía en equilibrio. Sobre esos taludes comienzan a operar una serie de procesos naturales que inciden en los movimientos de masa en ignimbritas y depósitos de caída. En vista que estos procesos se han observado más comúnmente en las unidades superiores de la TBJ, estos serán referidos a las Unidades F y G.

8.1 INTEMPERISMO FÍSICO EN IGNIMBRITAS GRUESAS

Sobre el material geológico que conforma esos taludes operan los procesos de meteorización física de la matriz de las ignimbritas que da paso a la exfoliación. La exfoliación es el mecanismo que genera discontinuidades que son planos de origen mecánico con direcciones preferenciales, que se forman debido a las contracciones y expansiones diferenciales producidas por la acción térmica diaria del sol y se caracterizan por tener superficies que separan en bloques el talud.

Los depósitos de flujos piroclásticos en el área metropolitana de San Salvador, se caracterizan por ser masivos e isótropos. Están compuestos por una matriz fina de cenizas, clara, de composición riolítica, que contiene fragmentos de pómez diseminados y líticos de tamaños variados. El espesor de estos flujos es variable pero por lo general son superiores a los 5 m. La unidad F está compuesta por una sucesión 5 de estos depósitos que llegan alcanzar en el conjunto 15 a 20 m de espesor.

Las observaciones de varios taludes dentro y fuera del área de estudio, donde afloran los depósitos de flujos piroclásticos de TBJ, muestran el apareamiento de discontinuidades con cierta frecuencia. Estas discontinuidades que inicialmente surgen bajo la forma de fisuras,

progresan a fracturas y luego a grietas, aparecen en los taludes dispuestas de manera regular dependiendo de la granulometría de la matriz. A partir de la parte más externa de la cara del talud, se comienza a formar una fisura o discontinuidad, la cual progresa paralela a la cara del talud (Figura 29). La fisura se abre lentamente debido a varios factores como la variación diurna de la temperatura, a la acción de las lluvias, la actividad biológica por parte del emplazamiento y desarrollo de raíces en su interior, a las vibraciones y sacudidas producidas por los sismos. Todos estos factores operan conjuntamente para el desarrollo de las grietas.

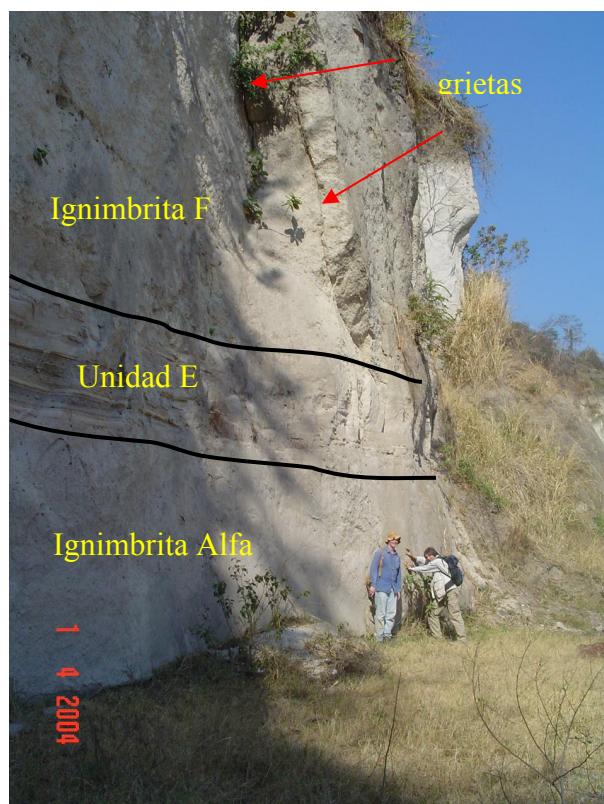


Figura 29. Discontinuidades paralelas en la cara del talud en depósitos de ignimbritas (Unidad F) de textura gruesa mostrando rebanadas anchas. Flechas rojas señalan discontinuidades. La grieta más externa finaliza en la base de la ignimbrita F.

Como este proceso es continuo, más hacia el interior de la cara del talud otra fisura comienza aparecer y así sucesivamente, hasta que aproximadamente a 1 a 1.5 m de la cara del talud y sobre la superficie del terreno, ya no se observan grietas ni fisuras, porque dichos factores ya

no tienen incidencia. Cuando se trata de flujos piroclásticos gruesos ricos en pómez “pumice flow” (Figura 30), las discontinuidades transversalmente muestran secciones en formas de cuñas alargadas, las que llegan a derrumbarse ante un disparo por lluvias y/o sismos fuertes. Los derrumbes resultantes en ambos casos corresponden a las rebanadas, y los volúmenes involucrados son pequeños a moderados, lo que dependerá de la altura del talud.



Figura 30. A) Textura gruesa en ignimbrita con fragmentos centimétricos de pómez en matriz de cenizas gruesas y lapilli de pómez. B) Textura fina en ignimbrita de Unidad G.

Cuando se trata de flujos piroclásticos finos o flujos de cenizas “ash flow”, con espesores hasta de 2 m como los encontrados en la Unidad G (Figura 30 y 34), las rebanadas son bastante delgadas, planas, se rompen y se desprenden ante eventos de lluvias y/o sismos fuertes, sin embargo, los desprendimientos son bastantes pequeños porque las discontinuidades básicamente limitan el volumen potencial que se desprenderá. Por esta razón, los taludes verticales de la Carretera de Oro construidos en 1980, no muestran evidencias de desprendimientos significativos de esos depósitos. A continuación se describen la forma de operar de los factores que intervienen en la generación de las discontinuidades.

8.2 PROCESO DE EXFOLIACIÓN

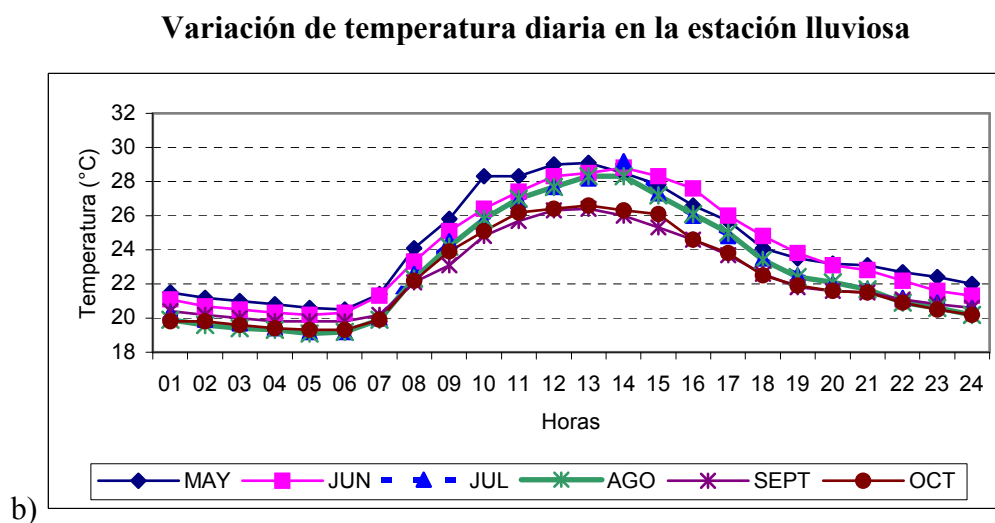
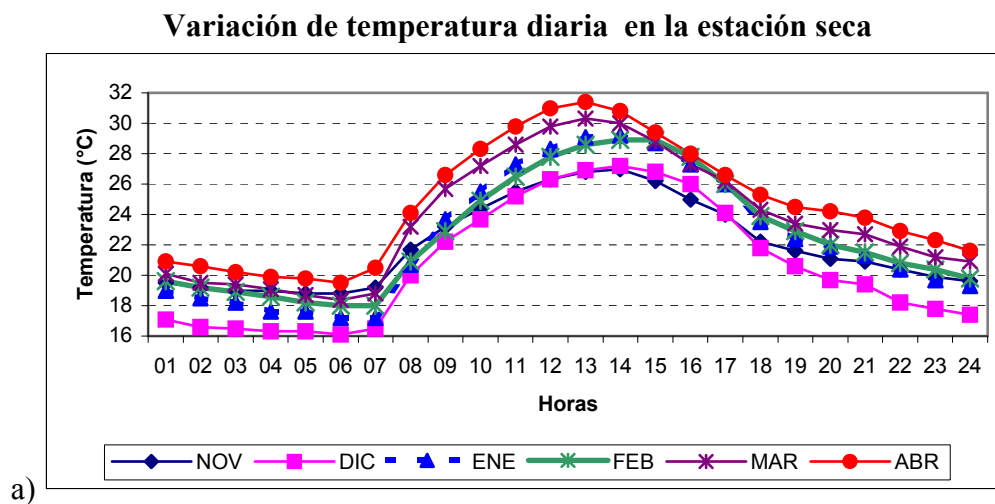
La naturaleza isótropa de los depósitos de flujos piroclásticos permite que el intemperismo físico opere en estos materiales cuando en taludes incide la acción solar, produciendo contracciones y expansiones diariamente, que llegan a generar discontinuidades paralelas a la cara del talud. Con el establecimiento de las discontinuidades esos materiales se vuelven anisótros y varios procesos operan a la vez en ellos para desestabilizarlos.

8.2.1 Cambios diarios de temperatura

En El Salvador los cambios de temperatura que experimenta el ciclo diurno, causan efectos térmicos en los depósitos de flujos piroclásticos expuestos a la actividad solar, calentándolos en grados diferentes, dependiendo de la intensidad de la radiación solar, cuya actividad se puede medir por la temperatura ambiente. Estos cambios de temperatura tienen un efecto de contracción y expansión en la cara del talud y en su cabecera llegan a producir un debilitamiento de la sección más externa del talud, de la que derivan la formación de fisuras y grietas. Los cambios bruscos de temperatura también se suman a este proceso de generación de discontinuidades, que ocurren cuando el suelo caliente es enfriado súbitamente por las lluvias repentinas diurnas. Las gráficas de la figura 31 muestran las variaciones de temperatura promedio diarias durante la estación seca y lluviosa para un período de 3 años (Estación Ilopango, 1975-1977), zona donde tienen excelentes exposiciones esos depósitos y donde frecuentemente ocurren derrumbes por socavación de la base por los ríos, por sismos fuertes, por lluvias prolongadas o por actividades antrópicas.

En la estación seca, abril es el mes más caliente (31.4°C max.- 19.5°C min.) y diciembre el menos caliente (27.2 °C max. – 16.1°C min.), mostrando una oscilación de temperatura máximas y mínimas para la estación seca de 11.9 °C y 11.1 °C. Durante la estación lluviosa, el mes de mayo es el más caliente (29.1 °C max.- 20.5°C min.) y septiembre el menos caliente (26.4 °C max.-19.8 °C min.), mostrando las oscilaciones de temperatura máximas y mínimas

estacionales de 8.6°C y 6.6°C en la estación lluviosa. Esto indica que durante la época seca los suelos se enfrían y se calientan más que en la época lluviosa.



Fuente: CIAGRO-SNET

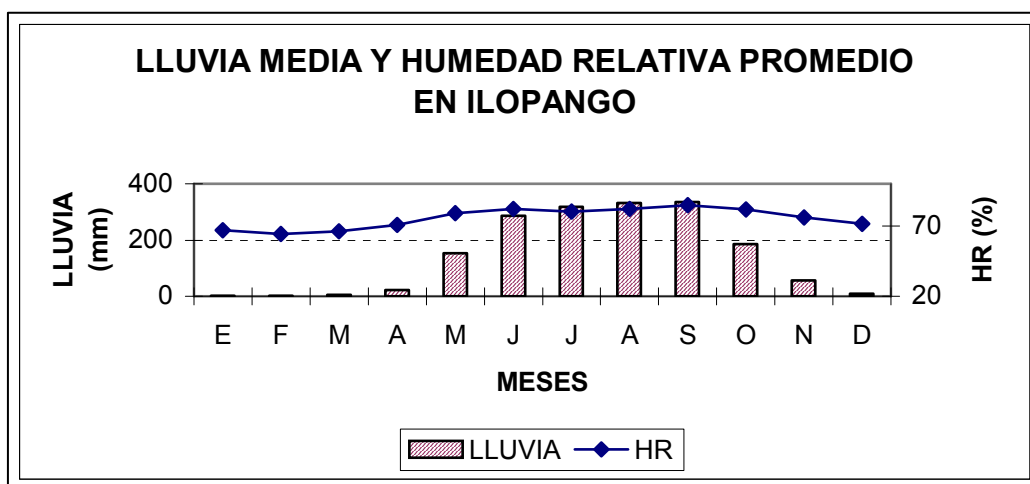
Figura 31. a) Variaciones de temperatura durante los meses de la estación seca y b) en la estación lluviosa. Estación de Ilopango serie climática 1975-1977.

8.2.2 Lluvias

El largo período de la estación lluviosa (21 de mayo- 16 de octubre) y las altas precipitaciones en la zona de la Estación Meteorológica de Ilopango, están reflejadas en la precipitación

promedio anual para la serie de 15 años (1987-2001), que es de 1,709 mm y septiembre es el mes más lluvioso para esa serie con 335.8 mm (Figura 32). A esa gran cantidad de agua meteórica anualmente están expuestos los materiales ignimbríticos mencionados, en donde las fisuras y grietas formadas por el proceso de exfoliación, favorece la infiltración de las aguas.

El agua dentro de las grietas produce un aumento de la presión de poro. A su vez, el agua produce erosión diferencial por impacto de las gotas de lluvias y el lavado de las aristas de las grietas por parte de las corrientes de agua, produciendo ensanchamientos de las grietas. Este proceso repetitivo a lo largo de varios años contribuye para que la grieta se abra, facilitando la circulación del agua, la penetración y desarrollo de raíces. En estas condiciones y ante la presencia de una lluvia torrencial, la sección formada por la discontinuidad se cae al aumentar el esfuerzo cortante por el aumento de peso del agua intersticial, venciendo así las fuerzas resistentes. Los derrumbes de los taludes de TBJ ocurren más frecuentemente en los meses de agosto y septiembre, que es cuando ya hay una significativa acumulación de agua en el suelo (Figura 32).



Fuente: CIAGRO-SNET

Figura 32. El diagrama de barras de la lluvia media mensual (1975-1977) muestra las altas acumulaciones de lluvia durante cada mes en el año y la humedad relativa promedio. Estación climatológica de Ilopango.

8.2.3 Actividad vegetal

Las raíces se desarrollan más fácilmente penetrando a lo largo de las fisuras y grietas de los taludes. Cuando las raíces se tornan más gruesas producen una presión lateral en el interior de esas discontinuidades, siendo la porción más débil y más externa del talud la que separa de la porción más fija, permitiendo que la discontinuidad quede más abierta y facilitando la infiltración del agua meteórica.

8.2.4 Actividad sísmica

Las ondas generadas por los sismos al propagarse desde sus fuentes generadoras pueden ser amplificadas o atenuadas, lo cual dependerá de las características de los materiales que se encuentren en su trayectoria de propagación. El paso de una onda sísmica de un medio más duro a otro sin consolidación, como es el caso de los depósitos de TBJ, produce una disminución de la velocidad de la onda al pasar por esos materiales, tal cambio de velocidad es acompañado por una amplificación de la onda sísmica en dichos materiales; teniéndose como resultado vibraciones del suelo más fuertes, lo que eventualmente llega a acentuar la abertura de las discontinuidades.

De acuerdo al Departamento Sismología del SNET, mensualmente se reportan entre 5 y 10 sismos sentidos por la población salvadoreña, esa frecuencia de sismos ofrece un idea de las vibraciones a las que los taludes son sometidos, lo cual, contribuye al desarrollo de las discontinuidades. Cuando un sismo es muy fuerte puede producir desprendimientos de la porción más externa de la cara del talud y una cara nueva aparece en la se irá a repetir este proceso. El proceso del establecimiento de la exfoliación en las ignimbritas de matriz gruesa se presenta esquemáticamente en la figura 33, en la cual, inciden todos los factores antes mencionados.

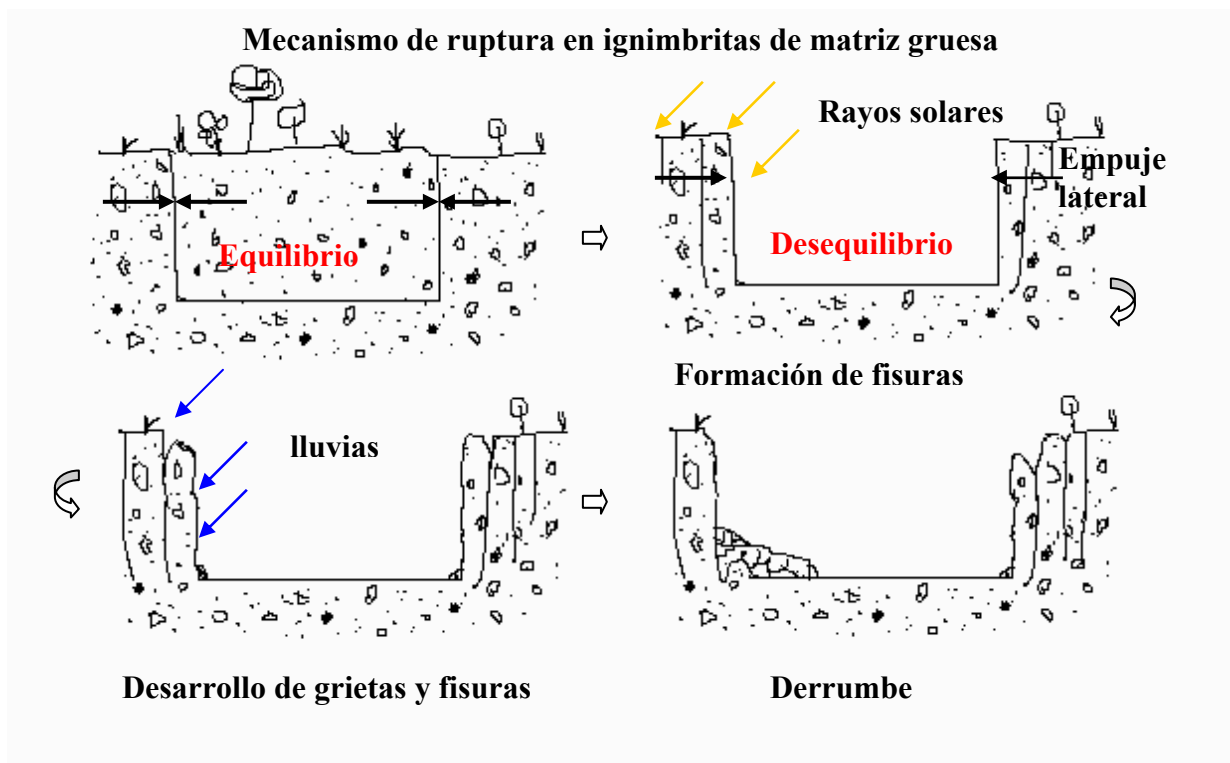


Figura 33. Intemperismo, ruptura y derrumbe de ignimbritas de la Unidad F.

8.3 INTEMPERISMO FÍSICO EN IGNIMBRITAS FINAS

El proceso de exfoliación en las ignimbritas de matriz finas es el mismo que en las ignimbritas gruesas, con la diferencia que las discontinuidades forman rebanadas verticales muy delgadas, del orden de centímetros, tal como lo muestra la figura 34. La Unidad G cuenta con una secuencia de este tipo de ignimbritas “ash flow”, y de depósitos de caída de cenizas “coignimbritas”, que dan un aspecto bandeado. Este arreglo de capas tiene implicaciones en el mecanismo de ruptura de la Unidad G que lo vuelve diferente y más complejo que en la Unidad F.

En la zona proximal los espesores de la Unidad G son bastante potentes llegando alcanzar hasta 15 m de espesor. En Soyapango los niveles de agua subterránea son mayores que 40 m de profundidad (Pozos 237 y 239, ANDA, 1984), y no tienen influencia en la inestabilidad de los taludes. Se asume que las ignimbritas de esta secuencia contienen el proceso de exfoliación, con grietas y fisuras casi verticales que facilitan la circulación del agua de lluvia hacia niveles más bajos, saturando de manera desigual los taludes. Las bandas con granulometría más finas “coignimbritas” retienen más agua que las más gruesas y muestran tonos más oscuros mientras que los tonos más claros corresponden a las bandas de granulometría más gruesa con menos agua, tal como lo muestra la figura 35.



Figura 34. Discontinuidades paralelas a la cara del talud en ignimbritas de textura fina (Unidad G), mostrando rebanadas muy delgadas del orden de pocos centímetros.

Cuando ocurren periodos prolongados de lluvias, hay poca insolación y la pérdida de agua del talud por evaporación es baja, la acumulación de agua en los poros del mismo es casi continua.

En este escenario, las lluvias que caen sobre la superficie del terreno de esos productos se infiltran gradualmente hacia niveles más bajos, aumentando el peso del talud que aumenta a su vez el esfuerzo cortante. Al mismo tiempo, lateralmente en la cara del talud el agua meteórica se infiltra en todas las capas, pero en aquellas de mayor espesor y con granulometría más uniforme tienden a ser las más vulnerables del paquete cuando se saturan, porque pierden las fuerzas cohesivas representadas por la succión que desaparecen al saturarse, y las fuerzas resistivas de esa capa son superadas por el esfuerzo cortante aumentado por el peso del suelo saturado, dando origen al derrumbe de toda la porción del talud sobre la capa saturada tal como lo muestra la figura 35 y esquemáticamente esa situación se muestra en la figura 36. La nueva superficie del talud es casi vertical, en parte por la influencia de las capas de ignimbritas con exfoliación dentro de la secuencia de la unidad G. El volumen caído pueden ser del orden de algunas decenas de metros cúbicos.

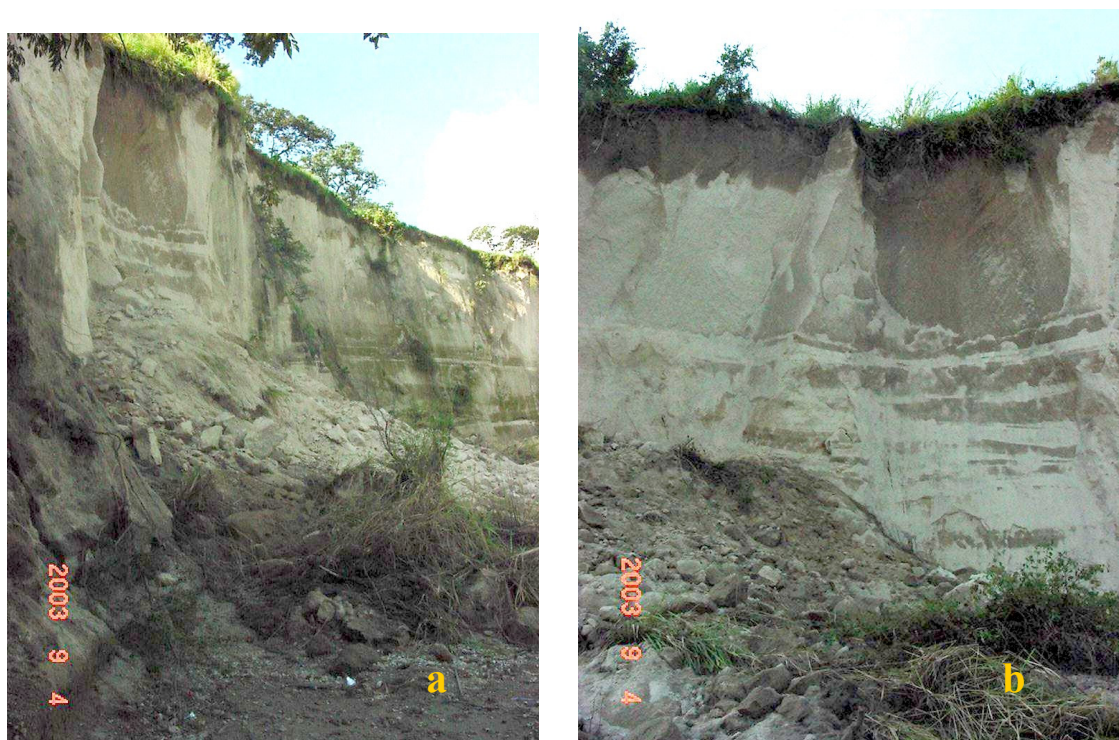


Figura 35. Talud en Unidad G en el margen derecho de la Quebrada El Arenal, contiguo al aeropuerto de Ilopango. a) vista lateral. b) Vista frontal.

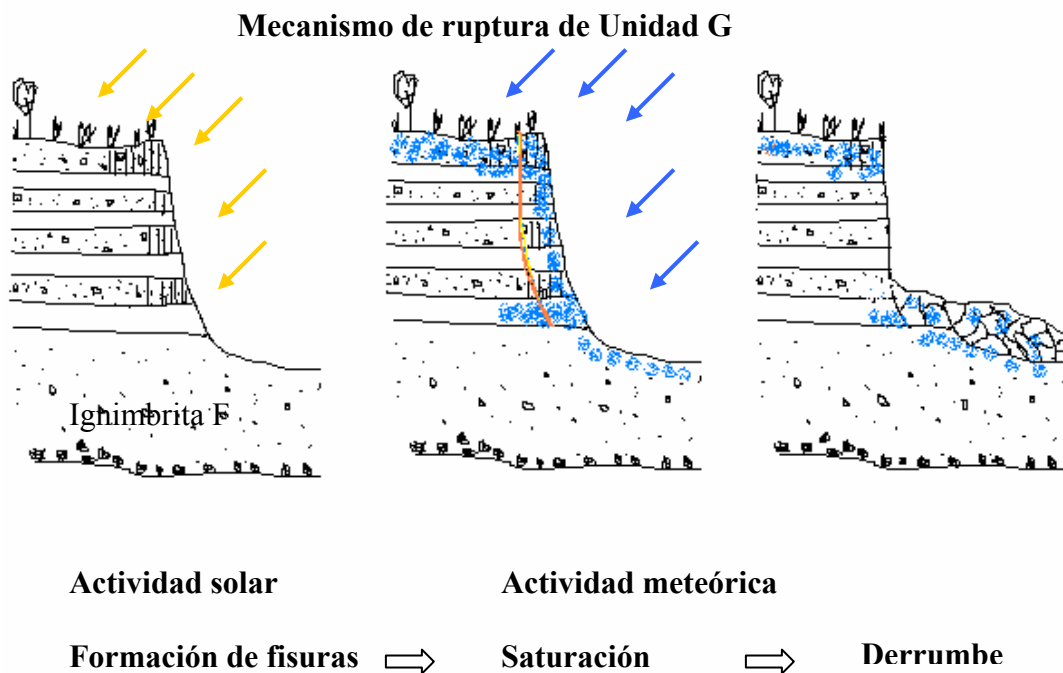


Figura 36. Intemperismo, ruptura y derrumbe de la ignimbrita de la Unidad G.

8.4 COHESION EN TBJ

Del análisis de las partículas de la distribución granulométricas, se dice que los productos piroclásticos de TBJ son no cohesivos y en este caso, $c = 0$, ya que están compuestos predominantemente por limos arenosos (MS), arenas limosas (SM) y limos (ML). Estos suelos no poseen plasticidad, no tienen finos plásticos y por tanto la cohesión es nula. Esa aseveración es correcta cuando se refiere a depósitos sedimentarios con esas características granulométricas, pero cuando se trata de suelos volcánicos, hay otros elementos que influyen para que las partículas de los suelos se mantengan unidas.

Después del estudio de varias unidades de la TBJ, se ha encontrado que existen ciertas propiedades como la microfábrica, la succión y la cementación que están operando de manera conjunta en suelos volcánicos. Cada una de esas propiedades individualmente tiene su propia

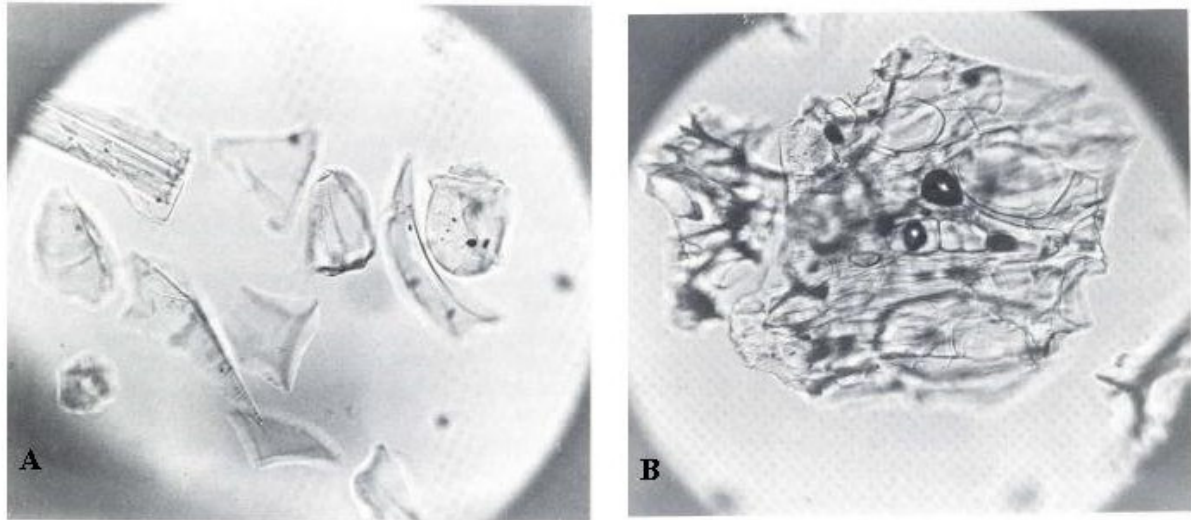
influencia en esos depósitos, dependiendo del proceso eruptivo involucrado, es decir, en un tipo de suelo opera mejor una propiedad que otra.

8.4.1 Microfábrica

Las partículas de TBJ constituidas principalmente por vidrio volcánico, poseen formas muy particulares llamadas trizas o esquirlas vítreas (glass shard), cuyas formas son angulares, alargadas, muy irregulares y arqueadas (Véase figura 37A), las formas geométricas provienen únicamente de los cristales que son escasos. Estas partículas cuando se entremezclan con fragmentos de variados tamaños pómez vesicular (Figura 37B), cenizas tamaño arena, limo y arcilla y hasta partículas coloidales de sílice, todas se entrelazan y se amarran entre sí manteniéndose unidas, constituyendo lo que se denomina microfábrica. Esa variedad de formas y tamaños de partículas vítreas hacen del conjunto algo complejo y es una característica muy importante, sobretodo, en los suelos que componen las ignimbritas de la TBJ. Las partículas coloidales y/o geles de sílice juegan un papel importante en estos suelos volcánicos parcialmente saturados, mejorando la unión entre las partículas en presencia de humedad al producir una débil cementación (Bommer, J. et al. 2001). Los suelos como los depósitos de caída de TBJ, desde el punto de vista geotécnico son descritos como mal graduados (SP), producen taludes inestables y la cohesión por la microfábrica es muy baja, debido a que tienden a ser suelos relativamente uniformes y cuando están lejos del centro de emisión no poseen cementación por silicatos de calcio y sulfatos de calcio.

En la microfábrica están relacionadas la distribución granulométrica, la forma de los granos, orientación, presencia de cemento o no y su empaquetadura. La empaquetadura de casi todos los suelos de TBJ no es compacta, característica que se refleja en la porosidad alta y densidad del suelo relativamente baja y eso mismo es la causa que sean fácilmente erosionables, principalmente las Unidades D y G. La empaquetadura ha sido observada en un fragmento de cenizas, donde se observan los espacios vacíos entre los fragmentos (Rolo, R., et al, 2004). La microfábrica está relacionada con cierta cohesión que presentan los materiales de TBJ y eso se

refirieron Guzmán y Melara (1996), quienes la relacionaron con la verticalidad que presentan los taludes de TBJ.



Fuente: Hart, W. y Steen-McIntyre, V.1983.

Figura 37. 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.

8.4.2 Succión

La microfábrica produce cierta cohesión la que es aún mejorada por la humedad natural en este tipo de suelos parcialmente saturados. Bommer et al. (1998, 2001) y Rolo et al. (2003), estudiaron las propiedades mecánicas, la succión y han llevado 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 los fragmentos piroclásticos produciendo fuerzas capilares que mantienen unidas las partículas tan finas como los limos, arcillas y gruesas como las gravas y bloques de pómez.

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 los meniscos, los taludes entran en inestabilidad y el derrumbe puede ocurrir por el aumento de peso por el agua. Este mismo comportamiento se esperaría en el caso de la pérdida de agua por desecación, por pérdida de los meniscos (Bommer, et al. 1998), lo cual frecuentemente ocurre en los depósitos de caída cuando no están cementados. Sin embargo, en la zona del Aeropuerto Ilopango los taludes se encuentran verticales aún cuando han perdido totalmente la humedad por evaporación, pero lo que ocurre en respuesta a la pérdida de agua es el proceso de formación de costras cuando hay mineralización en los intersticios de los granos del suelo, también ocurre la exfoliación que se ha explicado en el apartado 8.2 de este capítulo. Lo que podría sumarse para mantener los taludes verticales por tanto tiempo en situaciones extremas de disparos por sismos y precipitaciones, podría estar asociado al proceso post-deposicional conocido como cementación secundaria que se da en las cercanías al centro eruptivo.

8.4.3 Cementación

Durante la fase eruptiva el volátil SO_2 en la zona de difusión reacciona con OH catalizado por la energía solar, para dar lugar al ácido sulfúrico (H_2SO_4). Otro gas importante es el ácido clorídrico (HCl) que reacciona con H_2O para formar un ácido diluido. Ambos ácidos entran en contacto con los depósitos piroclásticos, a los cuales atacan e intercambian iones principalmente con los minerales (piroxenos, anfíboles, plagioclasas y magnetita). De ese intercambio iónico surgen los primeros compuestos que posteriormente precipitan formando minerales sulfatados que cristalizan entre los poros de los suelos volcánicos, produciendo cementación de los mismos. Los ácidos también reaccionan con las partículas de vidrio volcánico más finas como las arcillas y los coloides, para formar minerales silicatados, que también producen sellado de los poros donde estos se forman, dando más firmeza a los suelos.

Los taludes de la Autopista San Salvador-San Miguel más conocida como “Carretera de Oro”, fueron cortados hace más de 20 años (Véase figura 38), y su actual verticalidad evidencia que dichos taludes han soportado las lluvias torrenciales como el Mitch que produjeron gran cantidad de deslizamientos y derrumbes en Centroamérica (1998), 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 de la Unidad F y G, en las que juegan papeles importantes la microfábrica, la succión y la cementación que se da en las cercanías al centro eruptivo y en los flujos piroclásticos.

Esos minerales se encuentran en los intersticios de las partículas de esos depósitos y su presencia fue observada en las caras de ciertos taludes, donde ha tenido lugar el crecimiento de minerales claros. Sobre la cara del talud de las Unidades C, D y en la base de la ignimbrita Alfa, se observó el desarrollo de una costra de mineralización secundaria (Figura 39). El mecanismo 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 iones, cationes desde los depósitos piroclásticos. Los cristales gradualmente se van formando conforme van recibiendo sus componentes químicos depositados como precipitados y las reacciones químicas para la formación de los cristales tiene lugar a la temperatura ambiente y presión atmosférica. Por eso, esa mineralización es estable en esas condiciones y forma costras de algunos milímetros de espesor.

Muestras de esos minerales fueron sometidas al análisis de Difracción de Rayos X, para la determinación de la composición mineralógica, cuyas composiciones derivan del tipo de cementante dentro de la formación. Los minerales encontradas en las muestras C1 y D1 fueron los mismos a excepción de loewerita que se encontró solamente en C1. En la Tabla 5 se presentan los tipos de minerales secundarios obtenidos en costras, sus composiciones químicas y los porcentajes correspondientes, en las muestras C1 (muestra de laboratorio M-1) y D1 (muestra de laboratorio M2).



Figura 38. Taludes verticales en la Autopista San Salvador-San Miguel, frente a Unicentro Alta Vista. A) Talud inferior de unos 8 m de altura en Ignimbrita F. B) Talud completo de unos 12 m de altura separados por una berma angosta con la porción superior compuesta por la Unidad G.



Figura 39. Mineralización secundaria en la Unidad D formada principalmente por sulfatos y secundariamente por silicatos, en un talud de la Qda. El Arenal, tributario del Río Las Cañas, en el sector de la Autopista San Salvador- San Miguel.

Tabla No. 5. Composición mineralógica secundaria en TBJ

MINERAL SECUNDARIO	COMPOSICION QUÍMICA GENERAL	*MUESTRA M-1	MUESTRA M-2	MUESTRA M-3
		C1 (%)	D1 (%)	F1 (%)
Epsomita	sulfato de Mg	51	44	0
Yeso	sulfato de Ca	11	11	0
Melanterita	sulfato de Fe	4	3	0
Loewita	sulfato de Na y Mg	8	0	0
Fluorapofilita	silicato de K y Ca	9	7	0
Sodalita	silicato de Al, Na y Cl	6	12	0

* Control del laboratorio

El porcentaje de esos minerales indican que epsomita es el mineral más abundante en las costras de ambas unidades con 51 % (C1) y 44 % (D1), los otros minerales pueden observarse en la Tabla 5. Solamente una muestra de la ignimbrita F1 (M-3) no evidenció la presencia de estos, lo que conduce a pensar que la cementación no es uniforme en los depósitos, ya que las ignimbritas del techo parecen estar más cohesivas que las de la base. Sería conveniente tomar muestras de cada flujo que conforma dicha unidad, para conocer la presencia de cementantes. Los resultados de DRX de las tres muestras se encuentran en el Anexo D (DOCUMENTO 2: ANEXOS).

Como resultado de la cementación parcial, se observan dos tipos de cambios en las unidades: cambios físicos y cambios mineralógicos. Los cambios físicos conllevan a cambios en la porosidad, relación de vacíos y densidad de las rocas, debido a la cristalización de los minerales que reducen la porosidad y a su vez aumentan la densidad del suelo, consecuentemente, aumentan tanto la dureza de los suelos que los contienen como la estabilidad de los taludes al aumentar la cohesión. Los cambios mineralógicos ocurren por la interacción de minerales primarios con el agua rica en soluciones sulfatadas y silicatadas, donde ocurre el intercambio de iones y cationes. Esta cementación en general es mayor en dirección al borde de la caldera y disminuye en la medida que se aleja de este.