

7 CARACTERIZACION GEOMECANICA Y ASPECTOS VULCANOLOGICOS DE TBJ

La observación de las unidades TBJ ha permitido identificar características específicas en relación a su textura, estructura, espesores, componentes y color. Las unidades superiores de TBJ tienen el peculiar color blanco cuando están secas, pero cuando se humedecen durante la época lluviosa, surgen una serie de tonalidades beige, rosado pálido, contrastando con colores blanquecinos en el interior de las unidades, que dan un aspecto estratificado. Las Unidades D y E por otro lado, cuando están cercanas al centro de emisión presentan colores café, café oscuro y cuando están alejadas los colores son más claros y en el caso de la D llega a ser beige claro hasta blanco. La Unidad C está conformada por dos ignimbritas; la inferior es de color gris por la abundancia de líticos andesíticos y la superior de color amarillento, por los procesos de oxidación que se han producido en ella debido a los abundantes líticos hidrotermalizados color marrón. Este cambio de tonalidades, entre otras características, está en favor de su identificación en el campo.

Para el propósito de la caracterización geomecánica se ha dividido la Unidad F en dos (F y G). La unidad F corresponde a una secuencia de hasta 5 depósitos masivos de ignimbritas muy similares. La unidad G sobreyace la F y está constituida por una secuencia de flujos piroclásticos finos, masivos, de espesores delgados, muy poco compactos y sus depósitos de caída de cenizas (coignimbritas), no cohesivos, de textura fina y relativamente uniforme.

7.1 SOBRE LOS PARÁMETROS DE LABORATORIO

En este apartado se tratarán aspectos generales sobre los parámetros físicos y mecánicos de las cenizas de la TBJ, así como los tipos de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos que se han realizado en las distintas unidades.

Contenido de humedad (ω). El agua es un factor muy importante en el comportamiento de todo tipo de suelo. Los suelos de las montañas del norte de El Salvador, están constituidos en gran parte por suelos residuales con espesores importantes de arcillas,

responden de manera diferente a las lluvias intensas de corta duración que los materiales de granulación gruesa a fina, sin cohesión, que se encuentran en la superficie de la cordillera volcánica joven. La humedad determinada en las muestras ensayadas depende de los períodos de lluvias y de la insolación a la que han estado expuestos los terrenos, específicamente los taludes que son los lugares donde se llevó a cabo la toma de muestras inalteradas.

La determinación del contenido de humedad se lleva a cabo mediante una prueba sencilla que se realiza en forma rutinaria en todo estudio de suelo, consiste en pesar una muestra antes y después de secarla, de forma que la diferencia en peso obtenida es la cantidad de agua que contenía. Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio, siguiendo lo especificado por la norma ASTM D2216.

Limites de consistencia. Los suelos presentan diferentes estados de consistencia, que varían desde el estado sólido hasta el estado líquido, al variar el contenido de agua. A medida que se añade agua al suelo, se observa la variación de algunas características que han permitido definir ciertas fronteras llamadas límites de consistencia. Los límites de consistencia más importantes en los suelos son: el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). El primero representa el valor de consistencia entre los estados semilíquido y plástico del suelo, el segundo es la frontera entre el estado plástico y el estado semisólido.

En las muestras analizadas se trató de obtener ambos límites de consistencia, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D 4318, pero solamente fue posible obtener el límite líquido (LL). No se logró determinar el límite plástico (LP) en ninguna de las muestras debido a la inexistencia de finos plásticos. Esto se debe a que los finos presentes en estos suelos, están relacionados con partículas compuestas en su mayoría por vidrio volcánico (99 %) y en escasa presencia de minerales claros (plagioclasa), minerales oscuros (hornblenda, hiperstena y magnetita) y en moderada presencia de líticos (Hart, 1981), que no poseen plasticidad.

Análisis granulométrico. La distribución de los diferentes tamaños de las partículas que forman el suelo, ha sido desde los inicios de la investigación de las propiedades de los suelos motivo de especial atención. Actualmente el análisis de la granulometría,

conjuntamente con la determinación de los límites de consistencia, constituyen la base para el establecimiento de la clasificación de los suelos desde el punto de vista geotécnico. Los análisis granulométricos practicados en las muestras de TBJ, se realizaron por el método mecánico y del hidrómetro, de acuerdo a la norma ASTM D-422. El objetivo de este ensayo es determinar la distribución de los tamaños de las partículas constituyentes del suelo, y a partir de los resultados, obtener la clasificación de los suelos presentes en los depósitos de caída y depósitos de flujos piroclásticos.

Resistencia al esfuerzo cortante. Evaluar la resistencia al esfuerzo cortante que presentan los suelos, constituye uno de los aspectos fundamentales de la mecánica de suelos para analizar la estabilidad de los terrenos que deben sustentar obras civiles y la estabilidad de taludes. Para la evaluación de esta propiedad es necesario determinar dos parámetros: el ángulo de fricción interna del suelo (Φ) y la cohesión (c), los cuales juegan papeles importantes en la determinación de la resistencia al corte, $\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \Phi$; esos parámetros se obtienen a partir de los ensayos de compresión triaxial o de corte directo.

La cohesión es una propiedad también relacionada con la distribución del tamaño de las partículas y representa una medida de la adherencia entre ellas en el suelo. Los suelos cohesivos tienen mayor proporción de partículas de grano fino, las cuales se atraen mutuamente aún con la ausencia de agua. Dicha atracción es más evidente cuando las partículas finas incluyen una cantidad importante de arcillas. En general, los suelos con escasa cantidad de fracción de finos se mantienen unidos cuando están húmedos, pero se disgregan en granos individuales o en terrones después que se secan. Los suelos con esas características son denominados suelos no cohesivos y no son plásticos para cualquier contenido de agua.

Los suelos no cohesivos como los granulares (arenas y gravas) tienen valores prácticamente de $c = 0$. Los suelos constituidos por arenas limosas (SM) o limos arenosos (ML), son considerados suelos no cohesivos por carecer de plasticidad y el esfuerzo cortante en este caso, depende solamente del ángulo de rozamiento o ángulo de fricción interna (Φ). La distribución granulométrica de las ignimbritas de TBJ de Ilopango, tiene una composición granulométrica similar a la antes mencionada y también carecen de

arcillas plásticas. Los depósitos piroclásticos de TBJ revisten de especial importancia porque a pesar de ser consideradas como no cohesivos, sus taludes de 10 a 25 m de altura, en quebradas y ríos, tienden naturalmente a permanecer verticales (ver figura 20).



Figura 20. a) Tierra Blanca Joven en taludes verticales de la Unidad F en el cauce de Quebrada El Limón. b) Margen izquierda del Río Las Cañas con taludes verticales compuestos por la Ignimbrita Gris.

La gravedad específica (G_s). El proceso de obtención del valor de la gravedad específica se realizó de acuerdo a la normativa ASTM D 854 y los valores empleados en la Tabla 3, corresponden al promedio de dos pruebas realizadas por muestra.

Peso volumétrico húmedo (γ). El peso volumétrico o peso unitario depende del peso de los sólidos constituyentes, de la porosidad y de la cantidad de agua contenida en la muestra. Se determinan comúnmente los valores de peso volumétrico húmedo, cuando la muestra presenta algún contenido de agua y su correspondiente peso volumétrico seco (γ_s).

7.2 PARAMETROS FISICOS Y MECÁNICOS DE TBJ

En este apartado se analizan y se presentan los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de suelos realizadas en las unidades de la TBJ (ANEXO B). Los parámetros físicos y mecánicos estudiados se describirán para las cinco unidades empezando desde la unidad más superficial hacia la más profunda.

7.2.1 Unidad G

Esta unidad es la capa superior de la secuencia de la Tierra Blanca Joven. La Unidad G está conformada por una secuencia de depósitos de ignimbritas y coignimbritas que se caracterizan por tener materiales finos, poco consolidados hasta inconsolidados. Los flujos piroclásticos de cenizas finas “ash flows” son de delgado espesor, masivos probablemente poco cementados. Las coignimbritas derivadas de esos flujos tiene un aspecto estratificado, con bandas extremadamente finas, mal graduadas y algunas bandas poseen suelos sueltos; tienen moderada presencia de lapilli acrecional, que son pequeñas esferas con finas bandas concéntricas (Figura 26). La Unidad G ha sido sometida a intensa erosión y los actuales espesores constituyen el remanente desde que se depositó. Reviste de importancia porque sobre estos materiales es donde se ha construido la mayor parte de la zona metropolitana de San Salvador.

Esta unidad posee los mayores espesores en la parte sur donde alcanza hasta 15 m (puntos 12 y 65) y se adelgaza significativamente hacia Apopa y Tonacatepeque, donde presenta espesores alrededor de 1.5 m (puntos 8 y 10). Las muestras G1 y G2 fueron obtenidas en los puntos 1 y 2 respectivamente, que están separados 7 km uno de otro. Las muestras inalteradas corresponden a las ignimbritas con el espesor y cohesión necesarios que permiten extraerlas.

7.2.1.1 Contenido de humedad (ω)

Los contenidos de humedad obtenidos fueron para la muestra G1: $\omega = 14\%$ y para G2: $\omega = 27\%$ (Tabla 3). El mayor grado de humedad para la muestra G2, dificultó la extracción de la muestra inalterada, y puede explicarse debido a la mayor cantidad de finos que posee y que retiene relativamente más agua.

7.2.1.2 Límites de consistencia

Los límites de consistencia investigados en las muestras G1 y G2 según la norma ASTM D 4318, son el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). Los resultados de límite líquido son LL= 24 para G1 y LL= 31 para G2 (Tabla3). El límite plástico (LP) no fue

posible obtenerse debido a que se tratan de muestras con carencia de finos plásticos (NP). Por tanto, el índice plástico (IP) que se obtiene de la diferencia del LL-LP, y que representa el intervalo de humedades para pasar del estado semisólido a semilíquido, en el presente caso, IP = nulo. Los resultados de LL en ambas muestras, indican que la Unidad G está constituida por un suelo que carece de plasticidad y que admite poca agua.

7.2.1.3 Análisis granulométrico

Al observar el porcentaje que pasa el tamiz No. 4 en las muestras G1 y G2 (Anexo B), se puede determinar que son bastante similares con 98.16 % en la G1 y el 99.66 % en la G2, siendo la diferencia muy pequeña (1.5 %). Esta diferencia se incrementa hasta el 25.24 % en el tamiz No. 200 (0.075 mm), donde el porcentaje que pasa en la G1 es de 45.6 % y en G2 es 73.57 %. Esta mayor diferencia en los porcentajes de fracciones finas que logran pasar el tamiz 200 permite diferenciarlos en su identificación como arena limosa (SM) en el caso de G1 y limo arenoso (ML) para G2.

La fracción que pasó la malla No. 200 fue analizada por el método del hidrómetro para la determinar la distribución de los granos finos. Las gráficas de la figura 21 muestran que la curva para G2 se encuentra desplazada hacia la derecha, por tanto, dispone relativamente de mayor porcentaje en finos en relación a los diámetros, y que la partícula de limo es el tamaño dominante. Sin embargo, tanto en la zona intermedia como en la proximal, posee partículas tamaño arcillas, con 4.9 % (1.65 μ) en G1 y 5.8 % (1.60 μ) en G2. En ambos casos, se cuenta con porcentajes significativos de partículas arcillas que carecen de plasticidad y coloides de sílice (SiO₂), que dan un aspecto claro y turbio al agua. Los resultados del análisis granulométrico por el método del hidrómetro, se encuentran en el Anexo C (Documento No. 2: ANEXOS).

Las diferencias en porcentajes en virtud al diámetro de grano en la Unidad G, se debe a que la distancia es un factor importante en depósitos formados por partículas transportadas por flujos piroclásticos. De modo que la muestra G2 situada a 11 km del borde caldérico evidencia una granulometría más fina que la G1 en la parte proximal (3km). Esta disminución es coherente con la pérdida de energía cinética durante el transporte conforme

aumenta la distancia de un flujo piroclástico, a partir del colapso de columna eruptiva central.

La Unidad G está constituida por partículas de limo, arena, poca grava y algo de arcillas, que se formaron en la fase final de una erupción pliniana por la interacción de un magma riolítico y el agua del lago de Ilopango. Esta interacción fue acompañada de fragmentación magmática y liberación de mucha energía. La presencia de partículas tan finas como las arcillas es importante porque indica el alto grado de fragmentación que alcanzó la erupción en su etapa final. Este tipo de arcillas compuesto por vidrio volcánico, es conocido por geotecnistas como harina de piedra (Juárez, E. y Rico, A., 1980) y polvo de roca (Gonzalez de Vallejo, L., et al. 2202).

Coefficientes de uniformidad y curvatura. Para una mejor definición de la granulometría de un suelo grueso, se utilizan los coeficientes de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc), que sirve para definir la graduación. Estos coeficientes se aplican únicamente a suelos gruesos como G1, que tiene más del 50 % de material que no pasa la malla No. 200. El coeficiente de uniformidad (Cu), es dado por la relación $Cu = D_{60} / D_{10}$, su valor decrece cuando la uniformidad del suelo aumenta. Una distribución granulométrica uniforme tiene generalmente valores menores que 3. El coeficiente de curvatura $Cc = (D_{30})^2 / D_{60} \times D_{10}$, es un dato complementario que permite establecer si un suelo es bien graduado. Un suelo es bien graduado cuando $Cu \geq 6$ (ASTM D2487-98) y Cc está comprendido entre 1 y 3. De las curvas del gráfico de la figura 21, se obtienen los diámetros D_{10} , D_{30} , D_{60} , para sus correspondientes porcentajes en peso que pasan:

Para G1, $Cu = 0.18 / 0.0032 = 56$; y $Cc = (0.02)^2 / (0.18 \times 0.0032) = 0.69$. El coeficiente de uniformidad para G1, $Cu = 56$ y el coeficiente de curvatura $Cc = 0.69$. Por tanto, al no cumplir con ambos requisitos, este suelo es mal graduado (SP).

7.2.1.4 Angulo de fricción Interna (Φ)

El ángulo de fricción interna resultante de la prueba de compresión triaxial para la muestra G1 fue $\Phi = 28.4^\circ$ y para G2: $\Phi = 25.8^\circ$. El valor mayor obtenido para G1 es concordante con los mayores tamaños de grano que aparecen en esta unidad en dirección

al borde caldérico y los valores de ángulo de rozamiento o de fricción interna son moderados de bajos respectivamente.

7.2.1.5 Cohesión (c)

La cohesión obtenida a partir del ensayo triaxial ASTM D 2850, indicó para G1: $c= 0.032 \text{ kg/cm}^2$, y para G2: $c= 0.12 \text{ kg/cm}^2$, siendo baja a moderada respectivamente. Estos resultados están de acuerdo con las variaciones granulométricas de los depósitos transportados por flujos piroclásticos, que se tornan más finos a medida que se alejan de la fuente de emisión. Los valores de las cohesiones en suelos no cohesivos y parcialmente saturados como en la zona intermedia y proximal de la caldera de Ilopango, están relacionados con la presencia de finos; G2 (68.3 %) tiene mayor porcentaje de finos que G1 (45.6 %) y mayor cohesión (G2 es 3.7 veces mayor que G1). En ambos casos, la cohesión está relacionada en gran parte, al fenómeno de la succión que surge por la presencia de agua entre los intersticios de los granos, que genera una presión de poros negativa, la cual mantiene unidas las partículas debido a las tensiones capilares.

En el proceso de formación de las ignimbritas ocurre cierta cementación natural, que aunque no parece ser alta, es suficiente para mantener ligadas sus partículas en los taludes verticales, que posiblemente están secos (sin succión) en el mes de abril, que es el mes más caliente de la estación seca. La clasificación del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), para G1 es arena limosa (SM) y para G2, limo arenoso (ML), ambos con arcillas no plásticas (sin carga eléctrica), partículas coloidales y geles de sílice. Estos materiales en la microfábrica tienen cierta influencia en la cohesión. La microfábrica se refiere al arreglo de las partículas que constituyen el suelo y es función de la distribución (tamaños), la orientación y formas de los granos, si hay cementante o no. El conjunto de factores como la microfábrica, la succión y la cementación (capítulo 8) en la Unidad G, favorece que los taludes se mantengan verticales. La inestabilidad de los taludes surge cuando las capas de cenizas muy finas de las coignimbritas, deleznable e intercaladas entre las ignimbritas, se saturan con las precipitaciones perdiendo la succión. Ante un sismo fuerte esas cenizas se comportan como capas incompetentes y ante una sacudida o vibración fuerte se desprenden y caen una sobre la otra como naipes. El

desprendimiento es facilitado cuando esta secuencia piroclástica está inclinada y proclive al talud.

7.2.1.6 Gravedad Específica (Gs)

Los resultados obtenidos para la gravedad específica en las muestras de la Unidad G son para G1, $G_s = 2.375$ y en el punto G2, $G_s = 2.346$. La diferencia de gravedad es mínima (0.029) y esa pequeña diferencia puede explicarse cuando se trata de depósitos de flujos piroclásticos donde los fluidos (vapor de agua y gases) juegan un papel importante en el transporte y selección del tamaño de las partículas. Los más pesados quedan atrás y los menos pesados y finos avanzan hacia mayores distancias. Esta podría ser la razón por la cual se obtiene una gravedad específica mayor cerca del centro eruptivo y la menor en las partes intermedias del mismo.

7.2.1.7 Peso volumétrico húmedo (γ)

El peso volumétrico húmedo llamado también peso unitario o densidad del suelo, es una medida básica obtenida de la relación del volumen total y del peso total de la muestra. El valor del peso unitario que se reporta para cada muestra corresponde, en la mayor parte de los casos, al promedio de cuatro mediciones.

Los resultados de laboratorio reportan para la muestra G1: $\gamma = 1.442 \text{ t/m}^3$ y para G2: $\gamma = 1.575 \text{ t/m}^3$. El peso volumétrico húmedo de G2 es mayor que en G1 principalmente a causa del mayor contenido de humedad (27 % en G2 casi el doble que el 14 % en G1). Un segundo factor se debe al tamaño de los fragmentos de pómez, que son mayores en G1 y el porcentaje de grava es ligeramente mayor. El peso específico del pómez blanco es < 1 , lo cual influye parcialmente en que G1 presente menor peso unitario, mientras que la muestra G2 tomada a 11 km del borde caldérico, presenta tamaños granulométricos ligeramente menores.

7.2.1.8 Otros parámetros

Peso volumétrico seco o peso unitario seco (γ_s): el peso volumétrico seco es obtenido a partir de la relación de peso total y la humedad de la muestra, y se define según la ecuación: $\gamma_s = \gamma / (1 + \omega)$.

Aplicando la fórmula se obtiene:

El peso unitario seco en G1, $\gamma_s = 1.442 \text{ t/m}^3 / (1 + 0.14) \Rightarrow \gamma_s = 1.265 \text{ t/m}^3$.

El peso unitario seco en G2, $\gamma_s = 1.575 \text{ t/m}^3 / (1 + 0.27) \Rightarrow \gamma_s = 1.240 \text{ t/m}^3$.

La similitud de ambos valores es correlacionado con las gravedades específicas de estas muestras, en donde G1 es ligeramente superior a G2.

Porosidad (η) y relación de vacíos (e)

Tanto el aire y el agua dentro del suelo ocupan espacios entre las partículas sólidas. Existen dos medidas para representar este espacio, la porosidad y la relación de vacíos. La porosidad (η) representa la proporción del volumen total de la masa ocupada por el espacio; puede variar desde $0 \% \leq \eta \leq 100 \%$. La relación de vacíos (e) expresa la relación entre el volumen del espacio y el volumen de sólidos dentro del volumen de la masa total; puede variar $0 < e < \infty$. Conociendo los valores de la gravedad específica (G_s) y del peso unitario seco (γ_s), se puede determinar la porosidad usando la fórmula $\eta = 1 - (\gamma_s / G_s)$, entonces:

La porosidad en G1, $\eta = 1 - (1.265 / 2.375) \Rightarrow \eta = 46.7 \%$.

La porosidad en G2, $\eta = 1 - (1.240 / 2.346) \Rightarrow \eta = 47.1\%$.

Para conocer la relación de vacíos (e) en la muestra G1, se determina por medio de la fórmula $e = \eta / (1 - \eta)$, entonces:

La relación de vacíos en G1, $e = 0.467 / (1 - 0.467) = 0.876$.

La relación de vacíos en G2, $e = 0.471 / (1 - 0.471) = 0.890$.

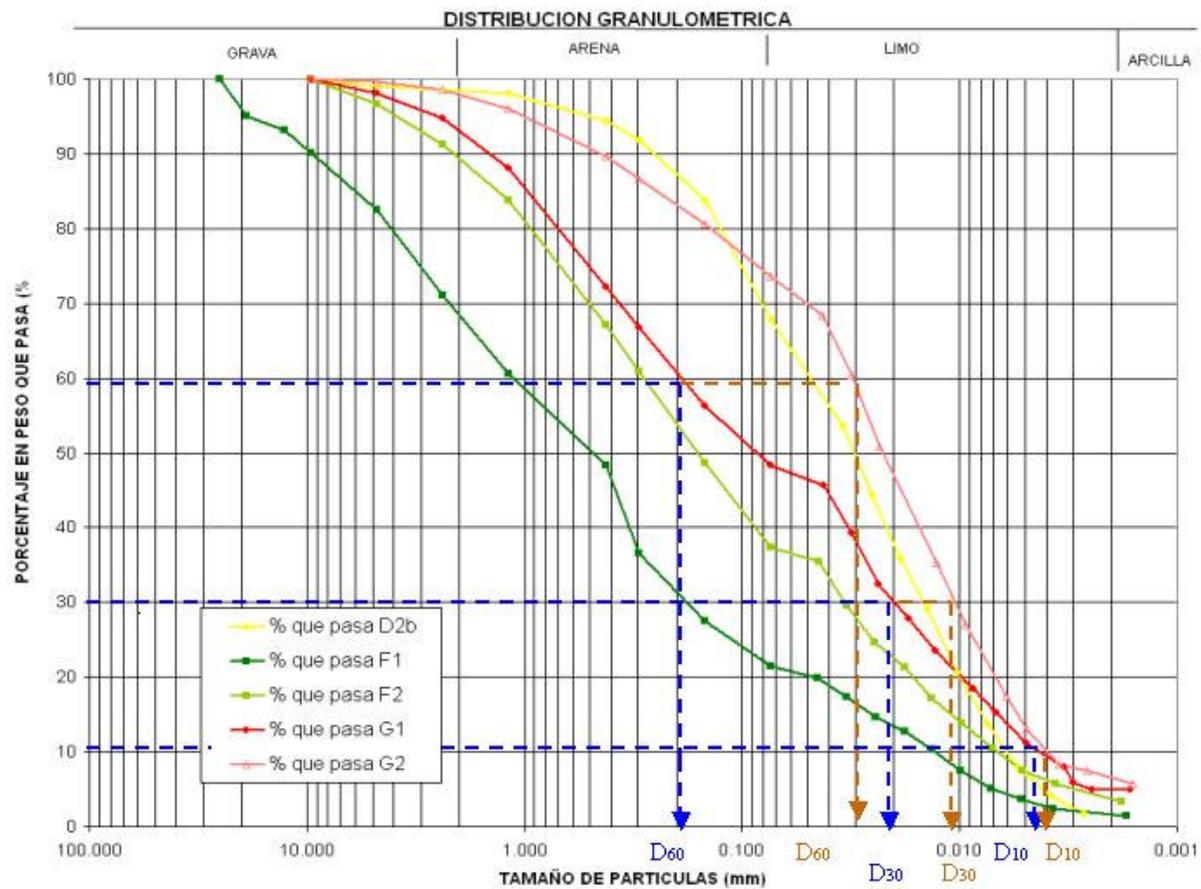
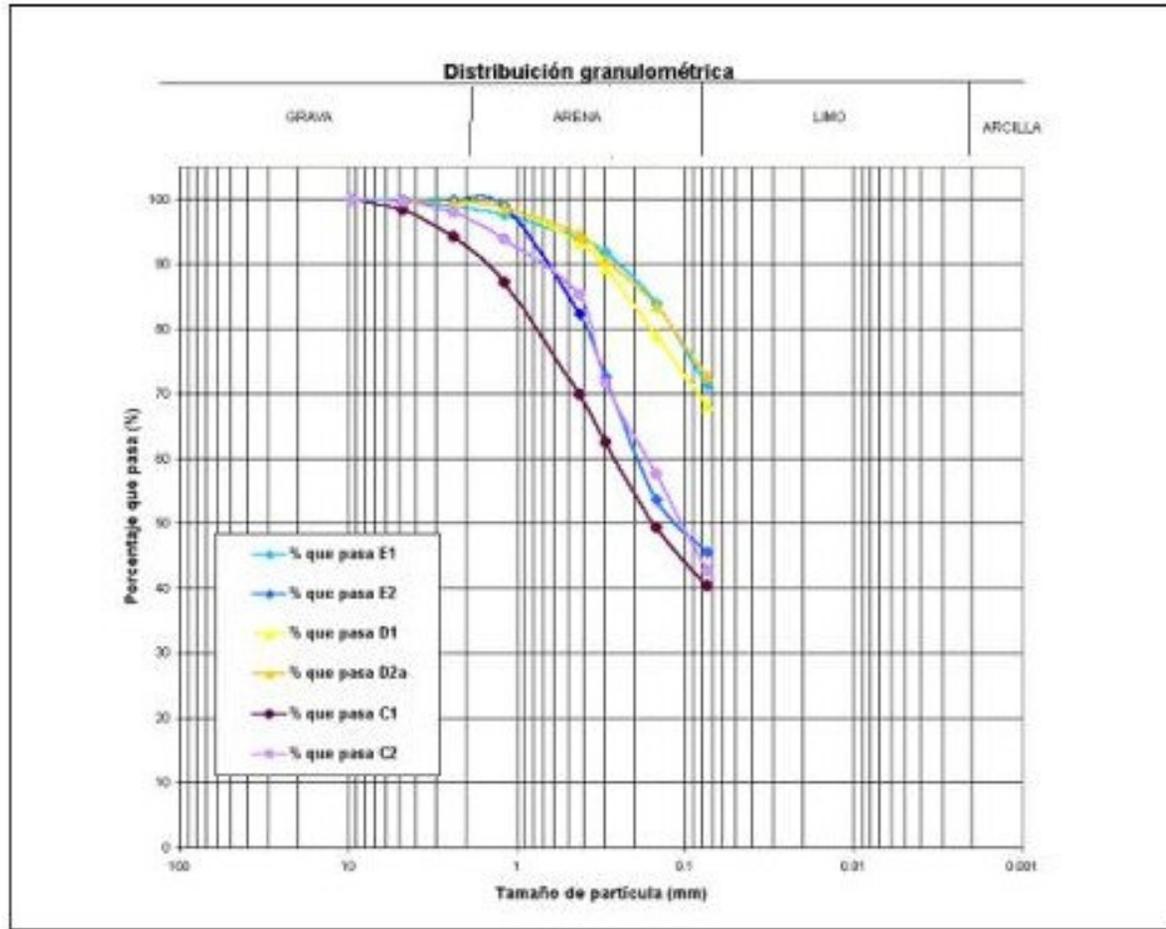


Figura 21. Curvas de distribución granulométricas de las unidades D, F y G.



Walter Hernández (2004).

Figura 22. Curvas de distribución granulométricas de las unidades C, D, y E.

Tabla 3. Parámetros físicos y mecánicos de TBJ.

PARAMETROS FISICOS Y MECANICOS DE TBJ																
Pto. Aflor.	Fecha	Muestra	Prof. (m)	Coordenadas		S.S	w	LL	LP	c	AFI	Gs	Pvh	Pvs	n	e
				Lat. N	Long. W	SUCS (%)				Kg/cm2	(°)		Ton/m3	Ton/m3	(%)	
1	06-Jul-03	*G1	1.80	13° 42 52.9"	89° 07 43.7"	SM	14	24	NP	0.032	28.43	2.375	1.442	1.265	46.7	0.876
2	30-Jul	*G2	0.60	13° 46 09.8"	89° 09 35.3"	ML	27	31	NP	0.122	25.57	2.346	1.575	1.240	47.1	0.890
53	04-Sep	** F1	10.50	13° 42 24.5"	89° 07 20.2"	SM	19	20	NP	0.025	26.62	2.416				
2	11-Jul	*F2	2.65	13° 46 9.8"	89° 09 35.3"	SM	12	27	NP	0.105	35.92	2.306	1.391	1.242	46.1	0.885
12	16-Jul	*E1	28.6	13° 42 25"	89° 07 07.5"	ML	24	21	NP	1.615	25.77	2.432	1.752	1.413	41.9	0.721
2	10-Jul	*E2	2.8	13° 46 9.8"	89° 09 35.3"	SM	11	22	NP	0.688	29.84	2.597	1.640	1.477	43.1	0.757
18	06-Ago	*D1	6.34	13° 42 27.4"	89° 07 17.6"	ML	20	25	NP	0.778	38.15	2.400	1.789	1.491	37.8	0.608
2	10-Jul	*D2a	3.58	13° 46 9.8"	89° 09 35.3"	ML	16	24	NP	0.062	31.46	2.484	1.453	1.252	49.6	0.984
2	11-Jul	*D2b	4.66	13° 46 9.8"	89° 09 35.3"	ML	18	28	NP	0.081	31.37	2.388	1.365	1.156	51.6	1.066
18	07-Ago	*C1	7.47	13° 42 27.4"	89° 07 17.6"	SM	20	23	NP	1.001	28.25	2.407	1.531	1.275	47.0	0.886
52	05-Sep	*C2	9.92	13° 44 59.4"	89° 08 51.1"	ML	13	25	NP	0.290	34.46	2.424	1.479	1.308	46.0	0.852
Toma de muestras: julio a septiembre de 2003																
Pruebas realizadas en el Laboratorio del Instituto Tecnológico Centroamericano (ITCA-FEPADE)																
NP=No plástico			LL: límite líquido			Pvh: peso volumétrico húmedo			Gs: gravedad específica			e: relación de vacíos				
* Triaxial (U,U)			LP: límite Plástico			Pvs: peso volumétrico seco			w: humedad natural			S.S: símbolo del suelo				
** Triaxial Corte Directo			c: cohesion			AFI: angulo de friccion interna			n: porosidad							

Tabla 4. Parámetros físicos y mecánicos de TBJ de la AMSS

Parámetros físicos y mecánicos de TBJ del AMSS								
Número	Símbolo SUCS	w (%)	c Kg/cm2	AFI (°)	Gs	Pvs Ton/m3	n (%)	e
1	SM-ML	16.70	0.49	40.0	2.46	1.290	47.5	0.906
2	ML	25.00	0.59	27.0	2.46	1.220	50.2	1.010
3	SM-ML	17.20	0.60	40.0	2.50	1.280	50.7	1.030
4	SM-ML	17.00	0.40	35.0	2.47	1.230	49.6	0.986
5	ML	28.10	0.40	33.0	2.43	1.180	51.4	1.063
6	SM-ML	17.10	0.50	37.0	2.47	1.250	49.5	0.980
7	SM	16.00	0.40	34.5	2.49	1.290	47.9	0.920
8	SM	25.00	0.15	28.5	2.47	1.210	62.3	1.050
9	SM	15.90	0.40	32.7	2.48	1.250	49.7	0.987
10	SM	23.40	0.20	35.2	2.50	1.240	50.2	1.010
11	ML	26.00	0.30	42.3	2.49	1.390	43.8	0.780
12	ML	26.60	0.10	30.0	2.44	1.080	55.3	1.240
13	ML	27.90	0.50	25.5	2.44	1.180	52.1	1.090
14	ML	24.80	0.00	35.1	2.47	1.220	50.2	1.010
15	ML	27.00	0.45	26.3	2.48	1.170	51.9	1.080
Fuente: Guzmán, M. y Melara, E. (1996)								

7.2.2 Unidad F

Esta unidad está constituida por múltiples depósitos de flujos piroclásticos, masivos, isótropos, de coloración blanca, observándose de cuatro a cinco depósitos en el área, sin que se observen coignimbritas entre estos. Estos depósitos están constituidos por una matriz de arena limosa y grava, que engloba grandes fragmentos de pómez y líticos dispersos en la matriz. En la base de estos flujos se acumulan líticos gruesos de hasta 15 cm de diámetro. En el techo de estos depósitos, cuando se han desplazado distancias de 10 a 15 km, suele formarse un horizonte de pómez de tamaños de 20 a 50 cm, con espesor superior de hasta 2m (ver figura 23).

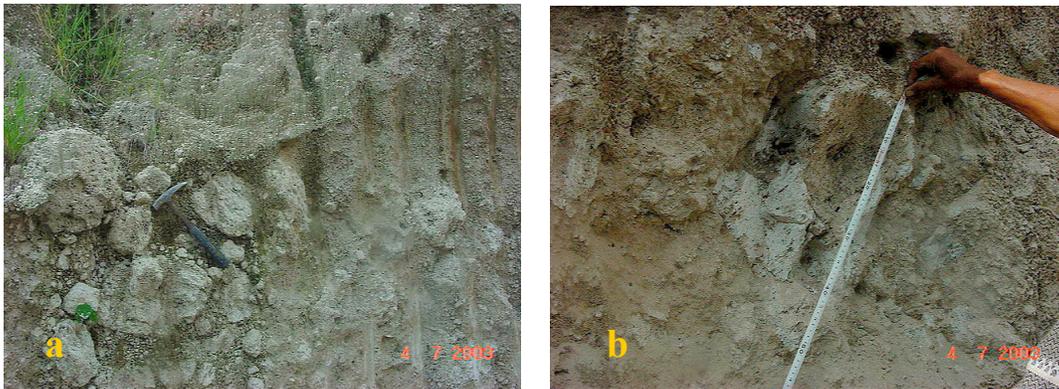


Figura 23. a) Afloramiento de horizonte de bloques de pómez en el techo de un flujo piroclástico, sobre la carretera antigua a Tonacatepeque. b) bloque de pómez de 52 cm de largo en el mismo horizonte.

7.2.2.1 Contenido de Humedad (ω)

El contenido de humedad obtenido para la muestra F1 es de: $\omega = 19\%$ y para F2: $\omega = 12\%$. El contenido de humedad está relacionado con la cantidad de lluvia que cae, con la exposición del depósito a las mismas, así como con la cantidad de finos en la muestra. Ambos valores de humedad reportados son característicos de este tipo de materiales para la estación lluviosa. El contenido de agua o humedad es una expresión que permite estimar las respuestas de una masa de suelo ante una posible saturación.

7.2.2.2 Límites de consistencia

Los resultados de límite líquido son LL= 20 para F1 y LL= 27 para F2. El límite plástico (LP) no fue medido ya que ambas muestras carecen de finos plásticos (NP). Por tanto, el índice plástico (IP) que se obtiene de la diferencia del LL-LP es nulo. Los resultados de LL en ambas muestras, indican que la Unidad F está constituida por un suelo que carece de plasticidad y que admite poca agua.

7.2.2.3 Análisis Granulométrico

En la muestra F1 el porcentaje en peso que pasa el tamiz No. ¾" (19.10 mm) es 95 %, en la malla No. 4 (4.760 mm) es 82 %, y en la malla No. 200 (0.74 mm) es 19.80 %, del cual 1.4 % son fragmentos muy finos de vidrio volcánico de tamaño de arcilla no plástica de 1.7 μ de diámetro. En la muestra F2 los materiales comienzan a ser retenidos en la malla No. 4 donde pasan 96.65 % y en la malla No. 200 pasan 35.40 %, de los cuales 3.3 % es arcilla no plástica (1.8 μ). Las diferencias en tamaños en la fracción más fina de la matriz (limo + arcilla + coloides), tienden a ser más estrechas. Por tanto, los depósitos en la zona proximal (F1) tienen una curva más tendida y abarcan una gran variedad de tamaños y por eso son bien graduados, en cambio los depósitos que están más lejos (F2), son mal graduados. El hecho que la Ignimbrita F se enriquezca en finos con la distancia, puede deberse a dicha selección, a la incorporación del material fino erosionado de la Unidad E subyacente (Figura 24) y al rompimiento de algunos granos.

La distribución granulométrica para F1 y F2 según la figura 21, evidencian cierto paralelismo entre ambas curvas con F2 a la derecha de F1. La muestra más distante (F2) del centro de emisión posee una granulometría con tamaños y porcentajes menores que la muestra más cercana. Esto se puede explicar ya que durante el transporte de los flujos piroclásticos ocurren los siguientes procesos:

- **Segregación.** En un flujo piroclástico los distintos componentes se mueven a distintas velocidades, en los cuales, los fragmentos más pesados van quedando atrás y los menos pesados y ligeros viajan mayores distancias, es decir, hay una disminución del tamaño de los granos con la distancia. Constituyen la masa principal del depósito.

• **Concentración de gruesos de pómez.** Dentro de la masa piroclástica en movimiento ocurre la segregación de los bloques más grandes de pómez (≈ 10 a 50 cm de largo), que tienden a flotar en la masa del flujo piroclástico y se concentran en la superficie de los mismos cuando se han transportado por distancias suficientes (≈ 10 a 15 km), tal como se observa en el afloramiento en la carretera vieja a Tonacatepeque (Figura 23).

• **Concentración de líticos.** Los líticos más grandes que se mueven inmersos en el flujo piroclástico (≈ 10 a 20 cm de largo), tienden por su mismo peso a segregarse y buscar la base del flujo, donde se concentran formando un horizonte de concentrados líticos y quedan relegados en las partes traseras del depósito piroclástico.

Coefficientes de uniformidad y curvatura. Para definir la granulometría de un suelo grueso como el de la Unidad F, se utilizan los *coeficientes de uniformidad* (C_u) y *curvatura* (C_c), que sirven para definir la graduación. Estos coeficientes se aplican únicamente en suelos gruesos, que poseen más del 50 % de material que no pasa la malla No. 200. El coeficiente de uniformidad (C_u), es dado por la relación $C_u = D_{60} / D_{10}$, y su valor decrece cuando la uniformidad del suelo aumenta. Una distribución granulométrica uniforme tiene generalmente valores menores que 3.

El coeficiente de curvatura $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$, permite establecer si un suelo es bien graduado. Un suelo es bien graduado cuando C_c está comprendido entre 1 y 3 y $C_u \geq 6$ (ASTM D2487-98). De la curva del gráfico de la figura 21 (Sólo está graficada para G1 y G2), se obtienen los diámetros para sus correspondientes porcentajes,

para F1: coeficiente de uniformidad, $C_u = 1.2 / 0.0128 = 93.7$
 coeficiente de curvatura, $C_c = (0.17)^2 / (1.2 \times 0.0128) = 1.85$

Para F2: coeficiente de uniformidad, $C_u = 0.28 / 0.007 = 40$
 coeficiente de curvatura, $C_c = (0.034)^2 / (0.28 \times 0.007) = 0.59$

Del resultado anterior, se tiene que la muestra F1 posee valores de $C_u \geq 6$ y C_c está comprendido entre 1 y 3, cumpliendo con ambos coeficientes, por tanto, el suelo F1 tiene granulometría bien graduada.

F2 con $C_u \geq 6$, pero con $C_c = 0.59$, que es inferior a la unidad, no llega a cumplir con ambos requerimientos, por lo que F2 está compuesto por un suelo mal graduado (SP). De los resultados de estos coeficientes se puede concluir que en los flujos piroclásticos de la Unidad F, la granulometría es bien graduada cerca de la fuente de emisión y cuando está a la distancia de 11 km, se enriquece en granos de menor tamaño y tiende a ser mal graduada, por tanto, es más uniforme.

La clasificación de suelos según el SUCS, para ambas muestras es arena limosa (SM) con 20 % de grava pumítica y finos no plásticos del 20 % para F1, mientras que del 2 % a 5 % de grava pumítica para F2 con 35 % de finos no plásticos (Anexo B).

7.2.2.4 Angulo de fricción Interna (Φ)

La realización de la prueba de compresión triaxial (U,U) ASTM D 2850, se desarrolló con dificultades debido a la presencia frecuente de pómez con tamaño (lado mayor) superior a 3 cm, lo que dificultó la elaboración del espécimen. Se intentó en dos ocasiones con la muestra F1, tomada en los puntos 12 y 53, sin ser posible completarla con éxito. Por esta razón, se cambió el ensayo triaxial (U,U), por la prueba Corte Directo ASTM D-3080, en una muestra inalterada extraída en el punto 53. Las cargas normales empleadas en este ensayo fueron: 10, 20, 30, y 40 libras. Pero la muestra F2 extraída del punto 2, para este mismo propósito, ya había sido analizada por el ensayo compresión triaxial (U,U).

Ambos ensayos, tanto el de compresión triaxial como el de corte directo, sirven para la obtención del ángulo de fricción interna y el grado de cohesión de sus partículas, dos valores importantes en la determinación del factor de seguridad para la estabilidad de taludes. Es importante señalar que el ensayo de corte directo tiende a dar valores más bajos comparados con los resultados que se obtienen de la compresión triaxial (U,U). En la muestra F1 (punto 53) el resultado obtenido a partir del ensayo corte directo fue $\Phi = 26.6^\circ$, mientras que en F2 con la prueba triaxial para F2 fue: $\Phi = 35.9^\circ$.

Sabiendo de antemano que la granulometría más gruesa que contiene la muestra F1, es de esperar valores más altos de rozamiento y que las dificultades encontradas en la elaboración de los especímenes para realizar la prueba de compresión triaxial, es un indicador que esta

prueba es más conveniente hacerla in situ para poder definir el ángulo de fricción interna y la cohesión de esta unidad. Los resultados así obtenidos de las pruebas de compresión triaxial, no definen aún los ángulos de la fricción interna para estos flujos piroclásticos de la Unidad F.

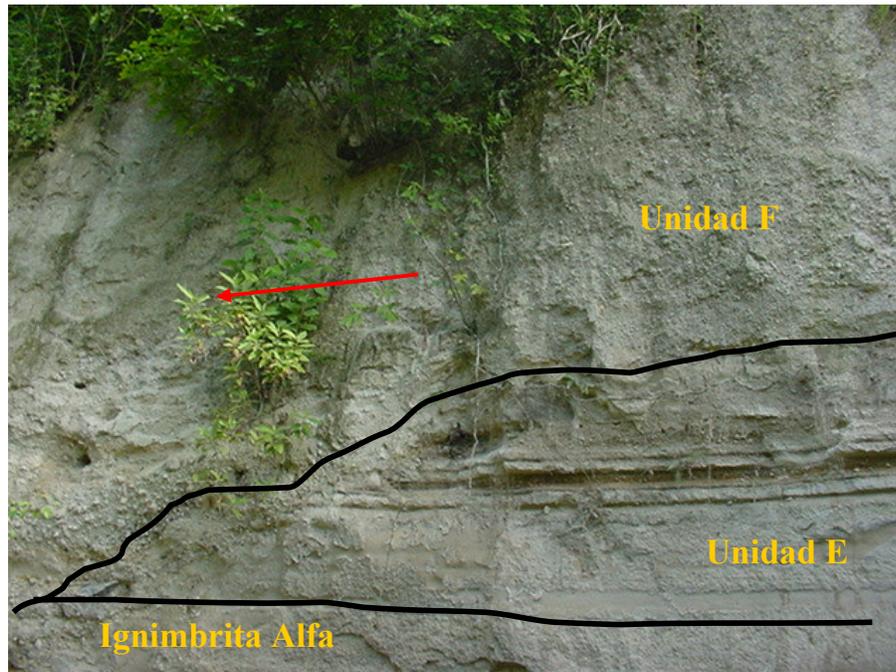


Figura 24. Superficie de erosión y de deformación producida por el desplazamiento del flujo piroclástico (Unidad F) sobre la unidad E en la quebrada contigua a la Urbanización La Campanera, Soyapango. La flecha indica la dirección del flujo piroclástico.

7.2.2.5 Cohesión (c)

La cohesión de las partículas finas en la Unidad F es el otro parámetro obtenido a partir de los ensayos de compresión triaxial no consolidado-no drenado (U,U) y de Corte Directo, en las muestras F2 y F1 respectivamente. La cohesión es una propiedad que depende principalmente de la presencia de finos plásticos y estos están ausentes en ambos especímenes. Los valores de cohesión bajo a moderado obtenidos en la muestra F1: $c = 0.025 \text{ Kg/cm}^2$ y en F2: $c = 0.105 \text{ kg/cm}^2$ (Tabla 3), resultan coherentes con el tamaño de grano de las muestras. El hecho esperado por la granulometría más gruesa con una cohesión baja para F1, aún cuando está en la zona sur, puede indicar además que la succión, ejerce muy poca influencia en suelos gruesos y que posiblemente no posea cementación la

ignimbrita inferior. Sin embargo, los afloramientos de taludes verticales de ignimbritas en la Carretera de Oro corresponden a las ignimbritas superiores de la Unidad F, y posiblemente estén débilmente cementadas por sílice en forma de coloides y geles.

7.2.2.6 Gravedad específica (Gs)

Los valores de gravedad específica obtenidos para los depósitos de flujos piroclásticos de la Unidad F, son para F1: $G_s = 2.416$ y para F2: $G_s = 2.306$. El valor ligeramente más alto en F1 posiblemente se deba a la presencia de líticos más grandes y/o que el porcentaje de estos es mayor en F1.

7.2.2.7 Peso volumétrico húmedo o peso unitario (γ)

El peso volumétrico húmedo para F2 es de $\gamma = 1.391 \text{ t/m}^3$, pero no se cuenta con el valor para F1 para poder compararlos.

7.2.2.8 Otros parámetros

Peso volumétrico seco o peso unitario seco (γ_s). Es obtenido por medio de la ecuación:

$$\gamma_s = \gamma / (1 + \omega) \Rightarrow 1.391 / 1.12 \Rightarrow \text{El peso unitario seco para F2, } \gamma_s = 1.242 \text{ t/m}^3.$$

Porosidad (η) y relación de vacíos (e). Los valores de porosidad obtenidos para F2, $\eta = 1 -$

$$(\gamma_s / G_s) \Rightarrow \eta = 46.1 \%, \text{ y su correspondiente } e = \eta / (1 - \eta) \Rightarrow e = 0.885.$$

Para F1 no se determinaron estos parámetros por carecer del resultado del peso volumétrico, por lo que no se puede hacer la comparación.

7.2.3 Unidad E

La Unidad E juega un papel muy importante como capa guía en la identificación del resto de unidades de la Tierra Blanca Joven. Su coloración es café claro cuando está seca y café oscuro cuando está húmeda. Se caracteriza por la alternancia de niveles delgados de

depósitos de caída secos, de granulometría gruesa (grava y arena gruesa hasta fina), sueltos y depósitos de caída húmedos, de granulometría muy fina y compactos, que en total suman 11 subunidades de las cuales, solamente se ha muestreado la subunidad superior húmeda, por lo que los resultados de los análisis son válidos sólo para esa subunidad. La Unidad E en pocos afloramientos se encuentra completa, en ocasiones aparece como lentes, ya que comúnmente ha sido erosionada parcialmente por el desplazamiento de la Unidad F sobreyacente y en situaciones extremas desaparece por erosión; también suele mostrar deformaciones por el arrastre de la Unidad F lo que indica que esa subunidad estaba muy húmeda en el momento del desplazamiento de la ignimbrita superior (figura 24). Por tanto, los bajos espesores o la ausencia de esta unidad están relacionados a la erosión por parte de la ignimbrita (F) y no a su adelgazamiento natural por la distancia al centro de emisión.

Sobre la Unidad E yace en pocos afloramientos una subunidad constituida por una ignimbrita denominada en este trabajo como Beta. En los terrenos de la fábrica Sherwin Williams (punto 40), se observó el máximo espesor de 3.46 m en la Ignimbrita Beta. La “Ignimbrita β ” representa ser el pulso final de la serie de pulsos que dieron origen a la Unidad E y el final de la primera etapa eruptiva del Ilopango, que se refirió Hart y McIntire (1983).

7.2.3.1 Contenido de Humedad (ω)

Independientemente del sitio muestreado, las humedades determinadas guardan relación con las distribuciones granulométricas de cada una de las muestras. El mayor contenido de agua se encuentra en los suelos con mayor cantidad de finos, así, en E1: $\omega = 24\%$ y en E2: $\omega = 11\%$. El porcentaje de humedad más alto del suelo E1 es mucho mayor que E2, lo cual está conforme a su mayor contenido de finos (71.26 %), mientras que en E2 el contenido de finos es el menor (45.50 %).

7.2.3.2 Límites de consistencia

Los límites de consistencia encontrados E1 es $LL = 21$ y para E2, $LL = 22$. El límite plástico (LP) no fue determinado en dichas muestras ya que carecen de finos plásticos (NP). Por tanto, el índice plástico (IP) que se obtiene de la diferencia del $LL - LP$, es nulo.

7.2.3.3 Análisis Granulométrico

En el análisis granulométrico de E1 el 99.91 % de granos pasaron el tamiz No. 4, mientras que el porcentaje que pasa por el tamiz No. 200 es de 71.26 % de finos no plásticos. El tamaño del material que predomina es limo, constituyendo según el SUCS, un limo arenoso (ML) de color café, con 25 a 30 % de arena. Para la muestra E2, los resultados de la fracción que pasa el tamiz No. 4 es el 100 % y la fracción que pasa el tamiz No. 200 es 45.5 %, lo cual, de acuerdo con el SUCS, indica que está constituida por arena limosa, café (SM), en la que el 45 % son finos no plásticos. En esta subunidad no se hizo el análisis de los finos por el método del hidrómetro.

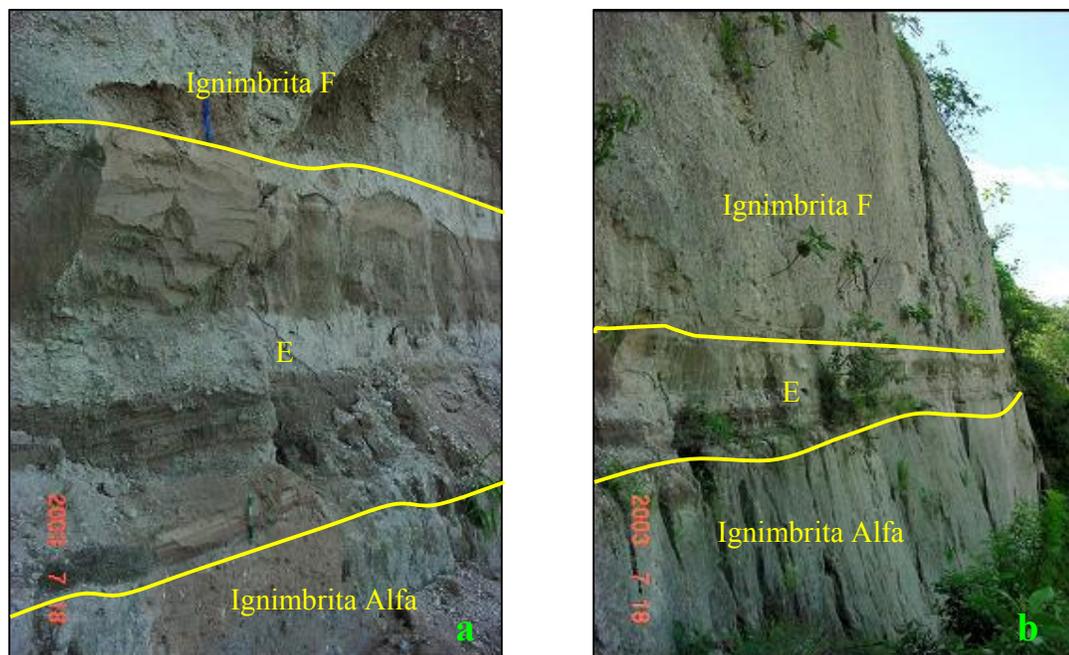


Figura 25. a) Detalle del afloramiento de la Unidad E compuesta por alternancia de depósitos finos de caída y secos gruesos y en su techo está la subunidad húmeda muestreada. b) El talud izquierdo verticalizado del Río Las Cañas muestra la Unidad E y su relación estratigráfica con las Ignimbritas Alfa y F.

Ambas muestras revelan que se trata de material granular que varía de arena a limo. En el caso de la muestra (E2) más alejada del borde caldérico, la subunidad superior húmeda E tenía un espesor máximo en el afloramiento de 0.21 m, por lo que se ocupó toda la sección para el muestreo, mientras que el espesor de esa subunidad en E1 era de 0.78 m, de donde se extrajo un cubo aproximado de 25 cm por lado. Es probable que en E1 se obtuviera la muestra de la parte de la capa con granulometría más fina, lo que puede explicar los

resultados que se han obtenido y tal situación dificulta la correlación granulométrica y la cohesión.

7.2.3.4 Angulo de fricción Interna (Φ)

El valor del ángulo de fricción interna obtenido en el ensayo de compresión triaxial es para la muestra E1: $\Phi=25.77^\circ$, que tiene mayor porcentaje de finos (71.26 %) constituyendo un limo arenoso (ML). El valor del ángulo de fricción interna para la muestra E2: $\Phi=29.84^\circ$, con porcentaje de finos bastante menor (45.50 %) que en E1, está formada por una arena limosa, por tanto, se torna más friccionante aumentando así el ángulo de rozamiento en E2, en comparación a E1 que es menor.

7.2.3.5 Cohesión (c)

Los valores de cohesión de las muestras indican valores para E1: $c= 1.61 \text{ kg/cm}^2$, mientras que para E2: $c= 0.69 \text{ kg/cm}^2$. El valor de cohesión está relacionado con la presencia de finos. En E1, $c = 2.3$ veces mayor que E2, lo que era de esperar considerando que en el primero el contenido en finos es mayor, y ese valor de cohesión representa ser el más alto de todas las muestras analizadas de la Tabla 3 y Tabla 4; por su ubicación cerca del borde caldérico, hace pensar que ese valor alto está más asociado a una cementación de los granos, tal como ocurre con las unidades C, D y la base de la ignimbrita Alfa.

7.2.3.6 Gravedad Específica (Gs)

La gravedad específica para la subunidad superior en la cercanía del borde caldérico, es para E1, $G_s= 2.432$ y para la muestra E2 tomada a 11 km de dicho borde, $G_s= 2.597$. Estos resultados están relacionados con la menor presencia en peso de finos en E2 (45.5%) y a la posible presencia de cemento en E1 que tiene menor porosidad que E2.

7.2.3.7 Peso Volumétrico Húmedo (γ)

Los valores reportados de la prueba del peso volumétrico húmedo realizado en la Unidad E, son para E1: $\gamma = 1.752 \text{ t/m}^3$ y para E2: $\gamma = 1.640 \text{ t/m}^3$. La diferencia entre esos valores se

debe principalmente a la mayor presencia del contenido de humedad en la primera (24 %) que en la segunda (11 %).

7.2.3.8 Otros parámetros

Peso Volumétrico Seco. Los valores obtenidos de peso volumétrico seco fueron para E1: $\gamma_s = 1.413 \text{ Ton/m}^3$ y para E2: $\gamma_s = 1.477 \text{ Ton/m}^3$. Estos resultados corroboran que el mayor peso volumétrico húmedo de E1 se debe al mayor contenido de humedad de la muestra, se comprueba además, que E2 tiene mayor peso volumétrico seco, lo cual congruente con las gravedades específicas de ambas muestras, donde $G_s (E2) > G_s (E1)$.

Porosidad (η) y relación de vacíos (e). La porosidad y la relación de vacíos en E1:

$\eta = 41.9 \%$ y $e = 0.721$. En E2: $\eta = 43.1 \%$ y $e = 0.757$. E1 y E2 tienen porosidad y relación de vacíos similares, indicando que esas propiedades hidráulicas no presentan variación y que podrían estar parcialmente cementadas ya que son inferiores a la mayor parte de los valores reportados por otras muestras de las tablas 3 y 4.

7.2.4 Unidad D

La Unidad D está constituida por una ignimbrita, la coignimbrita asociada y por coladas piroclásticas (surges). La coignimbrita se forma a partir de las cenizas finas y polvo volcánico, elutriados por el escape de los gases durante el desplazamiento de la ignimbrita, que forman una nube acompañante (gases y finos), que es influenciada por la acción del viento, y la arrastra por largas distancias y poco a poco sus partículas caen por la acción de la gravedad. A este material se suma la lluvia de cenizas procedentes de la zona de difusión horizontal. Los depósitos de oleadas piroclásticas (“surges”) yacen en la base del depósito.

Esta unidad se identifica por su granulometría muy fina con presencia de arenas y gravas de pómez de forma dispersa. Esta unidad está estratificada y se caracteriza por la presencia abundante de lapilli acrecional, que son esferas con bandeados concéntricos y localmente son conocidos como “grumos” (Figura 26). El color de esta unidad cuando se presenta algo

húmeda tiende a ser beige a grisáceo. La unidad D es muy deleznable, de todas las unidades es la que presenta el mayor porcentaje en peso que pasa la malla No. 200 ($\approx 70\%$) y está ampliamente dispersa en la zona distal.



Figura 26. Lapilli acrecional en depósito de caída de la Unidad D.

7.2.4.1 Contenido de humedad (ω)

Los contenidos de humedad medidos en las diferentes muestras de la Unidad D son en D1: $\omega=20\%$, en D2a: $\omega=16\%$ y en D2b: $\omega=18\%$. Las variaciones en la cantidad de agua presentes en las muestras dependen de la exposición del sitio de muestreo a las lluvias y de la profundidad horizontal de la extracción de la muestra en el talud. Estos valores son normales en el período de estación lluviosa.

7.2.4.2 Límites de consistencia

Los límites de consistencia encontrados en la muestra D1 es $LL=25$ y para D2a, $LL=24$ y D2b, $LL=28$. El límite plástico (LP) no fue determinado en dichas muestras ya que carecen de finos plásticos (NP), por lo que el índice plástico (IP) es nulo.

7.2.4.3 Análisis Granulométrico

El porcentaje que pasa la malla No. 4 en D1 y D2b es el 100 % mientras que en D2a es del 99 %, valores que se consideran similares. Este comportamiento se mantiene para las tres muestras analizadas en la malla No. 200, donde el porcentaje que pasa en D1 es 68.24 %, en D2a es 72.68 % y para D2b es 67.82 % (53.6 % muestra total). En general se tienen altos porcentajes de finos para toda la unidad, razón por que no se presentan los coeficientes de uniformidad y de curvatura. Estas cenizas son bien seleccionadas, desde el punto de vista vulcanológico, ya que el viento como agente de transporte es un excelente seleccionador de los granos. Esta misma característica desde el punto de vista geotécnico se considera como una mala gradación de las partículas, por tener un tamaño dominante.

En las tres muestras, la fracción arenosa está compuesta predominantemente por pómez con diámetro promedio de 3 mm (zona norte) y con 2.4 mm en la Carretera de Oro (punto 18). Las partículas de arena disminuyen en porcentaje hacia el norte, lo cual es coherente con el viento como agente de transporte, que pierde capacidad de acarreo de partículas más gruesas a medida que se aleja del centro de emisión. La clasificación de este suelo para toda la unidad según SUCS, es limo arenoso (ML), beige claro a claro, con 25 % - 30 % de arena.

Solamente en la muestra D2b (zona sur), se llevó a cabo la prueba del hidrómetro, como complemento del análisis mecánico, cuya distribución granulométrica se observa en la figura 21. Este análisis indicó que 53.6 % pasó la malla No. 200 con la dominancia de limos (Anexo C). La muestra tomada a una distancia de 11 km del borde caldérico reveló el tamaño de partícula fino de 2.7 μ . Es de esperar que a mayor distancia del centro de emisión se pueden encontrar partículas todavía más pequeñas como las arcillas. Seguramente en esta prueba con mayor tiempo de control aparecerían tamaños tan pequeños, como los reportados para las unidades F y G, en las que aparecen porcentajes significativos de partículas de tamaño arcillas, coloides y geles de SiO₂.

La Unidad D constituye un suelo bastante uniforme. Los depósitos de cenizas finas de caída de esta unidad, en el campo resultaron ser de los más deleznable y en el laboratorio revelaron valores bajos de cohesión y la más baja densidad del suelo de la TBJ. Desde el punto de vista vulcanológico, la interacción del agua del lago con el magma ocurrió por en

cima del nivel de fragmentación, liberando tanta energía que produjo un evento de muy alta explosividad, donde la fragmentación se desarrolló instantáneamente por el enfriamiento relativamente rápido del magma, cuya transferencia de calor se hace más efectiva a medida que los fragmentos disminuyen su tamaño. En este contexto, la Unidad D representa ser el evento con la más alta explosividad de la TBJ de la caldera de Ilopango. Las cenizas de la Unidad D, según Hart (1981), se extendieron hacia el occidente de El Salvador hasta Guatemala.

7.2.4.4 Angulo de fricción interna (Φ)

Los valores del ángulo de fricción interna obtenidos del ensayo de compresión triaxial (U,U) ASTM D 2850, para las muestras de esta unidad fueron D1: $\Phi = 38.1^\circ$, mientras que para D2a: $\Phi = 31.4^\circ$ y D2b: $\Phi = 31.3^\circ$. Este parámetro mecánico está relacionado con la granulometría, sin embargo, D1 presenta un ángulo de fricción interna bastante superior a los obtenidos para D2. Esta diferencia es debida a que D1 presenta relativamente una granulometría más gruesa que D2 y por el mayor grado de cohesión (11 veces mayor) que reveló la muestra debido a la cementación, tal y como pudo apreciarse en campo, donde la muestra obtenida en el punto 18 presentó mayor dureza.

7.2.4.5 Cohesión (c)

La cohesión es el factor que juega un papel muy importante en esta unidad, ya que es el que produce las diferencias mecánicas de la Unidad D en las cercanías de la fuente de emisión. El valor reportado por la prueba triaxial indica valores de cohesión para D1: $c = 0.78 \text{ kg/cm}^2$, para D2a: $c = 0.06 \text{ kg/cm}^2$ y para D2b: 0.08 kg/cm^2 . El valor de cohesión obtenido en la muestra D1 tomada en la zona sur, es 11 veces mayor que en las muestras tomadas en la parte norte. Aunque los análisis granulométricos presentan resultados similares en finos para las zonas norte y sur, el mayor grado de cohesión en D1 se debe al efecto de la cementación producida por minerales de sulfatos y silicatos (Figura 27).

7.2.4.6 Gravedad Específica (Gs)

Los resultados de laboratorio sobre la gravedad específica de los suelos de la Unidad D indicaron para D1: $G_s = 2.400$, para D2a: $G_s = 2.484$ y para D2b: $G_s = 2.388$. Las ligeras diferencias que muestran esos valores pueden deberse a las pequeñas variaciones de contenido de lógicos entre cada muestra analizada.



Figura 27. La cementación de la Unidad D en la zona sur ha producido costras blanquecinas de minerales secundarios sulfatados y silicatados, en los taludes del Río Las Cañas.

7.2.4.7 Peso Volumétrico Húmedo (γ)

Los datos obtenidos de los análisis del peso volumétrico natural de la muestra, reportan valores para D1: $\gamma = 1.789 \text{ t/m}^3$, para D2a: $\gamma = 1.453 \text{ t/m}^3$ y para D2b: $\gamma = 1.365 \text{ t/m}^3$. El peso volumétrico húmedo en D1 es un 25 % más alto que en D2 (a, b), lo cual se explica por tener mayor humedad y por estar más cementado, posee menor porosidad e menor relación de vacíos, consecuentemente es más cohesivo y tiene mayor peso unitario seco. La gran similitud de los pesos volumétricos húmedos en D2a y D2b, es que el primero fue tomado en el techo y el segundo en la base en la misma unidad.

7.2.4.8 Otros parámetros

Peso volumétrico seco (γ_s). El peso volumétrico seco de las muestras guarda casi la misma relación que guardan los pesos volumétricos húmedos. Los valores calculados de este parámetro son para D1: $\gamma_s = 1.491 \text{ t/m}^3$, para D2a: $\gamma_s = 1.252 \text{ t/m}^3$ y para D2b, $\gamma_s = 1.156$

t/m³. Las muestras D2 (a,b) presentan el peso volumétrico seco más bajo que todas las unidades de TBJ, lo cual es coherente por tratarse de un suelo casi uniforme y tener la más baja cohesión (zona norte), que se refleja en el campo por ser bastante deleznable. Como el porcentaje en peso de finos es del orden del 70 %, esta fracción fina es muy probable que no tenga las formas tan irregulares características de las trizas de vidrio volcánico, por eso, la microfábrica compuesta por partículas muy finas y uniformes, no es favorable para contribuir en la cohesión aparente.

Porosidad y relación de vacíos. La porosidad obtenida en la D1, $\eta = 37.8 \%$, y la relación de vacíos $e = 0.608$, mientras que en D2a, $\eta = 49.6 \%$ y relación de vacíos $e = 0.984$, y D2b con porosidad, $\eta = 51.6 \%$ y la relación de vacíos $e = 1.066$. La granulometría de esta unidad es bastante similar, sin embargo, la porosidad y el índice de vacíos resultan ser significativamente más bajos en D1 que está próxima al centro de emisión, mientras que D2a y D2b, están situados más distantes; esto obedece a que D1 está algo cementada y los intersticios están ocupados por cemento, aire y agua.

7.2.5 Unidad C

La Unidad C corresponde a una de las unidades basales de la secuencia de TBJ y está conformada por dos depósitos de flujos piroclásticos: el inferior está compuesto por un flujo piroclástico de color gris, rico en líticos, cuyo desplazamiento y cobertura espacial son desconocidos. El superior de color amarillento, con granulometría de arena limosa con grava (SM). El contacto entre el techo de la unidad C y la base de la unidad D es gradual y por eso no es muy claro, mientras que el contacto basal de la unidad C es claramente definido por la presencia de pómez en la Unidad B. La Unidad C es la única cuyo muestreo no se realizó en el punto 2 (Cantón La Cabaña), sino que fue necesario extraerla en el punto 52 (Cantón San José Cortéz). La muestra C1 se tomó en el techo de la unidad en el punto 18, a 5.5 km al sur del punto 52. Hacia el sur, la Unidad C se enriquece de partículas de grava y arena.

7.2.5.1 Contenido de Humedad (ω)

Los valores de contenido de humedad obtenidos en los ensayos realizados en las muestras de la Unidad C, según norma ASTM D2216, indican contenidos de agua en el suelo normales para la estación lluviosa, que es cuando se colectaron las muestras. Los resultados que se obtuvieron son para C1: $\omega = 20 \%$ y para C2: $\omega = 13 \%$. Los datos también guardan relación con las respectivas granulometrías.

7.2.5.2 Límites de consistencia

Los límites de consistencia encontrados en la muestra C1 es $LL = 23$ y para C2, $LL = 25$. El límite plástico (LP) no fue determinado en dichas muestras ya que carecen de finos plásticos (NP), por lo que el índice plástico (IP) es nulo.

7.2.5.3 Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico se realizó mecánicamente empleando el juego de tamices, según lo establece la norma ASTM D422. A continuación se presentan los resultados del análisis solamente de la fracción más gruesa que no pasó la malla No. 200. El porcentaje retenido en la malla No. 200 fue de 59.65% y 57.38% para C1 y C2 respectivamente. La distribución granulométrica representada en la figura 22, muestra cierto paralelismo entre las curvas para C1 y C2, bastante similar a la representada para la unidad F. Las curvas granulométricas presentan mucha similitud en cuanto a tamaño para las partes de arena gruesa. Lo mismo ocurre con la fracción de arena más fina, pero el resto de la serie (arena media) tiene una ligera variación con la distancia y la curva de C2 se tiende hacia la derecha, lo cual indica una disminución general de la serie de tamaños de granos. Esto afirma que la granulometría disminuye con la distancia del centro de emisión. El hecho que esta ignimbrita haya producido poca erosión en los materiales subyacentes (unidades A y B), en parte se debe al volumen moderado de este depósito (Ignimbrita Amarilla).

7.2.5.4 Angulo de fricción Interna (Φ)

En suelos muy poco cohesivos como es el de las cenizas de TBJ, el ángulo de rozamiento juega el papel importante en la estabilidad de laderas, y depende principalmente de la textura del suelo (tamaño, fábrica, forma y la distribución de los granos), compactidad y de la resistencia individual de los granos.

Los valores de ángulos de fricción interna, obtenidos por medio de las pruebas triaxiales U,U de acuerdo a la norma ASTM 2850, son para la muestra C1: $\Phi = 28.24^\circ$ y para C2: $\Phi = 34.46^\circ$. Ambos valores resultan estar comprendidos dentro de los rangos esperados de acuerdo a sus respectivas distribuciones granulométricas. La muestra C2 posee un suelo arena limosa, café claro, con cierta estratificación, con alrededor de 55 % de arena y 42 % de finos, que posee un mayor ángulo de fricción interna que C1, constituido por una arena limosa, con prácticamente la misma proporción de arena, 2 % de grava y 40 % de finos no plásticos.

La Ignimbrita Amarilla de la unidad C posee una buena distribución granulométrica, lo que hace aumentar el contacto entre sus granos. Esta propiedad incide en que la ignimbrita se caracterice por tener ángulos de fricción interna moderados, además, es posible que el mayor valor del ángulo de fricción obtenido en la muestra C2 sea favorecido por la menor lubricación de partículas proporcionada por su menor contenido de agua, y el menor valor en C1 se deba a los granos más finos del techo de dicha unidad. Como el espesor máximo de esta Ignimbrita Amarilla es en torno a los 9 m, es necesario contar con más muestras dispuestas a lo largo de su sección para una mejor caracterización.

7.2.5.5 Cohesión (c)

Los valores de cohesión obtenidos de los análisis geomecánicos indican para C1: $c = 1.001 \text{ kg/cm}^2$ y para C2: $c = 0.290 \text{ kg/cm}^2$, siendo el valor de la cohesión en C1 3.4 veces mayor que en C2. En la zona proximal surgen varios aspectos importantes que pueden incidir en que C1 tenga mayor cohesión, es la cercanía a la fuente de emisión donde se produce la cementación parcial de algunas unidades. También aquí hay mayor confinamiento, debido a que los espesores de las unidades sobreyacentes son mayores que en la zona norte,

produciendo mayor compactación. El mayor contenido de humedad en C1 probablemente haga incrementar las fuerzas capilares, por consiguiente la succión. El hecho que la curva de las distribuciones granulométricas indica que en C1 hay una tendencia a mostrar más gruesos, entonces se debería obtener una cohesión menor, lo cual no resulta así, porque están presentes compuestos sulfatados y silicatados produciendo cierta cementación de los granos, y esa mineralización se evidencia en las caras de los taludes por el apareamiento de costras (Figura 27).

7.2.5.6 Gravedad Específica (Gs)

Los valores de gravedad específica obtenidos en la Ignimbrita Amarilla son para C1: $G_s=2.407$ y para C2: $G_s=2.424$. Estos resultados son similares y no hay prácticamente cambios para este parámetro.

7.2.5.7 Peso Volumétrico Húmedo (γ)

El valor del peso volumétrico húmedo o peso unitario medido fue en C1: $\gamma = 1.531 \text{ t/m}^3$ y en C2: $\gamma = 1.479 \text{ t/m}^3$. Este parámetro depende en gran parte del contenido de humedad, aire y también del contenido de lógicos que puedan ir incorporados en cada uno de los depósitos analizados. La diferencia en los pesos unitarios está influenciado por el diferente contenido de agua en las muestras.

7.2.5.8 Otros parámetros

Peso volumétrico seco (γ_s). Este parámetro se obtiene de la relación: $\gamma_s = \gamma / (1 + \omega)$.

Para C1, $\gamma_s \Rightarrow 1.531 / (1 + 0.20) = 1.275 \text{ t/m}^3$

Para C2, $\gamma_s \Rightarrow 1.479 / (1 + 0.13) = 1.308 \text{ t/m}^3$

Estos resultados indican que efectivamente el mayor peso volumétrico húmedo de C1 es debido a la mayor cantidad de agua retenida (20 %), y que el mayor peso volumétrico seco en C2 coincide con el menor contenido de agua.

Porosidad (η) y relación de vacíos (e). La porosidad obtenida en C1, $\eta = 47.0 \%$ y la relación de vacíos $e = 0.886$. En C2, $\eta = 46.0 \%$, y $e = 0.852$. En la Ignimbrita Amarilla los parámetros hidráulicos son bastante similares.

7.3 COMPARACION CON OTROS RESULTADOS

Se cuenta con los resultados de 15 pruebas de laboratorio realizadas en la TBJ de la AMSS, sin embargo, debido a que estas pruebas fueron realizadas hace casi diez años, actualmente los sitios donde se tomaron las muestras han sido cubiertos por las edificaciones y no se puede constatar la unidad de la TBJ donde fueron tomadas, por tanto, no se pueden correlacionar de esa manera, sino por los valores reportados de sus parámetros.

Al comparar los valores de humedad, ángulo de fricción interna, gravedad específica, peso volumétrico seco, porosidad y relación de vacíos de las tablas 3 y 4, se observa que los valores presentan ciertos rangos parecidos entre los mínimos y máximos, y que las pequeñas diferencias se consideran aceptables, ya que las unidades no son uniformes. La clasificación de los suelos y los parámetros de la Tabla 4, indican que tienen cierta semejanza con los suelos de la Unidad G y D, lo que sugiere que buen porcentaje de esas muestras pueden provenir de depósitos de lluvias de cenizas y otras de ignimbritas finas de la Unidad G. Aún cuando los parámetros son algo parecidos con la Unidad D, por su posición estratigráfica dentro de la secuencia, es menos probable que haya alguna muestra de esta unidad.

En relación a la cohesión, cuando no se consideran aquellas muestras que están cementadas de la Tabla 3 (C1, D1, E1 y E2), que dan valores relativamente altos, los resultados de cohesión son de bajos a moderados para ambas tablas, lo cual es una de las características de estos suelos parcialmente saturados. Sin embargo, los valores altos de ángulo de rozamiento $\Phi = \geq 40^\circ$ en muestras que clasificadas como granulometría fina, no están acordes a ese tipo de material. Por tanto, esos valores altos parecen que son más correlacionables con las ignimbritas de la Unidad F, pero esas ignimbritas en la Tabla 3 muestran valores bajos a moderados. Esto lleva a la reflexión que es necesario realizar pruebas in situ en las

ignimbritas cuyos resultados obtenidos de esta manera, podrán ser más representativos que aquellos realizados con la instrumentación que se usa en El Salvador.

7.4 IDENTIFICACION DE UNIDADES GEOTECNICAS

Después de contar con las observaciones de campo y de laboratorios de las unidades de TBJ, haber realizado correlaciones de algunos parámetros con los procesos eruptivos y mecanismos de transporte, se presenta un resumen de esas características para cada unidad, y se mencionan los aspectos vulcanológicos importantes que tienen incidencia en esas propiedades.

7.4.1 Síntesis de las características geomecánicas

Unidad G. La unidad G de espesor de hasta 15 m en el sur del área (punto 12), está compuesta por delgados depósitos de caída finos (ML) “coignimbritas” y flujos piroclásticos (SM) de matriz fina, de delgados espesores, con cohesiones ($0.032 - 0.122 \text{ kg/cm}^2$) y ángulos de rozamiento bajos ($25.57^\circ - 28.43^\circ$). Los depósitos de caída se presentan bandeados por las variaciones granulométricas, características que se acentúan con la intercalación de los flujos piroclásticos. La granulometría fina, casi uniforme, la carencia de cohesión (deleznables) de los depósitos de caída, vulneran las propiedades mecánicas de esta unidad, cuya única fuerza cohesiva es la succión, aunque las ignimbritas tengan cierta cementación y operen en ella la succión y la microfábrica como fuerzas adicionales para la estabilidad de taludes. Por eso, los suelos de Unidad G necesitan tratamiento previo como la remoción y compactación para mejorar las condiciones del suelo. En relación a los taludes, estos deben tener pendientes igual o inferiores a 45° y estar debidamente protegidos por zacate o grama para evitar la erosión. Debidos a que estos materiales son fácilmente erosionables, los taludes deben contar con bermas y con un sistema de drenaje adecuado.

Unidad F. Está constituida por suelos arenosos bien graduados (SW) con gravas pumíceas y posiblemente por gravas limosas (GM) en la zona proximal. Los valores de cohesión en uno de esos flujos resultaron ser bajos a moderados $c = 0.0250 - 0.105 \text{ kg/cm}^2$. El ángulo de rozamiento sin embargo, debido a la textura gruesa de esta unidad debieran ser mayores que los reportados en la tabla 3 (26.6° a 35.9°). Los ensayos de compresión triaxial son

difíciles de realizar en estos suelos con la instrumentación que poseen los laboratorios locales, debido a la presencia abundante de fragmentos de pómez y líticos tamaño grava, en la que los especímenes se elaboran donde están ausente este material granular grueso, por tanto, los resultados reportan las características mecánicas solamente de la matriz.

Los taludes de estos depósitos son bastante estables ante las lluvias y sismos fuertes, gracias a las fuerzas cohesivas emanadas de la succión, microfábrica y cementación, que operan en sus componentes para mantenerlos estables; sin embargo, son susceptibles a la erosión, por eso deben contar con bermas, buenos drenajes y protegerlos contra la erosión con siembra de grama o zacate, además, se pueden emplear geotextiles. Los taludes constituidos por la unidad F son estables aún con pendientes superiores a 45° . De todos estos suelos de TBJ, los múltiples flujos piroclásticos de la unidad F son los más importantes, ya que son los que más cerca están de la superficie, constituyen un suelo potente, tienen más cobertura y desplazamiento (hasta 37 km) en la zona. La mayor parte de San Salvador está asentada sobre esta unidad.

Unidad E. De la unidad E solamente se cuentan con datos de la subunidad superior húmeda, que es una de las que tiene las mejores propiedades mecánicas de la TBJ: la cohesión es alta a moderada $c = 1.615 - 0.688 \text{ kg/cm}^2$ y ángulo de rozamiento bajo a moderado $\phi = 25.77^\circ - 29.84^\circ$. La gravedad específica es de las más altas ($G_s 2.597 - 2.432$), el peso unitario es relativamente más alto y está incrementado por la cementación ($1.640 - 1.752 \text{ kg/cm}^2$), pero con el inconveniente que cuenta por tener un espesor muy delgado, no siempre tiene completo los niveles húmedos y secos y a veces no se encuentra en la secuencia de TBJ. En zona sur del área, por encontrarse algo profunda debajo de la unidad F, no siempre está expuesta a la superficie, solamente en cauces profundo de ríos y quebradas.

Unidad D. La unida D es la que presenta la granulometría más fina y más uniforme, con finos del 67 % a 73 % que pasan la malla 200. Los depósitos de caída son bastante deleznales, su cohesión depende de la succión y la cementación, es la unidad que presenta las propiedades mecánicas y físicas menos apropiadas para la estabilidad de taludes cuando no está cementada. El espesor mayor medido es de 8.72 m (punto 17). El peso específico del suelo se ve aumentado con la cementación, donde llega ser el mayor registrado (1.789 t/m^3). La cohesión es baja (0.062 k/cm^2) pero cuando se encuentra cementada se incrementa

considerablemente (0.778 k/cm^2), lo que aparentemente influye en el ángulo de fricción interna que de 31.5° se incrementa a 38.15° .

Unidad C. Está constituida por dos flujos, denominados Gris y Amarillo. El Gris está en la base y alcanza espesores de hasta 9.96 m (punto 16). Posee una longitud aún no determinada y este depósito inició el relleno de los cauces de los ríos y quebradas. Se caracteriza por ser muy rico en líticos andesíticos que proceden del resquebrajamiento de la roca de caja de la cámara magmática durante la erupción, cuyos fragmentos se incorporaron al magma. Este flujo aflora en los taludes del Río Las Cañas donde muestra pedazos de carbón de origen vegetal y está parcialmente cementado. El Amarillo sobreyace al Gris, posee mayor distribución espacial y se desplazó por más de 14 km. El espesor máximo es de 9.37 m (punto 16). Los datos de laboratorio para este depósitos indica que la cohesión es mayor cuando existe cementación y varía de $c = 0.290 - 1.001 \text{ kg/cm}^2$. El ángulo de fricción interna es bajo a moderado $\phi = 28.25^\circ - 34.46^\circ$, la gravedad específica es relativamente alta ($G_s = 2.424 - 2.407$) y el peso unitario es incrementado por la cementación de 1.479 t/m^3 a 1.531 t/m^3 .

7.4.2 Unidades geotécnicas de TBJ

Los análisis realizados con base a los resultados de laboratorios y de las observaciones de campo en cada unidad, han servido para la evaluación física y la determinación de las propiedades mecánicas de cada una de estas unidades, lo que ha permitido elaborar un perfil de la Tierra Blanca Joven, en el que se han agrupado las unidades vulcanológicas por sus características similares, en cuatro unidades geotécnicas. Si bien no se tienen datos de laboratorios de algunas de ellas, pero se ha considerado la naturaleza de los depósitos, la textura, el grado de cohesión, cementación de las unidades y dureza. Las descripciones de las cuatro Unidades Geotécnicas se presenta a continuación del techo hacia la base:

Unidad IV. comprende la secuencia de los depósitos de ignimbritas finas y sus correspondientes depósitos de caída de cenizas llamados “coignimbritas”, de la Unidad G. Esta es la unidad de toda la TBJ donde están los mayores asentamientos humanos del AMSS. Los resultados de laboratorio que se presentan corresponden a ignimbritas de textura fina y no se cuenta con datos de las coignimbritas, pero estas son deleznales, no son

compactas, poseen granulometría fina y relativamente uniformes, por tanto, en su conjunto la unidad G depende en gran parte del comportamiento de sus coignimbritas para su estabilidad, y estas dependen del grado de saturación, por tanto, son poco estables. Los taludes deben tener diseños y drenajes adecuados, ya que son muy erosionables; y en taludes muy altos pueden incluirse muros de retención. La figura 28 muestra esquemáticamente el agrupamiento de las unidades de TBJ en cuatro unidades geotécnicas.

Unidad III. Está conformada la Unidad E y por las ignimbritas α , β y F. La Ignimbrita Alfa es la base en la parte proximal, luego la Unidad E pasa a ser la base. Sus subunidades húmedas presentaron la cohesión más alta y toda la secuencia (Unidad E) opera como un todo. La subunidad Beta sólo se encuentra en las partes proximales y en la intermedia. Las ignimbritas múltiples de la Unidad F, de naturaleza isotrópica, desde el punto de vista geotécnico juegan el papel más importante de la Unidad III y de toda la TBJ, ya que presentan buenas características geomecánicas, poseen el mayor espesor aproximadamente de 20 m y el mayor volumen; debido a ello, son los que mayor desplazamiento alcanzaron (37 km) y en superficie cubren extensas áreas de San Salvador y de municipios inmediatos. Las características geomecánicas de estos depósitos se reflejan en los taludes verticales más estables. Los depósitos de la Unidad III forman el esqueleto de la TBJ y a ellos se debe la verticalidad que presentan los taludes.

Unidad II. Está compuesta por la unidad D. Esta unidad es la de granulometría más fina y mal graduada y cuando se encuentra en las zonas intermedias y distales es la que presenta la menor cohesión. Esta unidad sólo en la zona proximal presenta buenas características geomecánicas debido a la cementación.

Unidad I. Comprende las unidades A, B, y C. Las unidades A y B están en la base de toda la secuencia de TBJ, las ignimbritas Gris y Amarilla son isotrópicas y debido a sus potentes espesores son importantes en la zona proximal e intermedia.

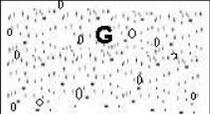
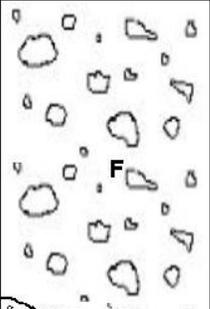
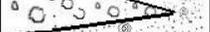
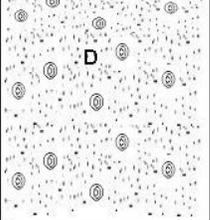
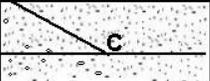
UNIDADES GEOTECNICAS			
	UNIDADES VULCANOLOGICAS	UNIDADES GEOTECNICAS	LEYENDA
Unidad G secuencia de ignimbritas y coignimbritas de delgados espesores		IV	Suelos SM y ML, no cohesivos, resistencia por fricción, muy poco cementada. Cohesión 0.032 -0.122 k/cm2. AFI: 28.43° - 25.57° Son muy susceptibles a la erosión. Cementación parcial en ignimbritas.
Unidad F Múltiples ignimbritas		III	Incluye unidad F, ignimbrita Beta, unidad E e Ignimbrita Alfa Suelos SM con gravas y bloques de pómez. Relativamente bien graduada, cementación parcial por minerales. Ángulos de rozamientos altos. Cohesión baja y variable de 0.105 a 0.025 k/cm2. Son susceptibles a la erosión. Probable cementación en F Grandes espesores. Taludes verticales por presencia de discontinuidades. La Unidad E posee la cohesión más alta 1.615 k/cm2
Subunidad ignimbrita Beta			
Unidad E, depósitos húmedos y secos			
Unidad Ignimbrita Alfa		II	Suelos ML con poco pómez diseminados. Depósitos de caída muy finos bandeados por variaciones granulométricas con abundantes lapilli acrecional. No cohesivos. Básicamente la succión opera como fuerza resistiva. Ángulos de fricción relativamente moderados. Deleznales. Granulometría relativamente uniforme. Cohesión varía de 0.778 a 0.062 kg/cm2 AFI varía de 38.15° a 31.37°
Unidad D Depósitos de caída finos, oleadas piroclásticas e ignimbritas			
Unidad C Ignimbrita Amarilla y oleadas piroclásticas Ignimbrita Gris		I	Suelos SM y ML Está compuesta por la unidad C y los delgados depósitos A y B. Flujos piroclásticos parcialmente cementados. cohesión variable 1.001- 0.290 kg/cm2 y AFI 28.25° a 43.46° Suelos relativamente bien graduados.
Unidad B, pómez de caída			
Unidad A, depósito de caída inicial			

Figura 28. Perfil de Unidades Geotécnicas de TBJ