

# 13. Caracterización y Estudio de Modelos Constitutivos en la Unidad G de Tierra Blanca Joven (TBJ)

J. A. Chávez, doctorante ČVUT, técnico OPAMSS, O. E. Ayala, estudiante UES, J. Landaverde, docente UES, L. E. Mendoza, docente UES, R. López, docente UES y E. Henríquez, La Geo

## Resumen

Se realizaron pruebas de laboratorio para conocer mineralogía y obtener los parámetros de tres modelos constitutivos: Mohr-Coulomb, Cam Clay Modificado e Hipoplasticidad. Los modelos constitutivos conectan los cambios de volumen y esfuerzo cortante en un suelo. Estos modelos son usados en los cálculos de estabilidad taludes y deformaciones de suelos. Las pruebas se realizaron en las tefras Tierra Blanca Joven (TBJ) donde se dan problemas de denudación. El modelo Mohr-Coulomb (usado generalmente en El Salvador para diseño geotécnico) difiere del comportamiento real; este modelo es recomendado para diseños preliminares. El modelo que se asemeja parcialmente al comportamiento de laboratorio es el de hipoplasticidad pero también presenta ciertas deficiencias. Esto hace que sea importante seguir buscando un modelo que se adecue al comportamiento de nuestros suelos. En las difracciones de rayos X hechas a algunas unidades de TBJ en la fracción de arcilla se observó presencia de esmectitas.

## Índice de términos

Colapso, consolidación, elementos finitos, geotecnia, mineralogía, modelo constitutivo, Tierra Blanca Joven, triaxial, simulación.

Este trabajo fue apoyado por el Ayuntamiento de Barcelona por medio de programa "Fortalecimiento de las Capacidades Locales para la gestión de riesgo de desastres en la Municipalidad de Soyapango, fase II". FOCAL-SOYAPANGO-II de Geólogos del Mundo.

J. A. Chávez actualmente es doctorante en Universidad Técnica Checa en Praga (ČVUT) y trabaja en Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), San Salvador, El Salvador (e-mail: jose.alexander.chavez.hernandez@fsv.cvut.cz).

O. E. Ayala actualmente es estudiante en escuela de civil de Universidad de El Salvador (UES) San Salvador, El Salvador (e-mail: oscarvaldez.oear@gmail.com).

J. Landaverde actualmente es docente en departamento de geotecnia en Universidad de El Salvador (UES) San Salvador, El Salvador (e-mail: jmlq30@yahoo.com.mx).

L. Mendoza actualmente es docente en departamento de geotecnia en Universidad de El Salvador (UES) San Salvador, El Salvador (e-mail: leslyemidalia@yahoo.com).

R. López actualmente es docente en departamento de recursos naturales y medio ambiente en Universidad de El Salvador (UES) San Salvador, El Salvador (e-mail: agreoy@yahoo.es).

E. Henríquez actualmente trabaja en LaGeo (e-mail:ehenriquez@lageo.com.sv).



## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), lugar donde se concentra la actividad económica, instituciones públicas y privadas, además con una alta densidad de población experimenta problemas graves de erosión, colapso, movimientos de ladera y asentamientos del terreno; lo cual es popularmente conocido por el término "cárcavas". Dicha problemática se da especialmente en las tefras volcánicas llamadas "Tierra Blanca Joven" (TBJ) producto de la última erupción pliniana de la Caldera de Ilopango, cuyos productos son una intercalación de estratos de caída, flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas; siendo sus unidades nombradas por las letras: A, B, C, D, E, ignimbritas (Alfa y Beta), F y G desde la base hasta la más superficial según [1].

La TBJ presenta taludes o laderas verticales, siendo lugares en los que durante terremotos o lluvias ocurren bastantes movimientos de ladera y erosión, según [2] en otros países del mundo dicha problemática no ocurre con la misma frecuencia como en El Salvador o al menos el impacto no es tan intenso; a eso hay que añadirle que gran parte del sistema de tuberías de aguas potable, aguas negras, así como, lluvias están en mal estado y cuando fallan provocan el colapso de calles o viviendas completas. Esta situación se ha dado debido al poco conocimiento de los materiales geológicos en que se asentó la capital, ya que la urbanización se expandió de manera desordenada y sin control; por lo que es primordial el conocimiento de comportamiento de los suelos para dar las recomendaciones en cuanto al uso de suelo, obras de mitigación y cimentaciones.

En El Salvador se han hecho trabajos donde se ha estudiado el comportamiento y obtenido algunos parámetros de la Tierra Blanca Joven (TBJ) (especialmente de la Unidad G): [1] - [8]. Los resultados de cohesión y ángulo de fricción son reportados usualmente, pero se observa dispersión en los resultados [9]. Estas diferencias están conectadas con el estado de esfuerzos, la unidad estudiada, su facie y al contenido de humedad.

Según [1] los depósitos de TBJ, presentan un mecanismo de ruptura de estructuras laminares paralelas a la cara de los taludes y su formación depende de una serie de procesos naturales, como el efecto de temperatura, el cual genera exfoliación, produciendo grietas debido a contracción y expansión continua. La lluvia es otro de los factores que participan en la formación de las grietas [1], el agua entra en estas, produciendo un aumento en la presión de poros y facilitando el crecimiento de raíces dentro de ellas. Las raíces penetran a lo largo de las fisuras de los taludes y producen presión lateral en el interior de las discontinuidades. Durante las lluvias y terremotos predominan los flujos superficiales y derrumbes de poco a mediano volumen, pero con gran densidad en el territorio.

Los resultados del índice de colapso para [5]- [7] están entre severo y ligero. Esos resultados indican que hay una disminución de volumen o colapso cuando TBJ es sometido a carga de 200 kPa y saturado en ese momento.

De acuerdo con [2] el potencial de colapso mediante la prueba de doble-odómetro de muestras inalteradas de TBJ y remodeladas, son similares a esfuerzos bajos, pero cambian cuando aumenta el nivel de esfuerzo. Se observó que las muestras con humedad natural colapsan abruptamente cuando se carga y satura (en este caso con 1300 kPa) casi alcanzando la línea de compresión saturada y siguiéndola a medida se descarga.

[2] concluyeron que la pérdida de volumen en Tierra Blanca Joven (TBJ), relacionado con la saturación, ocurre de repente y es la posible causa del gran número de movimientos de ladera que se dan en el AMSS.

La fabrica de los suelos colapsables esta conformada por un esqueleto de granos sueltos (cuarzos generalmente) y micro-agregados (conjuntos de arcillas o partículas de arcilla y limo). Estando separadas cada una, estando conectadas por uniones o puentes con poros uniformemente distribuidos [10]. Los puentes están formados por minerales tamaño

arcilla, que consisten de minerales de arcilla, cuarzo fino, feldespato o calcita. Sílice y óxidos de hierro pueden estar concentrados como cementante en los contactos de los granos. Como los granos no están en contacto directo, el comportamiento mecánico está gobernado por la estructura y la calidad de las uniones y puentes.

Según [4] la pequeña cantidad de esmectita en TBJ (montmorillonita) puede actuar como cementante. Sin embargo [1] concluye que el cementante en TBJ está relacionado a la mineralización secundaria debido a procesos de evaporación y transporte de minerales; estando conformado por sulfatos y silicatos.

Se realizaron análisis por la técnica de difracción de rayos X (DFRX) y análisis petrográfico para identificar los minerales presentes en las muestras de Tierra Blanca Joven (TBJ). Dichos análisis fueron hechos en el Instituto Geológico de la Academia de Ciencias Eslovaca, LaGeo (El Salvador) y en el Instituto de Geoquímica, Mineralogía y Recursos Minerales de Univerzita Karlova, Republica Checa.

TBJ muestra bastante heterogeneidad en cuanto a sus componentes y sus proporciones. Los minerales identificados son principalmente plagioclasa de tipo albita (31-52%), hornblenda de tipo pargasita (19 – 28%) y cuarzo (20 – 28%), con poca cantidad de minerales de arcilla de 1 – 8%, según el análisis volumétrico y granulometría. Sin embargo tomando en cuenta la presencia de conjunto de minerales de arcilla y limo (porción fina), la cantidad de finos asciende a 3 – 30%. Estos minerales caracterizan las tefras TBJ tipo riocacita rica en hornblenda. La coloración clara es debido a la abundancia de las plagioclasas y cuarzo sobre los minerales oscuros (hornblenda).

El análisis de muestra arcilla (secada y tratada con etilenglicol) a través de DFRX identificó la presencia de esmectita principalmente montmorillonita, la cual tiene la propiedad de expandir al contacto con el agua, ya que es capaz de absorber agua en su espacio interlamina y es soluble en ácidos. También hay presencia de magnetita, zeolita,

crystalita, caolinita y saponita. Cabe mencionar que los minerales de arcillas forman laminas (capas tetraédricas y octaédricas) en su estructura y el tamaño de grano es inferior a 2 micrones. Asimismo, el análisis químico elemental indica una composición característica de esmectita evidenciada por un contenido superior de  $Al_2O_3$  (15.22% peso).

Los modelos constitutivos conectan los cambios de volumen y esfuerzo cortante en un suelo y se aplican a cualquier esfuerzo aplicado en todo el rango de esfuerzos [11]. Los modelos elasto-plásticos distinguen entre deformaciones elásticas y plásticas. Los modelos constitutivos proveen de un marco cualitativo para mejorar el conocimiento del comportamiento del suelo y proporcionan un modelo constitutivo para usar en los cálculos de elementos finitos (estabilidad taludes y deformaciones en suelos en diseño de cimentaciones).

El objetivo de esta investigación es la evaluación de tres modelos constitutivos (Mohr-Coulomb, Cam Clay Modificado e Hipoplasticidad) para conocer cual se acerca a comportamiento real obtenido en laboratorio. Para esto se hicieron comparaciones entre los resultados de laboratorio (triaxial drenada y consolidación) y las simulaciones de dichas pruebas en programa de elementos finitos (PLAXIS) usando los modelos.

## II. METODOLOGÍA

El punto de estudio fue denominado con el nombre de Padre Arrupe y se encuentra ubicado a las cercanías del Colegio Español Padre Arrupe, al lado derecho de la Autopista Este-Oeste, en la ciudad de Soyapango. Este punto presenta un talud con estratigrafía variada de unidades visibles de TBJ, entre ellas; unidad D, E, F y G.

Las curvas granulométricas del estrato estudiado (caída de la unidad G de TBJ) en el Padre Arrupe indican que es un limo arenoso. Según los resultados obtenidos en los ensayos de límite líquido y plástico, este suelo no presenta plasticidad.



Para obtener los parámetros de los modelos constitutivos fue necesario hacer las pruebas en diferentes estados: saturado (para evitar las fuerzas capilares o succión en la prueba triaxial drenada), seco (para evitar fuerzas capilares o succión en las pruebas de consolidación y caja de corte), suelto (para obtener relación de vacíos máxima, alcanzar estado crítico y obtener relación de vacíos crítico), denso (para obtener parámetros de rigidez y la relación de vacíos mínima).

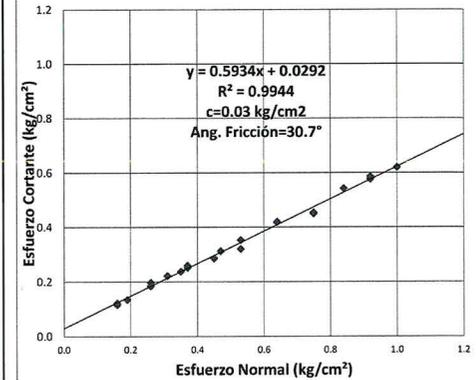
Para simular las pruebas básicas de geotecnia se hizo uso de la opción SoilTest de PLAXIS VIP (licencia de Universidad Técnica Checa en Praga, ČVUT).

#### A. Mohr-Coulomb

Este modelo es una aproximación de primer orden al comportamiento no-lineal del suelo y es solo recomendado para un análisis preliminar de la situación [12]. Está compuesto por la ley de Hooke (elástico) y el criterio de falla de Mohr-Coulomb (plástico). Con este modelo es posible simular el comportamiento de suelos finos normalmente consolidados o suelos granulares. La teoría básica se explica en [13].

Tiene 5 parámetros: el módulo de Young ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), cohesión ( $c$ ), ángulo de fricción ( $\phi$ ) y ángulo de dilatancia ( $\psi$ ). Los dos primeros están relacionados con la elasticidad del suelo y los otros con la plasticidad y dilatancia respectivamente. Los valores de  $\phi$  y  $c$  fueron obtenidos con la caja de corte en muestras remoldeadas, secas y en su estado más suelto posible (Fig. 1).

Fig. 1 Resultados obtenidos con Caja de Corte en muestras secas en estado suelto.



Además  $\phi$  y  $c$  fueron obtenidos con la ayuda de pruebas triaxiales consolidadas-drenadas. Las muestras fueron saturadas (para evitar las fuerzas capilares y cementación). Muestras inalteradas fueron usadas (normalmente consolidadas) para comparar con los resultados de la caja de corte y asegurarse de alcanzar el estado crítico [14], [15] (Fig. 2). Pruebas de triaxial consolidadas-drenadas en muestras remoldeadas (muestras densificadas haciendo uso de prueba Proctor ASTM D-1557) fueron realizadas también (Fig. 3).

El módulo de elasticidad (Young,  $E$ ) se deriva de la curva esfuerzo deformación de las pruebas triaxiales. El módulo de secante al 50 % de esfuerzo es denotado como  $E_{50}$  y fue la base para obtener el segmento de línea elástico.

El coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) fue obtenido de la curva deformación volumétrica-axial de las pruebas triaxiales drenadas y la ecuación es:

$$\nu = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\epsilon_V}{\epsilon_a} \right) \quad (1)$$

Donde:

$\varepsilon_V / \varepsilon_a$  : Representa la pendiente de la curva de deformación volumétrica-axial (segmento elástico)

El ángulo de dilatancia ( $\Psi$ ) puede ser aproximado como  $\Psi = \varphi - 30^\circ$  [12].

Los parámetros usados para el modelo Mohr-Coulomb se muestran en la tabla I. Para cohesión ( $c$ ) y ángulo de fricción ( $\varphi$ ) se usaron los resultados de prueba triaxial drenada.

Tabla I. Parámetros usados en modelos Mohr-Coulomb

Condición de prueba	Angulo de Friccion Critico $\varphi$ 'c (grados)	Cohesion c (kPa)	Modulo Elasticidad E (kPa)	Angulo Dilatancia $\Psi$ (grados)	Modulo Poisson $\nu$
Normalmente Consolidada	30.9	1.34	8757.2	0	0.3675
Sobre-Consolidada	50.1	97.01	110454	20.13	0.4604

### B. Cam Clay Modificado

Este modelo está basado en la teoría del estado crítico [14], [15] y es recomendado para modelar suelos finos aproximadamente normalmente consolidados [12]. La teoría del estado crítico trata de representar el comportamiento elasto-plástico del suelo usando los esfuerzos normales y cortantes, pero incluyendo un parámetro que asocia los cambios volumétricos del material. Este modelo presenta una superficie de estado límite, la cual es la frontera para todos los posibles estados de un suelo remoldeado [15]. Pero suelos con cementación y/o succión (fuerzas capilares) pueden ocurrir fuera de esta frontera. También se ha comprobado que comportamiento no-lineal puede ocurrir dentro de la superficie de estado límite.

Fig. 2 Resultados obtenidos con triaxial drenada en muestras saturadas inalteradas.

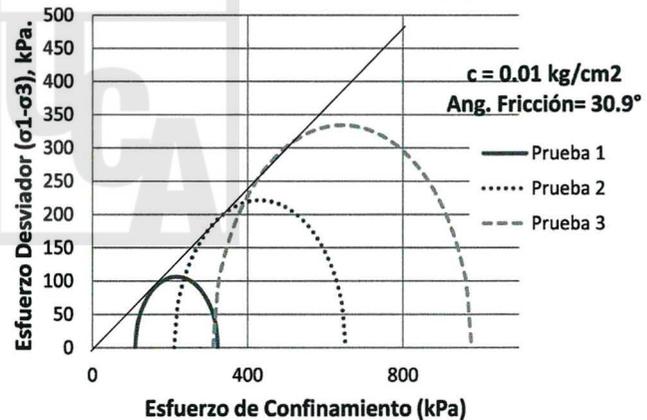
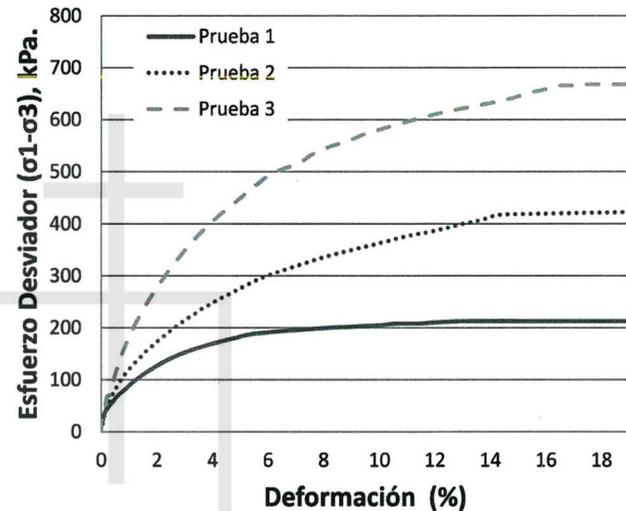
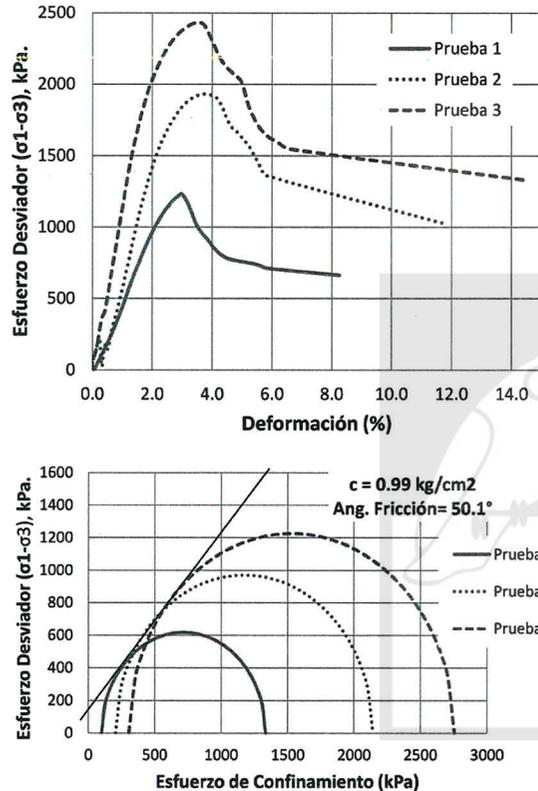


Fig. 3 Resultados obtenidos con triaxial drenada en muestras remoldeadas con Proctor ASTM D-1557.

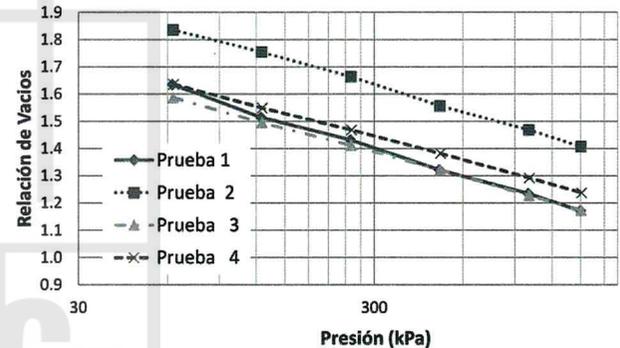


El modelo requiere de 5 parámetros:  $\kappa$  (hinchamiento o pendiente de descarga);  $\lambda$  (compresión o pendiente de carga);  $M$  (tangente de la línea de estado crítico), coeficiente de Poisson elástico ( $\nu$ ) y  $\Gamma$  (volumen

específico en el esfuerzo efectivo unitario). PLAXIS usa la relación de vacíos inicial ( $e_i$ ) en lugar de  $\Gamma$ .

En las Fig. 4, 5 y 6, se presentan pruebas de consolidación de carga y carga-descarga. Las líneas de consolidación normal (NCL) y de estado crítico (CSL) son paralelas [15] con una pendiente  $\lambda$ . La pendiente de descarga  $\kappa$  también se obtiene de la grafica de consolidación carga-descarga (Fig. 6).

Fig. 4 Resultados obtenidos en consolidación de muestras sueltas-secas.



en el espacio  $q$ - $p$  puede ser obtenido directamente de la grafica (Fig. 7) que incluye los puntos de estado crítico de pruebas triaxiales drenadas de muestras inalteradas, pero también puede ser obtenido [15] usando el ángulo de fricción crítico ( $\phi_c$ ):

$$M = \frac{6 \sin \phi_c}{3 - \sin \phi_c} \quad (2)$$

Fig. 5 Resultados obtenidos en consolidación de muestras densas-secas.

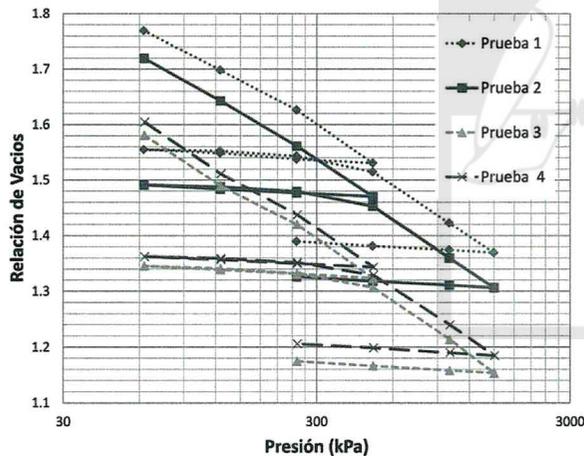
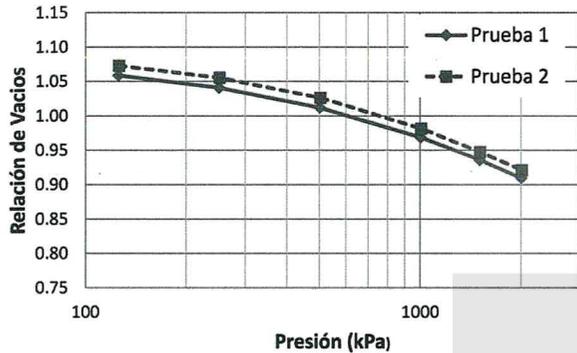
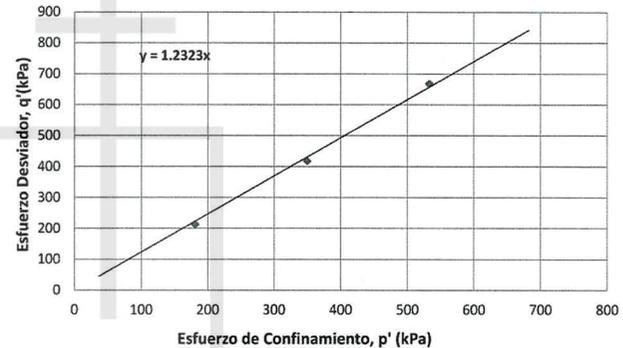


Fig. 6 Resultados obtenidos en consolidación de carga-descarga de muestras sueltas-secas.

Un valor similar de  $M$  fue obtenido usando la gráfica de Fig. 7 (1.23) y ecuación 2 (1.24), esto quiere decir que el estado crítico fue alcanzado en las pruebas triaxiales drenadas. Los valores de coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) corresponden a lo explicado en modelo Mohr-Coulomb.

Fig. 7 Línea de estado crítico (CSL) construida con resultados de pruebas de triaxial inalteradas.



Pruebas de consolidación fueron realizadas en estados denso y suelto; también pruebas de carga-descarga en estado suelto fueron necesarias. Se realizaron en estado seco y remoldeado para evitar las fuerzas capilares y cementación.

En las ecuaciones 3 y 4 [15]  $\lambda$  y  $\kappa$  tiene una relación con la pendiente de la NCL del segmento de carga de prueba de consolidación ( $C_c$ ) y con el segmento de carga-descarga ( $C_s$ ).

$$\lambda = \frac{C_c}{2.3} \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{C_s}{2.3} \quad (4)$$



El parámetro de relación de vacíos inicial ( $e_i$ ) corresponde a la prueba simulada. Los parámetros usados para el modelo Cam Clay Modificado se presentan en tabla II.

Tabla II. Parámetros usados en modelos Cam Clay modificado

Condicion de Prueba	Indice de Carga ( $\lambda$ )	Indice de Descarga ( $\kappa$ )	Tangente de CSL (M)	Modulo de Poisson ( $\nu$ )
Normalmente Consolidado	0.12	0.0085	1.23	0.29
Sobre-Consolidado	0.12	0.0085	1.23	0.46

### C. Hipoplasticidad

Hipoplasticidad para arenas de von Wolffersdorff (1996) es el otro modelo verificado en este artículo. Según [16] la ley de hipoplasticidad es una buena selección para un suelo no cohesivo debido a que describe el comportamiento del suelo realísticamente, además de asociar los rangos de esfuerzo y deformación. [17] dice que en hipoplasticidad no es necesaria una superficie de fluencia o la descomposición del rango de deformación en rangos con porciones elásticas y plásticas. Además puede describir el comportamiento de deformación de suelos no cohesivos, incluyendo la no-linealidad y la inelasticidad.

El modelo de hipoplasticidad para arenas puede ser usado también para limos [16]. La ecuación y teoría se desarrolla en [16] y [17].

Requiere de 8 parámetros: la rigidez granular  $h_s$  y  $n$  controlan la forma de las curvas de vacío límite (línea de compresión normal y línea de estado crítico), el ángulo crítico de fricción  $\phi_c$ , la relación de vacíos crítica  $e_{c0}$  a presión cero, las relaciones de vacío mínima y máxima  $e_{d0}$  y  $e_{i0}$  a presión cero hacen referencia a relaciones de vacío que especifican posiciones de límites de las curvas de relación de vacíos.  $\alpha$  controla la

dependencia del ángulo de fricción de pico a una densidad relativa.  $\beta$  controla la dependencia de la rigidez del suelo a la densidad relativa.

Una estimación simple de  $\phi_c$  puede ser obtenida del ángulo de reposo de una muestra seca, si las fuerzas cohesivas son despreciables. Para TBJ un ángulo de reposo de  $37^\circ$  fue obtenido, y si se compara con los resultados de caja de corte y pruebas triaxial ( $31^\circ$ ), una diferencia de  $6^\circ$  es obtenida. Debido a esto, el resultado de ángulo de reposo fue descartado debido a que fuerzas de capilaridad asociadas a humedad de aire incrementaron el ángulo de reposo.

La relación de vacíos crítica  $e_{c0}$  esta relacionada al estado crítico. Teóricamente se define a una presión cero, pero también [17] puede ser igual a  $e_{max}$  que corresponde a una muestra suelta.

La relación de vacíos  $e_{d0}$  y  $e_{i0}$  pueden ser aproximados con relaciones empíricas.  $e_{d0}$  es la relación de vacíos a densidad mínima. ( $e_{min}$ ), dicho valor fue obtenido al densificar muestras de TBJ por medio de compactación manual, dinámica y vibratoria [18]. De no ser posible obtener una muestra densa  $e_{d0}$  puede ser aproximada como  $e_{c0}^*(0.4)$ .

La relación de vacíos  $e_{i0}$  representa [17] la relación de vacíos máxima a presión cero. [16] sugieren usar  $e_{i0} = 1.15 e_{c0}$ , basado en estudio de paquete de partículas esféricas sueltas idealizadas.

Los parámetros  $h_s$  y  $n$  fueron obtenidos de curvas de consolidación (Fig. 4, 5 y 6). El parámetro  $n$  controla la curvatura de curva de consolidación y  $h_s$  controla la pendiente general de la curva de consolidación. El parámetro  $n$  puede ser calculado de

$$n = \frac{\ln\left(\frac{e_{s1} C_{c2}}{e_{s2} C_{c1}}\right)}{\ln\left(\frac{p_{s1}}{p_{s2}}\right)} \quad (5)$$

Donde el esfuerzo promedio  $p_{s1}$  y  $p_{s2}$  pueden ser calculados de los esfuerzos axiales usando la formula de Jacky ;  $e_1$  y  $e_2$  son las relaciones de vacío que corresponden a los esfuerzos  $p_{s1}$  y  $p_{s2}$ .

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \ln p_s} \quad (6)$$

$$p_s = \sigma'_s \frac{(1+2F_c)}{3} \quad (7)$$

El parámetro  $h_s$  puede ser obtenido con

$$h_s = 3p_s \left( \frac{m_s}{C_c} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

Donde  $C_c$  es el índice de compresión secante calculado de los valores límites (Figura 6 de [16]) de los intervalos de calibración  $ps_1$  y  $ps_2$ ;  $ps$  y  $e$  son promedios de los valores límites de  $p$  y  $e$  de este intervalo.

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  controlan independientemente diferentes aspectos del comportamiento del suelo.  $\beta$  controla la rigidez cortante y  $\alpha$  controla el ángulo de fricción pico.

Las nuevas versiones del software PLAXIS tienen incorporada una simulación de pruebas triaxiales, consolidación y caja de corte entre otras, lo cual sirve para comparar comportamiento de un modelo constitutivo contra resultados reales de laboratorio para comparar su aplicabilidad. Dicha aplicación fue usada para obtener los parámetros del modelo de Hipoplasticidad y al final comparar los resultados de los tres modelos estudiados (Mohr-Coulomb, Cam Clay Modificado e Hipoplasticidad) y compararlos contra los resultados reales de laboratorio.

Para simulación y evaluación dos pruebas triaxiales fueron escogidas. La primera corresponde a la prueba 2 (Fig. 2) de la muestra inalterada (normalmente consolidada). La segunda a la prueba 3 (Fig. 3) de las muestras remoldeadas (densas) usando el Proctor ASTM D-1557. También la prueba 2 (Fig. 6) de prueba de consolidación carga-descarga; prueba 2 (Fig. 4) de consolidación en estado mas suelto; prueba 1 (Fig. 5) en su estado denso fueron usadas.

Para los parámetros finales de  $h_s$ ,  $n$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  fue necesario iniciar un proceso de calibración tomando en base los resultados obtenidos en laboratorio. Los valores de relación de vacíos ( $ec_0$ ,  $ed_0$  y  $ei_0$ ) y ángulo de fricción crítica ( $\phi'_c$ ) permanecieron constantes durante todo el proceso de calibración. Para simulación y calibración, el parámetro de relación de vacíos inicial ( $ei$ ) corresponde a la prueba simulada. Al inicio del proceso de calibración  $\alpha = 0.1$  y  $\beta = 1$  fueron constantes. Luego se fueron variando los valores de  $h_s$ ,  $n$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  y se comparaban los resultados con los datos de laboratorio de consolidación y triaxial, hasta que se obtuvieron las graficas mas cercanas a la realidad. En tabla III se presentan parámetros escogidos finalmente y que se acercan más a la realidad.

PLAXIS tiene también un modulo de optimización, donde se hace proceso de parametrización automáticamente pero durante el desarrollo del trabajo no se pudo tener acceso a dicho modulo.

Tabla III. Parámetros usados en modelo Hipoplasticidad

$\phi'_c$	$h_s$	$n$	$ed_0$	$ec_0$	$ei_0$	$\alpha$	$\beta$
30.9	5570	0.85	1.11	1.9	2.19	0.005	2.35

### III. RESULTADOS

Los resultados finales al comparar los modelos constitutivos contra los resultados reales de laboratorio al hacer uso de los parámetros de tablas I, II y III en PLAXIS.

En la Fig. 8 se presenta la prueba triaxial inalterada. Se puede observar que tanto Cam Clay como Hipoplasticidad presentan resultados cercanos a la realidad. Mohr-Coulomb presenta la falla en un valor muy cercano al esfuerzo del estado crítico, pero su tramo elástico no corresponde con la realidad. Además la falla se presenta en una deformación menor que la real.



En la Fig. 9 se presenta la prueba triaxial de muestra densa. Se observa que Cam Clay Modificado no simula el pico que se forma debido a la sobre-consolidación de suelo, pero si llega al estado crítico (después de deformaciones grandes), Mohr-Coulomb solo presenta la falla en el punto del pico pero después debido a sus limitantes, al seguir deformándose no tiende hacia el estado crítico sino que se mantiene constante en el punto de falla. El modelo de Hipoplasticidad si presenta un comportamiento más acorde a la realidad ya que simula el pico (debido a sobre-consolidación), pero al aumentar la deformación el valor de esfuerzo cae por debajo del estado crítico (representado por Cam Clay Modificado). Debido a que prueba triaxial solo se llego a una deformación baja, se infiere que el valor del estado crítico real, tendría que corresponder al de la muestra inalterada.

En la Fig. 10 se presenta la prueba de consolidación de muestra suelta. Con respecto a la prueba de consolidación de muestra suelta, es obvio las diferencias que presentan los modelos al compararlos con las prueba de laboratorio. Cam Clay Modificado si presenta la curvatura de la prueba de laboratorio pero está desplazada en el eje de deformación. Hipoplasticidad y Mohr-Coulomb no presentan curvatura, pero el último esta más alejado de los resultados reales. Ambos modelos muestran un comportamiento elástico.

Fig. 8 Simulación de prueba triaxial inalterada (Prueba 2, Fig. 2).

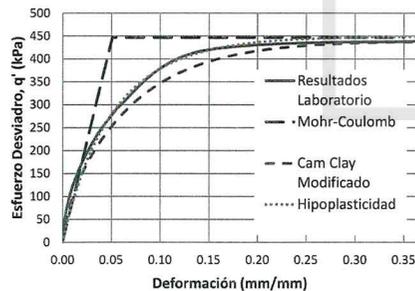
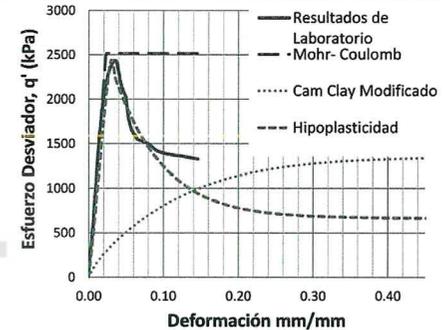


Fig. 9 Simulación de prueba triaxial remoldeada densa (Prueba 3, Fig. 3).



En la Fig. 11 se presenta la prueba de consolidación de muestra densa. Al comparar los modelos con las pruebas de laboratorio se puede observar que Cam Clay y Mohr-Coulomb están lejos de la realidad; ambos demarcan un límite suelto y rígido respectivamente. Hipoplasticidad se acerca más a los resultados de laboratorio en este caso.

En la Fig. 12 se presenta la prueba de consolidación carga-descarga de la muestra suelta. Al comparar los modelos se concluye que ninguno se acerca exactamente a la realidad. El que más se acerca es Hipoplasticidad pero solo en el tramo inicial (posiblemente debido a que valores de  $h_s$  y  $n$  dependen de rango de esfuerzos escogido), luego a esfuerzos más elevados se aleja de la realidad, además los tramos de carga y descarga presentan cambios de deformación. En cuanto a Cam Clay Modificado, este representa bien la forma de la grafica de laboratorio (incluyendo tramos de carga y descarga) pero esta desplazada en el eje de deformación. Mohr-Coulomb debido a sus limitantes solo está representado por una línea inclinada y es incapaz de simular tramos de carga y descarga debido a que solo tiene tramo elástico y plástico (falla) y llegado a ese punto se mantiene constante..

Fig. 10 Simulación de prueba consolidación suelta (Prueba 2, Fig. 4).

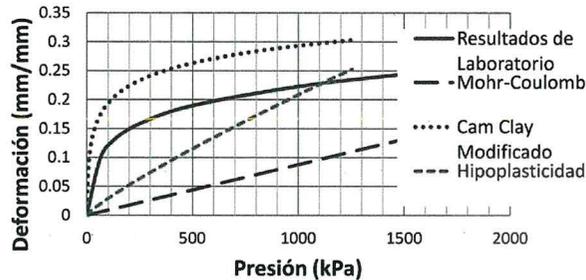
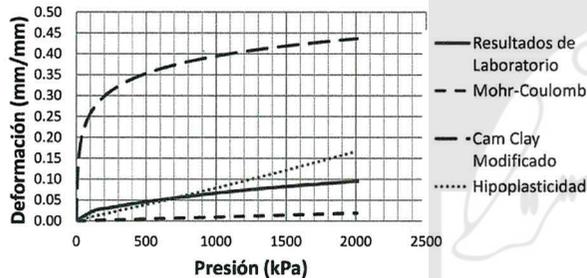


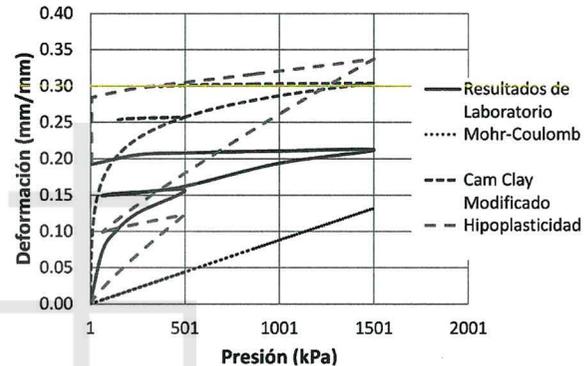
Fig. 11 Simulación de prueba consolidación densa (Prueba 1 Fig. 5).



#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tierra Blanca Joven (TBJ) es uno de los estratos que más problemas provoca en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), constantemente hay afección en las zonas urbanas debido a la erosión, movimientos de ladera, asentamientos y colapso que popularmente se engloban en el término "cárcavas". Dicha problemática está relacionada

Fig. 12 Simulación de prueba consolidación carga-descarga (Prueba 2 Fig. 6).



con el poco conocimiento de las propiedades y comportamiento de dicho material y de los otros estratos geológicos presentes.

Con los resultados obtenidos se concluye que el modelo Mohr-Coulomb que es el que se usa en los diseños geotécnicos dentro del AMSS no emula los resultados reales obtenidos en laboratorio para TBJ. Mohr Coulomb solo es recomendado para diseños preliminares o para tener estimaciones preliminares.

El modelo de Hipoplasticidad presenta buenos resultados para las pruebas de triaxial (aunque en caso de la muestra densa, al aumentar la deformación el esfuerzo queda por debajo del estado crítico). En cuanto a las pruebas de consolidación presenta ciertas deficiencias.

Es importante buscar un modelo que se adecue al comportamiento de nuestros suelos, una posibilidad sería continuar en busca de modelos existentes tales como Hipoplasticidad para arcillas y para suelos parcialmente saturados, hasta encontrar un modelo que se asemeje



a la realidad de nuestros suelos. Para encontrar dicho modelo, es necesario investigación con equipo de laboratorio adecuado (triaxial, consolidometro y caja de corte para suelos parcialmente saturados).

En El Salvador durante las dos estaciones del año (verano y temporada de lluvias) el nivel de las aguas subterráneas en las zonas urbanas se mantiene a 35 m de profundidad [2], esto significa que la mayoría de los suelos en el país son parcialmente saturados (presencia de agua, aire y suelo) y hay fuerzas capilares que actúan sobre la estructura del suelo haciendo que una "cohesión aparente" o succión incremente la resistencia del suelo, la cual desaparece cuando es saturado o debido a terremotos/vibraciones. Pero también hay posible incidencia de minerales cementantes los cuales podrían ser arcillas, sulfatos y silicatos. Es necesario investigar más acerca de estos componentes y su incidencia en la estabilidad de los taludes.

Pruebas de cambio de volumen (empíricas y de carácter preliminar) fueron realizadas en 3 muestras de la unidad G de caída de TBJ; haciendo uso de prismas rectangulares con volumen conocido. Los prismas se rellenaron con suelo compactado a 35% de humedad y se colocó en horno a 110° por 24 horas, observándose una reducción de longitud (en cara de mayor longitud) de aproximadamente de 1.2 mm. Luego se humedecieron al mismo contenido humedad y se observó hinchamiento en parte superior. Fueron 3 ciclos de humedecimiento y secado. Esto indica la importancia de investigar los diferentes minerales que componen TBJ y que pueden incidir en el tipo de falla o colapso observado.

Actualmente existe la tendencia a culpar de los daños experimentados en el AMSS solo al cambio climático (el cual sin duda alguna ha contribuido a incrementar la problemática), pero en realidad en El Salvador los conocimientos básicos de geología, geomorfología, hidrogeología, geotecnia, tectónica, sismología, dinámica de suelos entre otros son demasiado exiguos. Esto ha provocado que se urbanicen zonas sin tomar en cuenta como se verá afectada por el medio ambiente, o como la obra afectará el medio ambiente. Siendo ineludible la actualización del

conocimiento básico de las ciencias de la tierra y de la ingeniería geológica, lo cual de realizarse permitiría diseñar obras más seguras y duraderas. Las Universidades tienen que tener un rol protagónico en estos aspectos, de manera que profesionales activos y futuros puedan incorporar en los diseños y obras de mitigación los conocimientos más actuales sobre estos materiales geológicos y que correspondan a la realidad nacional.

## V. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen apoyo recibido por parte de Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), Universidad de El Salvador (UES), Aida Santana de Zamora de Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN) en (UES), Laboratorio Suelos & Materiales, Cesar Elías, Edgar Peña, Jesús Guerrero y a Walter Hernández. Agradecemos a las personas que revisaron este artículo, cuyos comentarios mejoraron su calidad.

En memoria de Lorena Molina.

## VI. REFERENCIAS

- [1] W. Hernández, "Características Geotécnicas y Vulcanológicas de las tefras de Tierra Blanca Joven, de Ilopango, El Salvador," Tesis Maestría, Universidad Politécnica de El Salvador, 2004.
- [2] R. Rolo, J. Bommer, B.F. Houghton, J.W. Vallance, P. Berdousis C. Mavrommati y W. Murphy, "Geologic and Engineering Characterization of Tierra Blanca Pyroclastic Ash Deposits," Geological Society of America, Special Paper 375, pp. 55-67, 2004.
- [3] M.A. Guzmán y E. Melara, "Propiedades ingenieriles del suelo del Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador," Revista ASIA, 122, pp. 14-22, 1996.
- [4] C.A. Amaya y Hayem E.A., "Introducción al estudio de suelos parcialmente saturados e inicio de la caracterización de la tierra blanca del AMSS". Trabajo de graduación para optar al grado de ingeniero civil en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", 2000.

- [5] B.M. Molina, G.N. Pérez y M.E. Vásquez, "Caracterización geotécnica de las tefras Tierra Blanca Joven: unidad "G" en la zona proximal y obras de protección". Trabajo de graduación para optar al grado de ingeniero civil en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", 2009.
- [6] Avalos J.R. y R.M. Castro, "Caracterización geológica y geotécnica de la unidad "G" de Tierra Blanca Joven". Trabajo de graduación presentado para optar al grado de ingeniero civil en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", 2010.
- [7] N. A. Ascencio y D.E. Zúñiga, "Tierra Blanca Joven: caracterización geológica y geotécnica de la unidad "D"". Trabajo de graduación presentado para optar al grado de ingeniero civil en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", 2010.
- [8] S. Chamra, J.A. Chavez, W. Hernández, J. Lexa, J. Schröfel, J. Šebesta y J. Valenta, "Estudios especiales de reconocimiento de las condiciones geológicas para la reducción de los riesgos naturales en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador". Reporte abierto OPAMSS 2010.
- [9] J.A. Chávez, W. Hernandez y L. Kopecky, "Problemática y conocimiento actual de las tefras Tierra Blanca Joven en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador" Revista Geológica de América Central, 47,117-132, 2012.
- [10] C.W. Ng y B. Menzies, *Advanced unsaturated soil mechanics*, UK: Taylor & Francis, 2007, p.712.
- [11] E. Murray y V Sivakumar, *Unsaturated soils: A fundamental interpretation of soil behavior*. London: Wiley-Blackwell, 2010, p. 304.
- [12] PLAXIS, "Material model manual," 2012.
- [13] D. M. Potts y L. Zdravković, *Finite element analysis in geotechnical engineering-theory*. London: Thomas Telford Publishing, 1999, p.448.
- [14] R. F. Craig, *Craig's soil mechanics*, 7a ed. London: Taylor and Francis, 2004, p. 464.
- [15] J. Atkinson, *The mechanics of soils and foundations*, 2a ed. New York: Taylor & Francis, 2007, p. 480.
- [16] I. Herle, y G. Gudehus, "Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies," *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 5(4), pp. 461–486, 1999.
- [17] K. Anaraki, "Hypoplasticity Investigated Parameter Determination and Numerical Simulation" Master of Science Thesis in Geotechnical Engineering at Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 2008.
- [18] O. Ayala, "Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de Tierra Blanca Joven (TBJ), unidad G, Trabajo de graduación para optar al grado de ingeniero civil en la Universidad El Salvador, a ser publicado.

## VII. BIOGRAFÍAS

**José Alexander Chávez H.** nació en San Salvador, el 5 de abril de 1977. Se graduó como ingeniero civil de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" en 2004.

Su experiencia laboral incluye la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador donde ha participado en proyectos de geomorfología, geología, ingeniería geológica y amenazas naturales. Actualmente es doctorante en depto. de Geotecnia en la Universidad Técnica Checa en Praga.

**Oscar Edgardo Ayala Valdez**, nació en el municipio de la Libertad, departamento de La Libertad, El Salvador, el 09 de octubre de 1987. Egresado de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador (2012). Autor de trabajo de graduación "Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de Tierra Blanca Joven (TBJ), unidad G".

**José Miguel Landaverde Q.** nació en San Rafael departamento de Chalatenango, el 26 de octubre de 1942, graduado de Ingeniero Civil, en La UES en 1976.



Su experiencia laboral incluye El ITCA, (1976-1997) y UES (1997 a la fecha) desempeñando los cargos de docente de topografía, mecánica de suelos, cimentaciones, mezclas asfálticas, tecnología del concreto y Jefatura de Laboratorios. Actualmente es jefe de Departamento de Geotecnia.

**Lesly E. Mendoza M.** nació en el departamento de la Libertad el 1 de abril de 1971, graduada de Ingeniero Civil, de la UES, en 1995; obtuvo el título de Máster en Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones en España en 2002.

Su experiencia laboral incluye docencia en ingeniería de materiales, concreto, cimentaciones, mezclas asfálticas. Pertenece a la Sociedad Salvadoreña de Geotecnia, siendo socia fundadora

**Elizabeth Torio Henríquez** nació en Filipinas y estudió su B.S y M.S in Geología en la Universidad de Filipinas.

Su experiencia laboral incluye Philippine Geothermal Inc. (hoy Chevron), Universidad de Filipinas, Ministerio de Energía en Filipinas, CEL y Lageo con su campo de interés de especialización de petrología, petrografía y geoquímica.

**Reynaldo Adalberto Lopez Landaverde**, nació en 1968, en el departamento de Chalatenango, El Salvador. Se graduó en Ingeniería Agrícola de la Universidad de El Salvador, realizó sus estudios de Doctorado en la Universidad Politécnica de Madrid, con especialidad en maquinaria, suelos y energías alternativas.

Su experiencia laboral es de 21 años en la docencia e investigación en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.