



Uso de Curva de Retención Suelo-Agua y Monitoreo en Campo para Caracterizar Tefra Parcialmente Saturada en Área Metropolitana de San Salvador.

Chávez, J. A. doctorante ČVUT, técnico OPAMSS, López, R. docente UES, Landaverde, J. docente UES y Mendoza, L. E. docente UES.

Abstract— Se realizaron pruebas de laboratorio y campo para obtener la Curva de Retención Suelo-Agua (contenido de humedad o saturación versus succión) la cual sirve para obtener las funciones de propiedades de suelos parcialmente saturados tales como cambio de volumen, esfuerzo cortante y conductividad hidráulica. Dentro de las pruebas de laboratorio para medir la succión (papel filtro y olla de presión) la primera mostro resultados aceptables en casi todo el rango de medición de succión. Además que se puede obtener la succión matricial y total. Sin embargo no es un método directo siendo necesario seguir el protocolo adecuado. También se hizo monitoreo con equipo tensiómetro y TDT (Time Domain Transmission) dentro de área de estudio para conocer cambios de succión y humedad en el tiempo observándose ciertas diferencias dependiendo de granulometría, cobertura, topografía y ubicación. Resultados de campo indican que taludes se saturan principalmente en su superficie, indicando importancia de investigación.

Índice de términos— *Succión, Tierra Blanca Joven, papel filtro, tensiómetro, olla de presión, monitoreo, humedad.*

I. INTRODUCCIÓN

Desde 1936, con la “Primera Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones” se ha mostrado interés en el comportamiento de los suelos ubicados tanto arriba como abajo del nivel freático (parcialmente saturados y saturados respectivamente) construyéndose desde ese entonces las bases de la Mecánica de Suelos [1]. Sin embargo en un inicio, las primeras investigaciones se centraron más en los suelos saturados debido a que estas se hicieron en zonas donde el clima es fresco o húmedo, donde la zona vadosa o parcialmente saturada está relativamente cerca de la superficie; a esto se le suma que, para los suelos parcialmente saturados ha tomado mayor tiempo desarrollar la tecnología adecuada para medir sus parámetros, proponer mitigación, así como, entender su comportamiento en campo y en laboratorio. Pero debido a que las obras civiles en gran parte del mundo (zonas áridas y semiáridas) están construidas sobre suelos parcialmente saturados y a la cantidad de problemas que presentan, los cuales son bastante onerosos, se han hecho avances importantes hasta la fecha. En la referencia [2] llamaron a este tipo de suelos el “desastre escondido”, porque en los Estados Unidos durante los años 70 y 80, miles de millones de dólares se perdieron relacionados con daños a la infraestructura construida sobre estos materiales geológicos.



El estado de esfuerzos para un suelo saturado fue definido por Terzaghi como el esfuerzo efectivo $\sigma' = \sigma - u_w$ lo cual es válido solamente cuando el suelo está completamente saturado o completamente seco.

En los suelos parcialmente saturados (presencia de agua, aire y suelo) 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 [3].

Para los suelos parcialmente saturados [2] se definen el uso de dos conjuntos de variables independientes de esfuerzo (las cuales son las más usadas):

El esfuerzo neto: $\sigma - u_a$

La succión matricial: $u_a - u_w$

Donde σ es el esfuerzo total, u_w es la presión de poros de agua y u_a es la presión de poros de aire.

La succión matricial es definida como estado de energía libre del agua del suelo [4] y es la responsable de incrementar la resistencia a cortante en los suelos parcialmente saturados. Está relacionada principalmente a la capilaridad, pero también está influenciada por los efectos de absorción de superficie. La succión total es la suma de la succión matricial y osmótica [2], [4]. La succión osmótica es la diferencia de concentraciones de sal de agua de poro en el sistema analizado y el agua que lo rodea [2].

El nivel freático en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) está a 30-200 m aproximadamente [5]-[6] esto hace necesario hacer uso de la mecánica de suelos parcialmente saturados. Existen trabajos donde se ha estudiado el comportamiento y obtenido algunos parámetros de la tefra Tierra Blanca Joven (TBJ) (especialmente de la Unidad G) [3]. Los resultados de cohesión y ángulo de fricción son reportados usualmente, pero se observa dispersión en los resultados [7]. Dichos autores concluyen que si una muestra (no alterada o alterada) es saturada, hay una disminución de la resistencia al corte, si se compara con una muestra de humedad natural. Estas diferencias están conectadas con el estado de esfuerzos, la unidad estudiada, su facie, presencia de cementante y al contenido de humedad.

La TBJ es el suelo más estudiado, debido a que el Área Metropolitana de San Salvador yace sobre estos depósitos (producto de la última erupción pliniana de la Caldera de Ilopango). Dichos depósitos son bastantes problemáticos debido a la erosión, movimientos de ladera, colapso, licuefacción y asentamientos, popularmente englobados como el término "cárcava".

Normalmente, en El Salvador todos los diseños geotécnicos de suelos utilizan el círculo de esfuerzos de falla de Mohr-Coulomb para la obtención de los parámetros de los materiales de la cohesión "c" y el ángulo de resistencia al corte " ϕ " haciendo uso de la caja de corte o equipo de triaxial (equipo para suelos saturados). Aunque también se ha abusado de correlaciones para obtener estos parámetros, haciendo uso de información obtenida con SPT.



En la referencia [8] se concluyó que el modelo Mohr-Coulomb que es el que se usa en los diseños geotécnicos en El Salvador no emula los resultados reales obtenidos en laboratorio para TBJ. Mohr-Coulomb solo es recomendado para diseños preliminares o para tener estimaciones preliminares. Otros modelos constitutivos como Cam Clay Modificado e Hipoplasticidad dieron mejores resultados pero también presentan deficiencias. Por lo que es importante buscar un modelo que se adecue al comportamiento de suelos del país, hasta encontrar un modelo que se asemeje a la realidad.

Uno de los objetivos de la investigación que se presenta a continuación es iniciar la caracterización y comprender comportamiento de estos suelos por medio de pruebas de laboratorio y monitoreo geotécnico. La caracterización se puede por medio del uso de la Curva de Retención Suelo-Agua (CRSA), también conocida como Curva Característica Suelo-Agua [3]. La CRSA relaciona cambios de contenido de agua gravimétrica, contenido de agua volumétrica o saturación de un suelo con la succión matricial (fuerzas capilares).

Las propiedades de esfuerzo cortante, cambio de volumen y coeficiente de permeabilidad de un suelo pueden ser obtenidos con la CRSA junto a las propiedades en su estado saturado. Es importante mencionar que a diferencia de los suelos saturados, el coeficiente de permeabilidad para suelos parcialmente saturados no es constante y varía considerablemente dependiendo de la succión matricial y estado de esfuerzos [1].

La infiltración de las aguas lluvias dentro de la zona parcialmente saturada arriba del nivel freático [7] es un

problema típico de flujo de frontera en donde tienen que ver las características de suelo-agua y la permeabilidad de los suelos parcialmente saturados. Estas propiedades hidráulicas son las que controlan la profundidad y tasa de infiltración dentro de la ladera o talud, lo cual afectara los cambios en la presión de poros de agua y la estabilidad de la ladera o talud durante la lluvia. Por tanto el inicio de monitoreo en algunos taludes dentro del AMSS con equipo ayudara a verificar si las suposiciones que se hacen durante el diseño están acordes con la realidad [9].

II. METODOLOGÍA

Durante el periodo del 2013-2014 se ha monitoreado la humedad y succión de sectores con TBJ del AMSS para conocer su comportamiento y obtener la CRSA. Además se han realizado pruebas de laboratorio para medir succión y humedad haciendo uso de métodos como el papel filtro y olla de presión [3]; en campo se ha usado el tensiómetro. Además, se ha monitoreado con un equipo TDT (Time Domain Transmission) prototipo para conocer los cambios de humedad y temperatura en TBJ (es necesario construir curva de calibración). Trabajo ayudara a comprender el comportamiento, así como características de la tefra y su interacción con el medio ambiente y otros factores externos.

Algunas propiedades de TBJ, tales como colapsabilidad y mineralogía ya han sido resumidas por otros autores [3], [7]-[8]. Los puntos monitoreados en el AMSS se muestran en Fig.1 correspondiendo a taludes de poca altura < 10 m. Las unidades de TBJ que fueron monitoreadas fueron D, F y G debido a que son las más superficiales.

Las curvas granulométricas de los estratos revelan que se trata de un limo arenoso/arena limosa (Fig.2). Según los resultados obtenidos en los ensayos de límite líquido y plástico, éste suelo no presenta plasticidad.

El contenido de humedad gravimétrica de TBJ durante el tiempo del marco de esta investigación estuvo entre 2% y 42%, que es parecido a los resultados reportados por otros autores [3], [7]-[8]. La gravedad específica para TBJ fue entre 2.25-2.5 y la relación de vacío 0.6-1.6, correspondiente a porosidades promedio de 37.5-61.53% [6], [10]. La densidad aparente varía entre 0.85-1.17 g/cm³.

A. Trabajo de Laboratorio

Pruebas para obtener succión versus contenido de humedad de los puntos 1(unidad G y D) y 2 (Unidad G) de Fig.1 fueron elaboradas haciendo uso de papel filtro y olla de presión (esta última solo para el punto 1).

Una explicación breve se presentara a continuación ya que dichas pruebas han sido resumidas por [3].

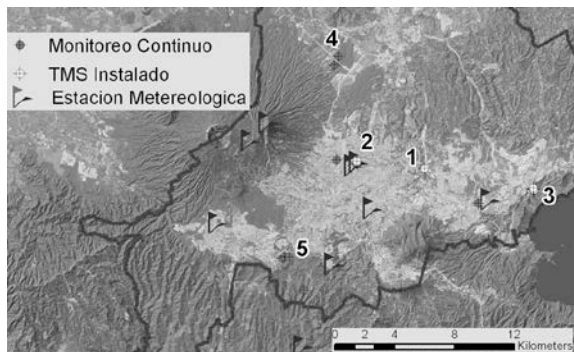


Fig. 1 Puntos monitoreados dentro del AMSS

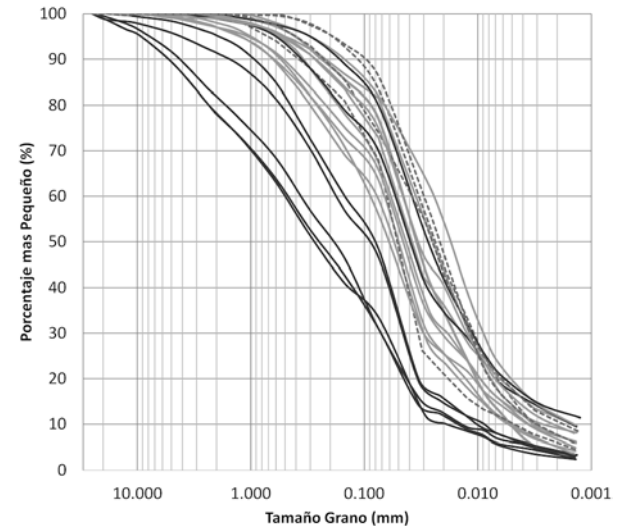


Fig. 2 Resultados de granulometría para las unidades de TBJ monitoreadas

El esquema de la olla de presión se presenta en la Fig. 3 y consiste en colocar dentro de olla de presión el suelo (repartido en 10 anillos de retención de 5 cm de diámetro y 1 cm de altura para cada succión obtenida) sobre platos cerámicos de 100 kPa, que es más poroso para succiones bajas y 300 kPa para succiones elevadas. No se pudo usar platos cerámicos de 1,500kPa debido a que no se tuvo acceso a un compresor de aire adecuado. Antes de colocar anillos de retención con suelo, el plato de cerámica se tiene que saturar, buscando que se tuviera un buen contacto entre el suelo y plato de cerámica. Después el plato se deja dentro de olla de presión hasta que el suelo este saturado. Al lograr esto se sella la olla de presión con los pernos y se aplica una presión elegida (succión matricial) y

se espera el tiempo suficiente para llegar al equilibrio. El tiempo de equilibrio puede variar entre algunas horas hasta dos días, dependiendo de la succión impuesta. El equilibrio se alcanza hasta que no sale más agua del tubo de salida de la olla de presión. Luego se obtiene el contenido de humedad de las muestras de suelo. Para valores de succión bajos (< 10 kPa cerca de saturación) se recomienda usar los valores de la olla de presión a los obtenidos con el papel filtro.



Fig. 3 Esquema de olla de presión y fotos de laboratorio (Chavez et al. 2013).

Con el papel filtro se puede medir la succión total (método sin contacto) y la matricial (método de contacto). Se hizo uso de la metodología sugerida por el ASTM D 5298, resumida en [1]. El papel filtro (Fig. 4) se intercala entre dos papeles filtros más

grandes que sirven para evitar contacto directo con suelo. Después este arreglo se inserta en medio de suelo en un contenedor de vidrio y se sella. Para la succión matricial es necesario que exista un buen contacto entre el suelo y el papel filtro. Los contenedores de vidrio se colocaron en una hielera en un lugar con temperatura controlada hasta alcanzar equilibrio por 10 días (14 días para succión total). Pasado este tiempo se obtiene el contenido de humedad de cada papel filtro y la succión se obtiene con curvas de calibración existentes para el papel filtro usado (Whatman No. 42, tabla I). Con el papel filtro se obtuvieron valores elevados de succión ($> 20,000$ kPa).

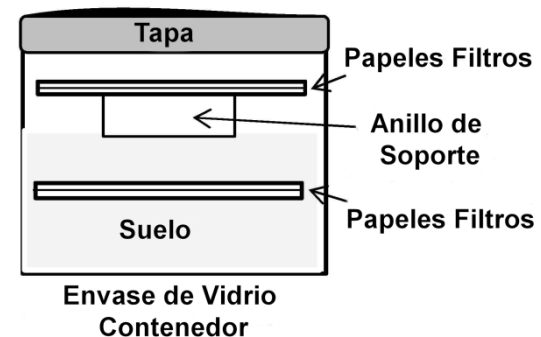


Fig. 4 Esquema de prueba de papel filtro (Chavez et al. 2013)

B. Trabajo de campo

Una medición directa y rápida de la succión matricial se puede obtener con el tensiómetro Quickdraw, el cual es independiente del tipo de suelo, salinidad o temperatura. El agua se mueve entre el reservorio de agua del tensiómetro y el



suelo, por medio de sensor de cerámica porosa hasta que se llega al equilibrio entre las presiones de agua [11]. El rango de lectura practica del tensiómetro esta entre 0 kPa (saturado) hasta 77.5 kPa y 74 kPa para elevaciones (arriba del nivel del mar) de 600 m y 900 m respectivamente. Siendo importante tomar en cuenta, al igual que los otros métodos un buen contacto con el suelo, evitar la cavitación y saber interpretar cuando se hace una buena lectura [11]-[12].

Hoy en día para el monitoreo de contenido de humedad se hace uso de métodos dieléctricos debido a que pueden medir todo el rango posible, asimismo son métodos no destructivos [11]

TABLA I
ECUACIONES DE CALIBRACIÓN PARA PAPEL FILTRO DE
DIFERENTES AUTORES. W= CONTENIDO DE HUMEDAD
GRAVIMÉTRICO; Ψ =SUCCIÓN (KPA)

Referencia	Succión	w(%) rango	Log10 (succión) (kPa)
Chandler et al. (1992)	Matric	w < 47	4.842-0.0622w
Chandler et al. (1992)	Matric	w > 47	6.050-2.48 Log w
Oliveira & Marinho (2006)	Matric and Total	w < 33	4.83-0.0839w
Oliveira & Marinho (2006)	Matric and Total	w > 33	2.57-0.0154w
Leong et al. (2002)	Matric	w < 47	4.945-0.0673w
		w > 47	2.909-0.0229w
Leong et al. (2002)	Total	w < 26	5.31-0.0879w
		w > 26	8.778-0.222w

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de los métodos dieléctricos se puede mencionar a TDR (Time Domain Reflectometry), FDR (Frequency Domain Reflectometry), ADR (Amplitude Domain Reflectometry), TDT (Time Domain Transmission), sondas de capacitancia y FDR-V (Frequency Domain Eeflectometry with Vector Network Analyzer) [13]. Para el monitoreo en el AMSS se hizo uso de un equipo TDT cuyas guías de ondas electromagnéticas están confinadas en un material de moldeo epóxico que permite insertarlo en el suelo [14]. Debido a esto es necesario obtener una curva de calibración que relacione el valor que da equipo con el contenido de humedad real de la tefra.

En la Fig. 5 se muestran el monitoreo en un talud de TBJ y los resultados de calibración de campo para el equipo TDT.

La información climática fue compilada de la red de estaciones meteorológicas del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Siendo usada la información de las estaciones Ilopango y Belloso ya que la estación UES, presento malfuncionamiento durante parte del periodo de monitoreo.

III. RESULTADOS

En las Fig. 6-8 se presentan los resultados de papel filtro (Tabla I), olla de presión y tensiómetro de los puntos 1 y 2 de Fig. 1.

La CRSA de los suelos parcialmente saturados difiere si suelo se está secando o saturando debido a histéresis [2]. Ambas curvas tiene una forma similar, pero los valores en el punto inicial de la curva de secado (aumento de succión) son diferentes que los puntos finales de la curva de saturación (disminución de succión). Esto debido al atrapamiento de aire en el suelo. La técnica de papel filtro usada fue de saturación y la de olla de presión de secado. Para problemas de infiltración se recomienda usar la CRSA de saturación y la de secado para

problemas de evaporación [15]. Las grietas y fisuras en el campo pueden incrementar la permeabilidad estimada con CRSA. La comparación de resultados de succión matricial obtenidos con tensiómetro en laboratorio y campo de las diferentes unidades de TBJ indican la histéresis mencionada anteriormente, debido a que procesos de saturación y secado se llevaban a cabo al hacer monitoreo.

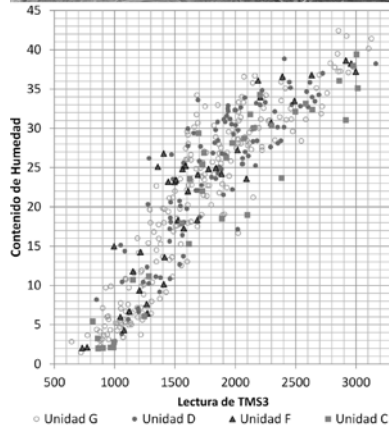


Fig. 5 Arriba monitoreo con tensiómetro (izq.) y TDT (der.) en salud de TBJ. Abajo resultados de calibración de campo de todos los puntos y unidades de TBJ de puntos de Fig. 1.

Para el papel filtro la ecuación que muestra resultados más cercanos a los del tensiómetro (saturación) es la ecuación de Leong et al. (2002) la cual diferencia sus ecuaciones de calibración en succión total y matricial. Otros autores como Oliveira & Marinho (2006) y ASTM D 5298 usan la misma ecuación para obtener ambas succiones.

Fig. 6 CRSA de unidad G de punto 1 Fig. 1. Para esta muestra aparte del papel filtro y tensiómetro se usó también olla de presión.

Fig. 7 CRSA de unidad D de punto 1 Fig. 1. Para esta muestra se usó papel filtro y tensiómetro

Fig. 8 CRSA de unidad G de punto 2 Fig. 1. Para esta muestra se usó papel filtro y tensiómetro

En Fig. 9 se presentan los resultados de CRSA de laboratorio y campo para los lugares estudiados con mayor detalle. Incluyendo resultados de succión total (lo cual se hizo para conocer incidencia de succión osmótica en estabilidad de taludes).

Resaltan las diferencias entre los resultados obtenidos al usar las ecuaciones de succión total de Leong et al. (2002), Haguigui (2011) y Oliveira & Marinho (2006), lo cual podría crear problemas de sobre-estimación. Según [16] la curva de calibración de succión total no es muy sensible a succiones menores a 100 kPa. Resultados de conductividad hechos para diferentes unidades de TBJ de los puntos monitoreados demarcan que es un suelo no-salino.

En algunas áreas de los taludes hay sales visibles (pero solo como una costra) y no son homogéneas en toda la superficie del talud. Según [10] epsomita y yeso son los minerales secundarios principales en la costra de sales que se forma en TBJ, lo cual podría actuar como un cementante.

Es necesario hacer más estudios a detalle de la succión total y osmótica haciendo usos de equipo adecuado como conductividad eléctrica de agua de poro extraída usando exprimidor de fluidos, psicrometros y la técnica de equilibrio de vapor [4].

El tensiómetro no es capaz de medir la succión osmótica subestimando su importancia, pero puede servir para ir construyendo criterios para la alerta temprana.

En la Fig. 10 se muestran los resultados de contenido de humedad de la superficie de taludes con TBJ monitoreados.

Se nota que los meses de enero a junio la tefra tiene poca humedad hasta estar casi seca. Los restantes meses la tefra muestra una humedad mayor al 20% hasta estar saturada.

Destaca el hecho de que en la zona cercana (Punto 5 de Fig. 1) a la Cordillera del Bálsamo los niveles de humedad fueron más altos e incluso se mantuvieron arriba del 20 % en verano cuando en los demás taludes eran < 10%. Además, la unidad D de casi todos los puntos monitoreados tiende a guardar más humedad y por más tiempo. Influyen en el contenido de humedad diferentes aspectos tales como la topografía de talud, granulometría, usos de suelo, vegetación, cubierta y clima.

Para los diseños geotécnicos finales [3] se recomienda usar experimentos de medición directa (triaxial, caja de corte, consolidometro y anillo de corte para suelos parcialmente saturados) y los experimentos de medición indirecta (obtención de CRSA). Siendo esta última alternativa la que se propone para

El Salvador debido a que puede ser introducida más rápidamente y simplemente.

Para diseño geotécnico preliminar las pruebas de clasificación (granulometría) y el uso de bases de datos de suelos pueden ser usados. Pero al comparar los resultados obtenidos contra los resultados reales se recomienda precaución al usar estas simplificaciones.

El uso de la CRSA dentro de los programas de elementos finitos puede ayudar a obtener el esfuerzo cortante, cambio de volumen y coeficiente de permeabilidad. El software Plaxis usa la CRSA para describir los parámetros hidráulicos del flujo subterráneo en zonas parcialmente saturadas. Además también es posible escoger el modo de cálculo avanzado donde el grado efectivo de saturación depende de la CRSA, produciendo diferentes resultados si se compara con el modo clásico (esfuerzo de Terzaghi) [3].

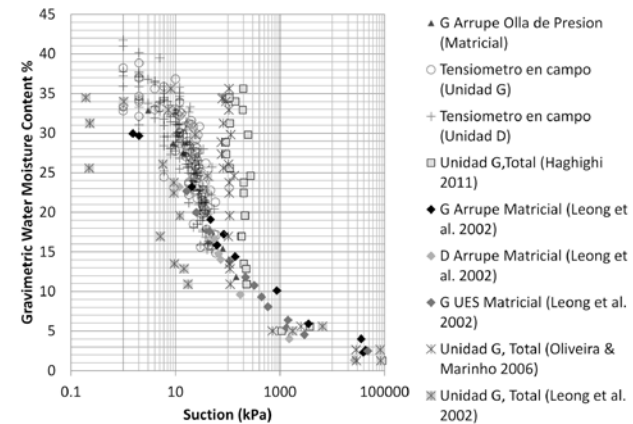


Fig. 9 CRSA de unidades estudiadas con mayor detalle en campo y laboratorio, incluyendo datos de tensiómetro de todas unidades G y D de campo

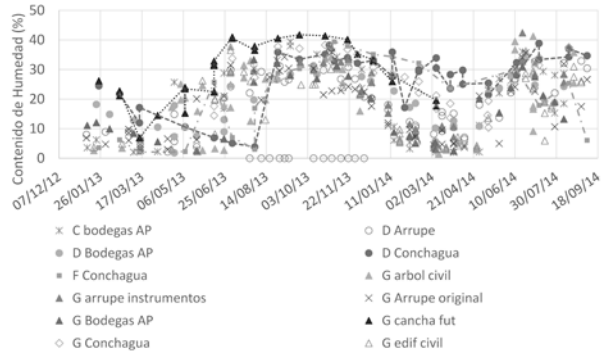


Fig. 10 Contenido de humedad de superficie de taludes. Con líneas están señaladas unidades D y F de punto 5 de fig. 1 donde la cantidad de humedad no disminuyo como en otros lugares

El software de de Soilvision también toma en consideración las propiedades parcialmente saturados de los suelos y tiene métodos para estimar la CRSA (si no hay datos experimentales), propiedades hidráulicas y el estudio de esfuerzo cortante de suelos parcialmente saturados. Además puede simular la relación entre precipitación, evaporación potencial/real en la estabilidad de los taludes [3].

El software Geoslope también toma en consideración las propiedades de los suelos parcialmente saturados usando la CRSA mediante diferentes métodos. Hay diferentes métodos para obtener la función de la CRSA, conductividad hidráulica y esfuerzo cortante. Asimismo se puede simular lluvias y evapotranspiración en la estabilidad de los taludes.

El software GEO5 usa diferentes modelos para el análisis de flujo en suelos parcialmente saturados. También es posible establecer el nivel freático incluyendo la succión [3].

En los resultados de monitoreo (Fig. 11) con TDT en punto 2 de Fig. 1 (los dos taludes están separados unos 150 m aproximadamente) se puede observar como la infiltración depende mucho de la topografía superficial de talud. Si el agua no tiene posibilidad de infiltrarse, debido a que se mueve como escorrentía superficial por la topografía; el talud puede pasar casi seco todo el año hidrológico y solo saturarse/secarse la superficie de manera recurrente debido a lluvias y evapotranspiración (TDT 09, superficial; TDT enterrados 04, 05 y 07). En cambio, en el talud con los TDT enterrados 06, 02 y 09 la humedad se mantuvo relativamente alta en tiempo de monitoreo (superficie de talud plana); siendo o teniendo la misma tendencia los TDT instalados superficialmente (16 cm) y el más profundo (60 cm). El periodo de grabación para el equipo instalado en campo TDT fue de 10 minutos (al igual que las estaciones meteorológicas empleadas).

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En El Salvador la mayoría de suelos esta en condición de saturación parcial, lo que significa que se tiene que actualizar métodos y equipos para su diseño y monitoreo. Esto implica que las universidades actualicen su pensum y su equipo de laboratorio. No es conveniente que se culpe de todos los problemas en calles, urbanizaciones e infraestructura, taludes y laderas solo al cambio climático, sino que se tiene que conocer el comportamiento y propiedades de los estratos que conforma la geología del territorio.

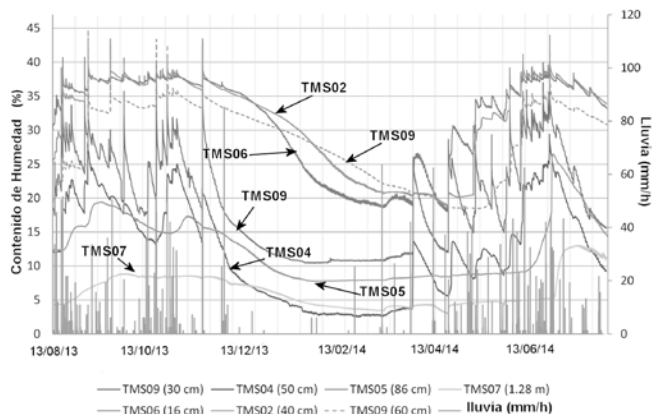


Fig. 11 Resultados de TDT instalados en la UES. Los TDT 07, 05, 04 y 09 fueron instalados en superficie de unidad F de TBJ (más gruesa) tipo domo que evito la infiltración. Los demás TDT fueron instalados en talud cuya superficie irregular y plana permitía el encharcamiento e infiltración en unidad G (más fina).

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 que podría estar en costra superficial, además de la incidencia de succión osmótica. Es necesario investigar más acerca de estos componentes y su incidencia en la estabilidad de los taludes.

Para suelos parcialmente saturados se puede obtener las propiedades de esfuerzo cortante, cambio de volumen y coeficiente de permeabilidad por medio de mediciones indirectas haciendo uso de la Curva de retención Suelo-Agua

(CRSA) y propiedades de suelo saturado. Estos procedimientos a pesar de ser aproximados [2] son adecuados y prácticos generalmente para el diseño de este tipo de suelos. Además los software geotécnicos de elementos finitos para estabilidad de taludes y deformación de suelo ya toman en cuenta estos aspectos para el diseño. En un futuro próximo se retomara la información de la CRSA de esta investigación para modelación y comparación contra la realidad en software de elementos finitos.

Se comprobó que el papel filtro es un método practico que mide succión total y matricial, pero es necesario tener cuidado usando el protocolo adecuado. Es importante profundizar más en el uso y obtención de curvas de calibración más adecuadas. Para el papel filtro la ecuación que muestra resultados más cercanos a los del tensiómetro (saturación) es la ecuación de Leong et al. (2002). Los equipos usados en campo (tensiómetro y TDT) dieron resultados satisfactorios, obteniéndose curvas de calibración en campo y en laboratorio con resultados aceptables a pesar de corresponder a diferentes unidades de Tierra Blanca Joven (TBJ) en diferentes lugares. El equipo TDT si puede medir todo el rango de humedad de los suelos, a diferencia del tensiómetro que puede llegar a medir hasta los 60-70 kPa.

Solamente el TDT fue instalado permanentemente en el campo y algunos flujos deslizantes fueron grabados durante investigación. Este equipo mostro buen comportamiento y es barato si se compara con otros registradores de datos y generalmente no es afectado por la salinidad y temperatura del suelo permitiendo recopilar lecturas por periodos de tiempo



largos (hasta 10 años) dependiendo del intervalo de medición escogido (1, 10 y 15 min). Al observar los resultados obtenidos se concluye de mejor manera como la topografía, uso de suelo y clima tienen incidencia en el contenido de humedad de taludes. Además equipo ayudó a identificar como la humedad varía en los diferentes sectores del talud, a veces sin llegar a saturación total.

Se recomienda que se investigue también sobre los modelos constitutivos para suelos parcialmente saturados ya que proporcionaría una medición directa de sus propiedades y pueden ser usados para diseño en software de elementos finitos.

Resultados de investigación pueden ayudar iniciar la actualización de conocimientos para la toma de decisiones de uso de suelo, recarga acuífera, alerta temprana y obras de mitigación entre otros.

V. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen apoyo recibido por parte de Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), Universidad Técnica Checa en Praga (ČVUT), Universidad de El Salvador (UES), Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Se agradece también a Cesar Elías, Jorge Henríquez, Edgar Peña, Evelio López, Carlos Morataya, Jan Schrofel, Martin Šanda, Tomáš Haase, Martin Šimral, Walter Hernández, Armando Chavez, Miriam Baires, Cecilia Martínez, Andrés, Daniel y Alexander Chávez Martínez.

Esta publicación es en memoria de Lorena Molina cuyas inquietudes, al igual que interés de Celina Cruz fue el inicio de esta investigación.

VI. REFERENCIAS

- [1] D. G. Fredlund, "Soil mechanics for unsaturated soils mechanics" en *Unsaturated soil engineering practice*, S. Houston y D. Fredlund, Ed. New York: American Society of Civil Engineers, 1997, pp 1-37.
- [2] D. G. Fredlund y H. Rahardjo, *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: Wiley-Interscience Publications, 1993, p. 510.
- [3] J. A. Chavez, R. Lopez, L. Kopecky y J. Landaverde, "Soil-Water retention curve and beginning of monitoring in Tierra Blanca Joven (TBJ)". *Revista Geologica de America Central*, vol 49, pp. 83-99, junio 2013.
- [4] E. Murray y V Sivakumar, *Unsaturated soils: A fundamental interpretation of soil behavior*. London: Wiley-Blackwell, 2010, p. 304.
- [5] M. Schmidt-Thomé, "The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America) a basis for city development and planning". *Geol Jb, Reihe B: Regionale Geologie Ausland*, vol. 13, pp 207–225, 1975.
- [6] 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.
- [7] J. A. Chavez, 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*, vol 47, pp 117–132, 2012.
- [8] J. A. Chavez, J. Landaverde, O. Ayala y L. Mendoza "Application of constitutive models in the volcanic tephra "Tierra Blanca Joven"". *Ingeniería* vol. 24 (2), pp 53-78, 2014.



- [9] D. NG, S. Springman y E. Alonso “Monitoring the performance of unsaturated soil slopes”. *Geotechnical and Geol. Eng.* Vol. 26 (6), pp 799-816, 2008.
- [10] 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.
- [11] A. Tarantino, A. Ridley y D. Toll, “Field measurement of suction, water content, and water permeability”. *Geotechnical and Geol. Eng.* Vol. 26(6) pp 751-782, 2008.
- [12] F. Marinho, W. Take, A. Tarantino Measurement of matric suction using tensiometric and axis translation techniques. *Geotechnical and Geol. Eng.* Vol. 26(6) pp 615-631, 2008
- [13] Jr. Blonquist, S. Jones, D. Robinson “A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics”. *Journal of Hydrology* Vol. 314 pp 235–245, 2005.
- [14] W. Qu, H. Bogen, J. Huisman, H. Vereecken. (2013). Calibration of a Novel Low-Cost Soil Water Content Sensor Based on a Ring Oscillator. *Vadose Zone J.*[Online] pp. 1-10. Disponible en: [http://tomst.com/tms/tacr/Qu_Calibration%20of%20water%20content%20sensor\(VZJ13\).pdf](http://tomst.com/tms/tacr/Qu_Calibration%20of%20water%20content%20sensor(VZJ13).pdf)
- [15] H. Rahardjo y E. Leong, “Soil water characteristic curves and flux boundary problems” en *Unsaturated soil engineering practice*, S. Houston y D. Fredlund, Ed, American Society of Civil Engineers, 1997, pp 88-112.
- [16] E. Leong, L. He y H. Rahardjo “Factors Affecting the Filter Paper Method for Total and Matric Suction Measurements”. *J Geotechnical Testing* Vol. 25 (3) pp 322–333, 2002.

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 la Universidad Técnica Checa en Praga.

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.

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.