



## Influencia del agrietamiento en la resistencia al corte de una arcilla de alta plasticidad

### Cracking influence in the shear resistance of a high plasticity clay

Chávez Negrete, Carlos<sup>1</sup> ✉ - Cervantes Navarro, David<sup>1-2</sup> - Arreygue Rocha, Eleazar<sup>1</sup> - Alarcón Ibarra, Jorge<sup>1</sup>

Recibido: 27 de Setiembre de 2012 • Aceptado: 09 de Abril de 2013

#### Resumen

*En la mecánica de suelos clásica, el suelo se toma como un continuo. Esta condición no siempre es válida, en un gran número de ocasiones el suelo en estado natural se ve afectado por grietas que afectan su comportamiento mecánico. En estos casos no se pueden obtener muestras inalteradas para realizar una caracterización mecánica, por lo que se deben reconstituir en el laboratorio muestras con el mismo peso volumétrico que en el campo, teniendo el inconveniente que no están agrietadas. Esto limita el entendimiento del comportamiento del suelo en estado natural y no se estima su resistencia adecuadamente.*

*En el presente artículo se describe una nueva técnica experimental para estudiar los suelos altamente plásticos y susceptibles al agrietamiento, sometidos a ensayos de corte directo. Se utilizó un suelo representativo de la zona de Morelia, ensayándolo a corte directo (consolidado no drenado) en condiciones sin agrietamiento, agrietamiento parcial y total. La técnica resultó adecuada y se pudo ver como el agrietamiento disminuye la cohesión y aumenta el ángulo de fricción interna. Además se observó que cuando el suelo se somete a esfuerzos normales pequeños, se propaga la grieta rápidamente impidiendo que se desarrolle la resistencia, y existe una falla súbita. Por último, los resultados se analizan tomando en cuenta sus consecuencias en la estabilidad de taludes.*

**Palabras Clave:** Resistencia al corte, Agrietamiento, Arcillas de alta plasticidad, Estabilidad de taludes.

#### Abstract

*In classical soil mechanics, soil is taken as a continuum. This condition is not always valid, in a number of occasions the ground in its natural state is affected by cracks that affect their mechanical behavior. In these cases cannot obtain undisturbed samples for mechanical characterization, therefore are usually reconstituted at the laboratory, samples with the volumetric weight of the field, with the drawback that they are not*

1. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

✉ cachavez@umich.mx

2. Posgrado en Infraestructura del Transporte, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

cracked. This limits the understanding of soil behavior *in situ* and not properly estimated its strength. This paper describes a new experimental technique for studying highly plastic soils susceptible to cracking under direct shear tests. It was tested a representative soil from Morelia, Mexico area, to direct shear (consolidated undrained) in conditions without cracking, crazing partial and total. It was developed a new technique to produce a partial and total crack taking care to alter as little as possible the sample. The technique was adequate and the results show that as cracking length increases, the cohesion decreases and increases the angle of internal friction. It was also observed that, when the soil is subjected to small normal stresses the crack propagates, avoiding the development of strength and sudden failure is presented. Finally the results are discussed taking into account their impact on slope stability.

**Keywords.** *Shear Strength, Cracking, Clays of high plasticity, Slope stability.*

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo consiste en conocer el comportamiento mecánico de un suelo arcilloso agrietado, mediante la obtención de la resistencia máxima y post-pico, utilizando el equipo de corte directo. El agrietamiento de las arcillas se forma de manera natural por expansiones y contracciones que se provocan con los cambios de contenido de humedad a lo largo del año; estas arcillas suelen ser rígidas y agrietadas (Duncan y Wright, 2005). Al paso de los años se establece un patrón de agrietamiento natural, que se establece como una condición de equilibrio.

Otro mecanismo en el cual se genera un agrietamiento natural es en los suelos residuales, en el cual el agrietamiento se hereda de los macizos rocosos que dieron origen al suelo, solo que en el suelo estas estructuras no son visibles a simple vista.

Las excavaciones en corte que se realizan en la construcción de carreteras o edificaciones en suelos agrietados, generan inestabilidades de los taludes como consecuencia de estas zonas de debilidad (Figura 1). De acuerdo a lo anterior son dos los mecanismos que propician o detonan la inestabilidad en arcillas agrietadas: el incremento de la presión de poro y la propagación de las fisuras existentes. El agrietamiento produce una permeabilidad secundaria alta (Rayhani et al 2008), como consecuencia se presentan aumentos repentinos de las presiones de poro. Las grietas son zonas débiles en donde se concentran los esfuerzos sobre todo al final de la fisura, si se altera el equilibrio (cambio de esfuerzos) se inicia una propagación de la fisura (Duncan y Wright, 2005); la unión de un gran número de fisuras tiene como origen una zona debilitada propensa a la localización de la superficie de deslizamiento (Figura 2).

En el presente artículo se muestran los resultados de varios ensayos de corte directo en una arcilla de alta plasticidad de la zona de Morelia Michoacán, México, en la cual se generaron grietas para poder estudiar su comportamiento. Se analizan los resultados y se presentan conclusiones en base a condiciones de estabilidad de taludes en suelos agrietados.

### Comportamiento de arcillas agrietadas

El agrietamiento complica el muestreo de las arcillas, en el caso que se logre labrar una muestra y la dirección de la muestra sea representativa de la dirección en la que se presenta el corte en campo, los resultados de un ensayo serían representativos. En el caso contrario, en el que se labrara una muestra sin grietas se sobreestimaría la resistencia. En las pruebas en muestras reconstituidas se pierde la estructura original del suelo y cuando se ensaya se obtiene una resistencia pico, que en la realidad

la arcilla agrietada no es capaz de soportar (Skempton 1964). Lo anterior conduce a la realización de análisis de estabilidad erróneos donde se puede presentar una falla.

Observaciones realizadas en varios casos de deslizamiento de taludes por Skempton (1964), condujeron a la conclusión, que la presencia de fisuras conducen a una falla progresiva y la resistencia va disminuyendo hasta un valor residual. Skempton (1964) observó que la resistencia de la primera falla de estabilidad en arcillas agrietadas no corresponde a la resistencia pico del suelo, sino a una reducida (resistencia post-pico, Figura 3), y demostró que el agrietamiento en los suelos juega un papel importante en el reblandecimiento de la arcilla. En las arcillas de Londres se han llegado a detectar disminuciones de la resistencia por causa del agrietamiento hasta valores residuales (Figura 3).

También se ha demostrado que una envolvente pico de falla de una prueba reconstituida, en donde se partió de arcillas de un alto contenido de humedad y se consolidó a un esfuerzo efectivo de campo, sirve para estimar la resistencia de las arcillas agrietadas (Skempton, 1970). Ya que los contenidos de agua que se presentan en la falla, son similares.

En el contexto de la mecánica de suelos se suele estudiar el suelo como un continuo, y la presencia de agrietamiento es difícil de tomar en cuenta. En el caso común de agrietamiento vertical de la parte superior de los taludes, se suele tomar una resistencia al corte nula (Duncan y Wright, 2005); pero si se trata de arcillas con grietas a mayor profundidad con un patrón definido distinto, es difícil de cuantificar su resistencia.

### DESCRIPCIÓN DEL SUELO UTILIZADO Y METODOLOGÍA DE ENSAYOS

El material fue extraído de una de las caras del talud de corte, de la carretera de acceso al nuevo recinto ferial (Ciudad de Morelia, en el estado de Michoacán, México, ver Figura 4), a un lado del entronque del acceso norte a Tres Marías. En la zona se presentaron varios deslizamientos de taludes en arcillas agrietadas cuando se estaban realizando las excavaciones en corte para la construcción de una carretera (ver Figura 1). En la Figura 5 se muestra una fotografía del material en estado natural, en condiciones húmedas y secas (durante el muestreo). En la imagen del lado izquierdo se observa claramente una estructura granular delimitada por grietas, del lado derecho en estado seco se muestra grumos de arcilla con patrón de agrietamiento bien marcado. Debido al agrietamiento no se pudo obtener una muestra inalterada, por lo que se realizó un muestreo alterado.



Figura 1. Rotura de talud en arcillas agrietadas, localizado en el par vial de Tres Marías, Morelia Michoacán, México.

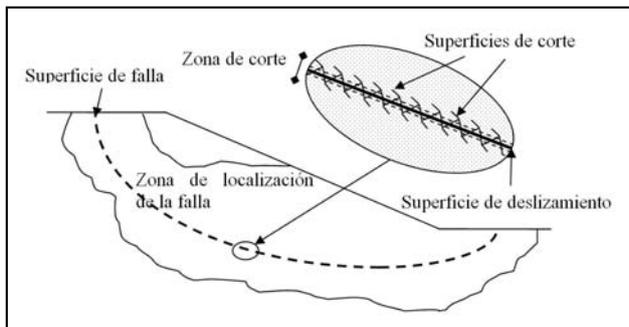


Figura 2. Zona debilitada, zona de corte y superficie de deslizamiento, modificada a partir de Leroueil (2001).

Al suelo se le practicaron los ensayos básicos para su identificación (Límites de consistencia, *ASTM D3282*), determinación de peso específico seco máximo y humedad óptima de compactación (energía estándar de compactación, *ASTM D698*) y densidad relativa de los sólidos. En especial los resultados de la prueba de compactación Proctor fueron útiles para el remoldeo de los especímenes a ensayar. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades índice del suelo estudiado

Propiedad	valor
Límite Líquido, LL	137 %
Límite Plástico, LP	54 %
Contracción Lineal, CL	30 %
Contracción Volumétrica, CV	21%
Clasificación SUCS	CH
Densidad relativa de los sólidos, S <sub>s</sub>	2,745
Peso específico seco máximo, $\gamma_d$	10,61 kN/m <sup>3</sup>
Humedad óptima, w	45%

Los valores de los límites de consistencia nos dan una idea del comportamiento del suelo, en este caso se espera que se tenga un ángulo de fricción efectivo bajo ( $10^\circ$ ), además de que se tenga una compresibilidad alta ( $C_c=1,1$ ), valores típicos de una arcilla montmorillonítica (*Mitchell y Soga, 2005*).

#### Método de inducción de la grieta

Para poder realizar ensayos con muestras agrietadas se ideó un método que produjera el menor daño a la muestra. Después de probar varios métodos se eligió el más replicable. El procedimiento consiste en: reconstituir la muestra al peso específico obtenido del ensayo Proctor mediante compactación estática, posteriormente la muestra se labra, se monta en el equipo de corte directo y se le aplica una carga normal con la que se deja consolidar, posteriormente se sigue el procedimiento para la generación de la grieta. El método consiste en: engrasar el interior de la placa superior de la caja de corte directo, con la finalidad de que cuando se levante la placa ésta se deslice mucho más fácil; para poder levantar la placa, se giran media vuelta los tornillos de sujeción y los tornillos auxiliares de la caja de corte lo más exacto posible, con el propósito de introducir una cuerda de guitarra metálica (con diámetro aproximado de 0,275 mm). Una vez que se introduce la cuerda entre las placas y está sensiblemente en contacto con la muestra, se tensa en ambos extremos, para generar un movimiento alternado lateral para inducir el corte hasta aproximadamente la mitad de la muestra. Pero en realidad solo se realiza un corte en una tercera parte de la muestra, debido a la curvatura de la cuerda. Finalmente se retira la cuerda, los tornillos de sujeción y auxiliares, para poder proseguir con la etapa de corte del ensayo.

#### Ensayos de Corte Directo

Se realizaron ensayos de corte directo consolidados no drenados (CU, de sus siglas en inglés) en los especímenes de arcilla utilizando la metodología de la norma Española UNE103401. Se efectuaron ensayos con tres condiciones distintas: a) un ensayo sin grieta, que sirvió de referencia; b) ensayo con una longitud de grieta de aproximadamente 200 mm; y c) ensayo con una grieta que abarcaba toda la muestra.

Las muestras se ensayaron a tres distintos esfuerzos normales: 40,11, 60,21 y 80,22 kPa. Estas fueron sometidas a la consolidación en un tiempo de 24 h (tiempo en el cual se observó que se presentaba el 100% de la consolidación primaria) y se realizó el corte a una velocidad tal que se produjera la falla en un tiempo entre 15 y 20 minutos, dada la permeabilidad de la arcilla se produjo el corte sin drenaje.

#### RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CU

Los resultados de los ensayos con grieta y con grieta parcial se muestran en la Figura 6 y Figura 7, donde se muestran las curvas esfuerzo deformación y las envolventes de falla, pico y post-pico. En la Tabla 2 se resumen los parámetros de la envolvente consolidada no drenada de Mohr-Coulomb,  $c_{cu}$  y  $\phi_{cu}$ , que se obtuvieron en las tres condiciones ensayadas.

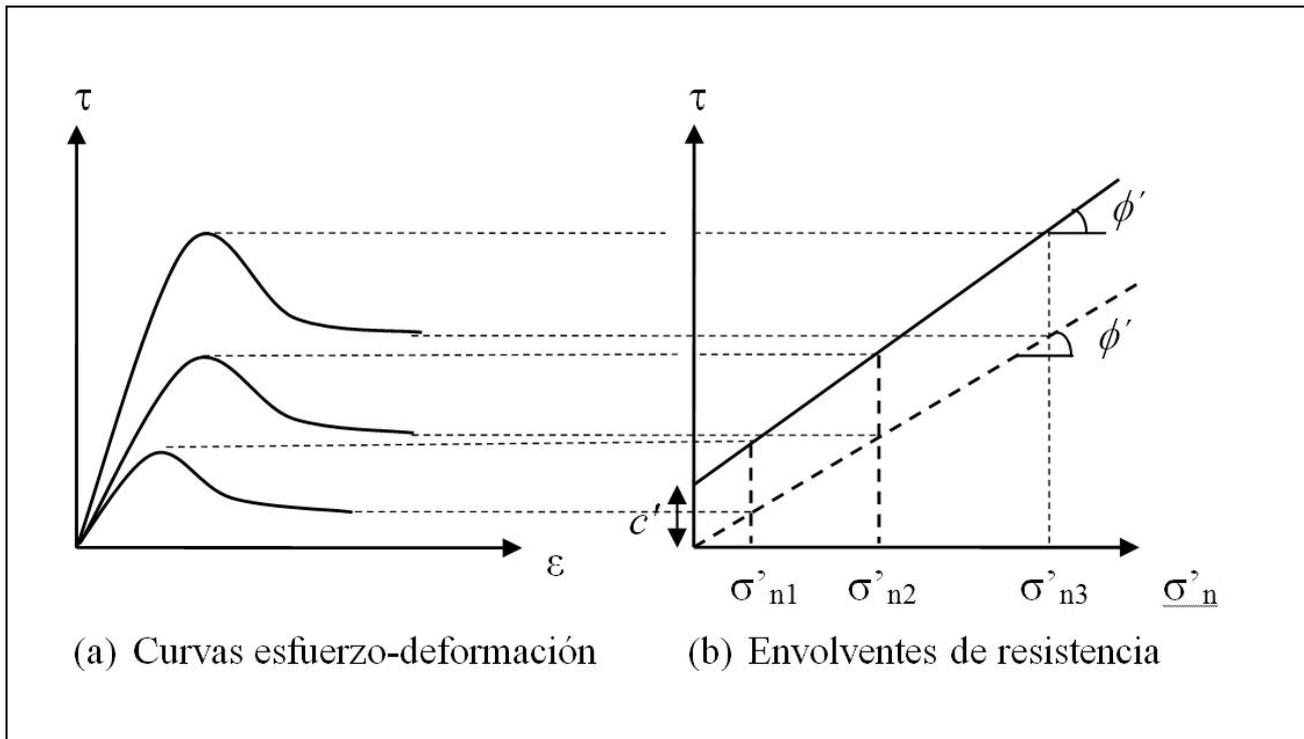


Figura 3. Envolventes de resistencia máxima y residual, Modificada a partir de Skempton (1964).

Tabla 2. Valores de cohesión y ángulo de fricción del suelo en los distintos ensayos.

Condición del Ensayo CU	Cohesión aparente (kPa)	$\phi_{cu}$ (°)
Sin grieta	38,25	13
Resistencia Post-Pico (sin grieta)	19,6	0
Con grieta parcial	0	42
Con grieta total	0	0

genera una disminución de la resistencia al corte de aproximadamente 60%, característica de los suelos altamente plásticos (Skempton 1964); la resistencia al corte post-pico parece ser independiente del esfuerzo normal total aplicado (19,6 kPa para los tres esfuerzos) y tiende a generar una envolvente post-pico horizontal. Para que se pudiera presentar una resistencia residual era necesario que se aplicara más deformación.

Las gráficas esfuerzo-deformación de las muestras con grieta parcial se presentan en la Figura 7. La envolvente de falla tiene mayor inclinación, debido a las resistencias menores obtenidas para los esfuerzos normales menores. En la muestra con un esfuerzo normal menor, la resistencia pico fue menor que la de la muestra sin grieta y se presenta una falla repentina por una propagación de la grieta a un esfuerzo de corte de 29,42 kPa, se debe de notar que no existe resistencia post-pico. La gráfica correspondiente al esfuerzo normal medio tiene una resistencia al corte máxima similar a la de la muestra sin grieta, en la resistencia post-pico, también se presenta una resistencia al esfuerzo cortante cercana a 29,42 kPa; en este caso si existe una caída de la resistencia post-pico de 40% aproximadamente, y se presenta la propagación de la grieta. La resistencia al corte pico de la muestra consolidada con esfuerzo normal mayor se incrementa en 9,8 kPa, respecto a la de la prueba sin grieta; para esta muestra la caída de la resistencia post-pico fue del 70% aproximadamente, disminuyendo hasta un esfuerzo de corte de 19,6 kPa, nótese que no se presenta la propagación de la grieta.

Por otro lado, se ensayó una muestra con una grieta que cubría toda la muestra, y los resultados mostraron una resistencia nula al esfuerzo cortante. De acuerdo al procedimiento seguido para la formación de la grieta, ésta se forma después de la consolidación y se rompe todo vínculo entre las paredes de



Figura 4. Localización de la ciudad de Morelia, Michoacán, México.

En la Figura 6 se muestran las curvas esfuerzo-deformación de las muestras ensayadas sin grietas. Se observa que la resistencia pico es proporcional al esfuerzo normal total aplicado, el esfuerzo cortante pico se presentó a una deformación aproximada de entre 1 y 1,5 mm. Posterior a la resistencia pico se



Figura 5. Fotografías de la arcilla en estado natural.

la arcilla en la grieta; además que existe agua que produce lubricación causando una resistencia nula.

El agrietamiento parcial causó caída de la cohesión aparente y se observó un aumento del ángulo de fricción interna,  $\phi_{cu}$ , además de producir una propagación de la grieta para esfuerzos normales totales pequeños. El colapso repentino es la causa aparente de la caída de la cohesión aparente y el aumento del ángulo de fricción. El ensayo al corte con grieta en toda la muestra no presentó resistencia al corte. Por otro lado se detectó una resistencia post-pico de 19,6 kPa independiente al parecer del esfuerzo normal total, esta observación es válida para los casos donde no existió propagación de la grieta.

#### Aplicación de los resultados obtenidos en estabildades de taludes

La aplicación de los resultados de los ensayos de corte directo consolidados no drenado con distintos grados de agrietamiento, se basa en la representatividad de situaciones reales. El ensayo de corte directo consolidado no drenado tiene dos etapas: la de consolidación y la de aplicación de un esfuerzo de corte en forma rápida, donde no se permite el drenaje. Cada ensayo se consolidó bajo distintos esfuerzos efectivos normales, que en la práctica corresponderían a distintas profundidades; es decir esta primera etapa permite reproducir el estado del suelo bajo distintas condiciones de consolidación. La segunda etapa mide la resistencia al corte aplicando el esfuerzo de una manera rápida, en la que no se permite la disipación de la presión de poro. Esta condición provoca que se presente un exceso de presión de poro que se va incrementando en la medida que se aplica el esfuerzo de corte, lo anterior induce que los esfuerzos efectivos sean menores a los totales. En la prueba de corte directo no se pueden medir las presiones de poro y lo que en realidad se obtiene es una envolvente de falla, desde el punto de vista de esfuerzos totales, con un ángulo de fricción sin drenaje,  $\phi_{cu}$ , menor que el que se obtiene en una trayectoria de esfuerzos efectivos.

El ángulo de fricción representa la ganancia de resistencia del suelo por causa de la consolidación bajo distintos esfuerzos normales. La ganancia de resistencia al corte es proporcional

al incremento del esfuerzo de consolidación y la constante de proporcionalidad es tan  $\phi_{cu}$ . En este caso hay que recordar que la velocidad de aplicación de carga fue rápida, lo que representa en campo una condición donde no se permitió el drenaje; en el caso de estabilidad de taludes, se trata de un talud excavado en un suelo arcilloso saturado, donde se evaluaría la resistencia a corto plazo, es decir un tiempo de cero hasta seis meses o hasta un año, dependiendo de la permeabilidad de la arcilla y la distancia que tenga que recorrer el agua para que se disipe la presión de está. La condición a largo plazo se evaluaría con una prueba consolidada drenada, para ello habría que realizar los ensayos correspondientes.

El ensayo sin grieta es representativo de dos condiciones en campo: La primera se trata de un talud en el cual no se presenta agrietamiento alguno y la segunda condición, la caída de resistencia después de la falla de un talud cuya superficie ya se definió (ver Figura 8, casos I y II). Para realizar un análisis de estabilidad de taludes desde el punto de vista de estados límite caso I, es necesario utilizar la envolvente de falla de Mohr-Coulomb, tomando en cuenta la resistencia pico. La segunda condición se presenta cuando el talud ya se ha desplazado y sobre pasa la resistencia máxima y se genera una superficie de deslizamiento; en el caso del material estudiado la resistencia pico llega a caer hasta un 60%. Si se presenta una gran deformación se debe de utilizar la resistencia residual que pudiera ser un poco menor que la post-pico. En el caso que existiera un deslizamiento de talud antiguo, el análisis de estabilidad de taludes se debería realizar con una envolvente de falla post-pico preferentemente la residual (ver Figura 8, caso II).

Además se contemplaron otros dos casos con agrietamiento natural: el primero sería el caso de una arcilla con grietas con una gran longitud y el segundo un agrietamiento moderado (ver Figura 8, casos III y IV, aquí se representa la orientación de las grietas más desfavorable). Los mecanismos de formación de las grietas para el caso III, serían un suelo residual en donde la roca que dio origen al suelo, tenía discontinuidades con una longitud bastante grande. En el caso IV sería la expansión y contracción de los suelos que daría lugar a una generación de un agrietamiento discontinuo, en suelos estratificados. En ambos casos la resistencia al corte se ve reducida principalmente la com-

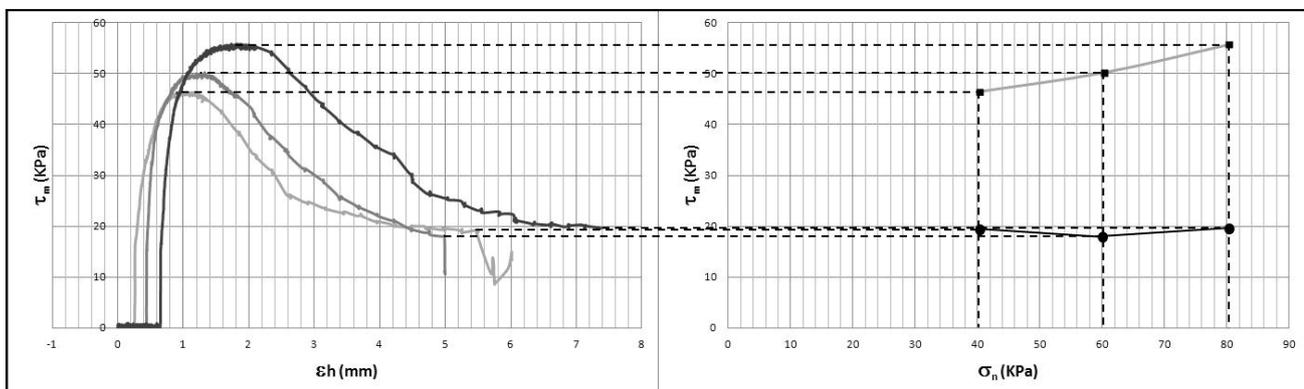
ponente de la cohesión aparente. En el caso III la resistencia al corte es muy baja sobre todo cuando por ella se presenta un flujo de agua, de acuerdo al ensayo realizado, la resistencia sería nula lo que significaría en términos prácticos que el talud fallaría en el momento que se hiciera la excavación. En el caso IV de las grietas con longitud parcial, la parte de resistencia que se pierde (de acuerdo a los ensayos) es la de la cohesión aparente; por tanto la estabilidad del talud solo quedaría condicionada a la resistencia por fricción. Además debemos recordar que si las grietas son muy superficiales (suelo sujeto a un esfuerzo normal menor) las grietas se propagarían muy rápidamente y en las más profundas la resistencia si se desarrolla completamente y se presenta una resistencia post-pico que eventualmente sería residual (ver Figura 1 y Figura 7); lo que sugiere que la falla se iniciaría de la parte superior del talud a la parte inferior.

Para obtener de manera cuantitativa, en términos de factor de seguridad, el significado de la variación de los parámetros de la envolvente de falla, se presenta un análisis sencillo que se basa en los casos prácticos analizados previamente. En la Figura 9 se muestra la geometría de un talud con altura de 9 m y un con ángulo de inclinación de 61°. Tiene una sección crítica que corresponde a la inclinación del agrietamiento, que se supone de 39°; ésta se dejó fija para poder comparar los resultados. El análisis consistirá en evaluar el factor de seguridad de la estabilidad del talud en la sección por el método de Bishop, para simular las distintas condiciones solamente se cambian las envolventes obtenidas en las situaciones comentadas.

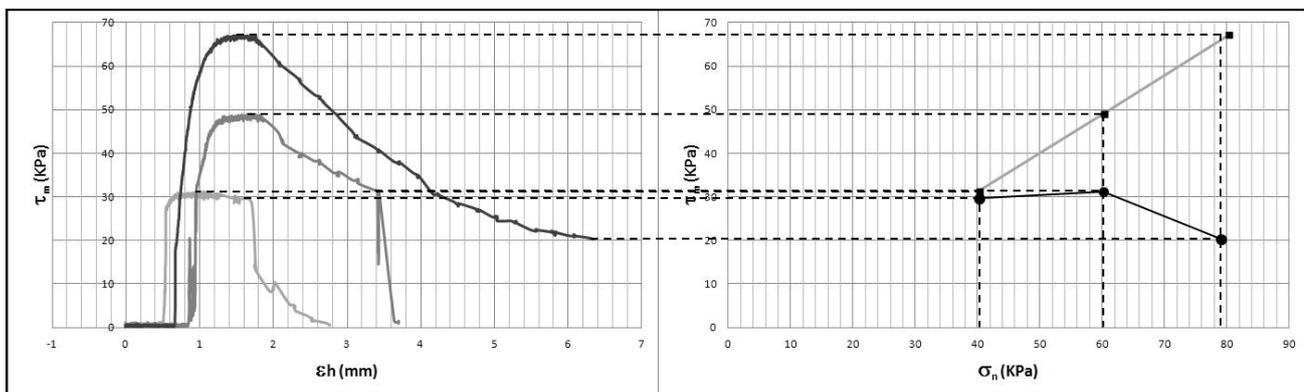
**Tabla 3. Resultados de análisis de estabilidad de los casos prácticos**

Caso	Envolvente	Factor de Seguridad
Caso I (sin grieta)	$\tau = 38,25 + \sigma \tan 13$	3,12
Caso II (post-pico)	$\tau = 19,6$	1,48
Caso III (grieta de gran long.)	$\tau = 5 + \sigma \tan 13$	0,65
Caso IV (agrietamiento Parcial)	$\tau = \sigma \tan 42$	1,06

En la Tabla 3, se muestran los resultados de los análisis de los casos prácticos discutidos, las envolventes utilizadas para el análisis y los factores de seguridad. El factor de seguridad para el caso I es de 3,12 (valor de referencia), que es el caso sin agrietamiento. El caso II, se toma la resistencia post-pico obtenida ya que no se tiene la residual, como la resistencia cae bastante, se ve reflejado en el factor de seguridad es de solo de 1,48 (47,51 % respecto al de referencia). En el caso IV se utilizó la envolvente obtenida del agrietamiento parcial y el factor de seguridad se redujo a 1,06 (33,94% respecto al de referencia). En el caso III longitud de la grieta mayor, se tomó una envolvente supuesta ya que el valor experimental fue nulo o no se pudo medir, dadas la condiciones se espera un ángulo de fricción bajo y que la cohesión prácticamente desaparezca; así que se mantuvo el ángulo de fricción de 13° del caso I y la cohesión se bajo a 5 kPa, con estos valores se puede notar que el factor de seguridad es menor de 1, que es una condición de falla.



**Figura 6. Gráficas esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo post-pico pruebas sin grieta, CU.**



**Figura 7. Gráficas esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo post-pico pruebas con grieta, CU.**

## CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos de corte directo en una arcilla altamente plástica de la región de Morelia. Dada su susceptibilidad al agrietamiento no se pudieron obtener muestras inalteradas, y se decidió estudiar el material en condiciones remodeladas. Con el objetivo de estimar la influencia del agrietamiento en la resistencia al corte se ideó un procedimiento para generar una grieta en la muestra, que resultó exitoso.

Para poder ensayar el suelo en pruebas de corte directo consolidados no-drenados, este se reconstituyó el suelo al peso volumétrico seco máximo y contenido de humedad que resultó del ensayo Proctor con energía estándar. Se ensayaron muestras sin agrietamiento, con grieta parcial y grieta total.

Los resultados de los ensayos de la muestras sin grieta presentaron una envolvente pico con una  $c_{cu} = 38,25$  kPa y un  $\phi_{cu} = 13^\circ$ , la envolvente post-pico resultó prácticamente horizontal con pérdida de resistencia hasta del 60%; con las deformaciones aplicadas no se alcanzó la resistencia residual. Estas envolventes se aplican al análisis de estabilidad de taludes tomando una condición a corto plazo, donde se considera la ganancia de resistencia por la consolidación. Las condiciones representativas de campo serían: el talud sin falla alguna y el talud fallado con superficie de deslizamiento predefinida (casos I y II, Figura 8).

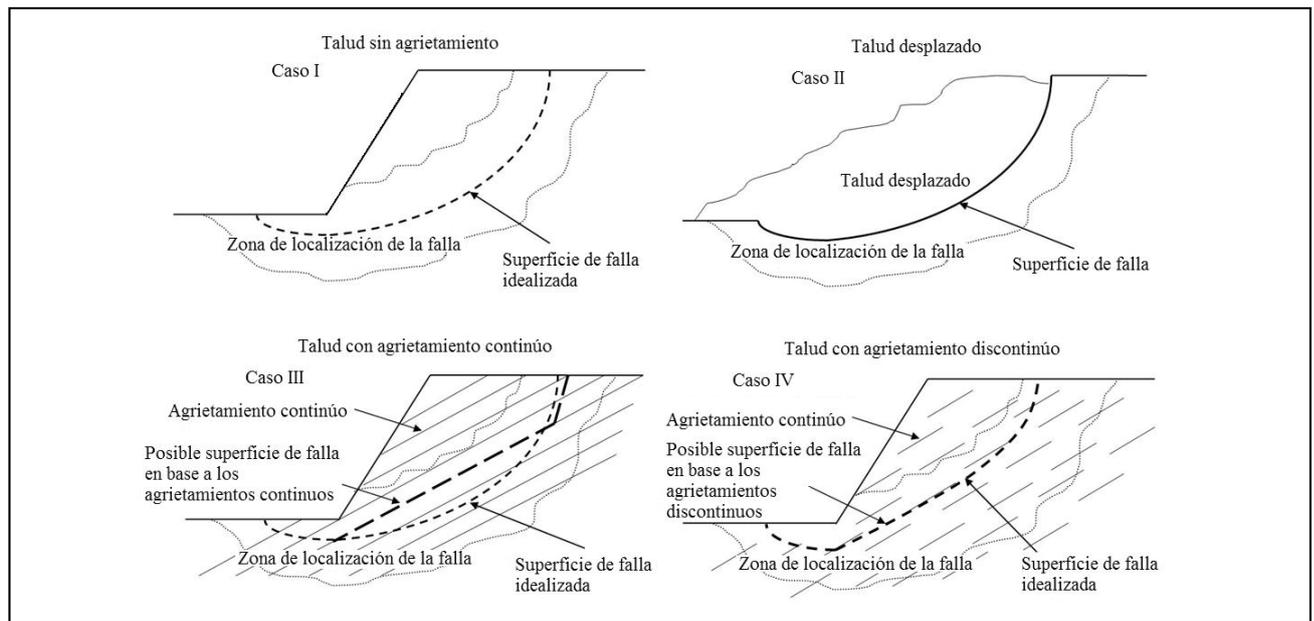


Figura 8. Análisis de resultados en base a 4 casos, tanto para CU como para CD.

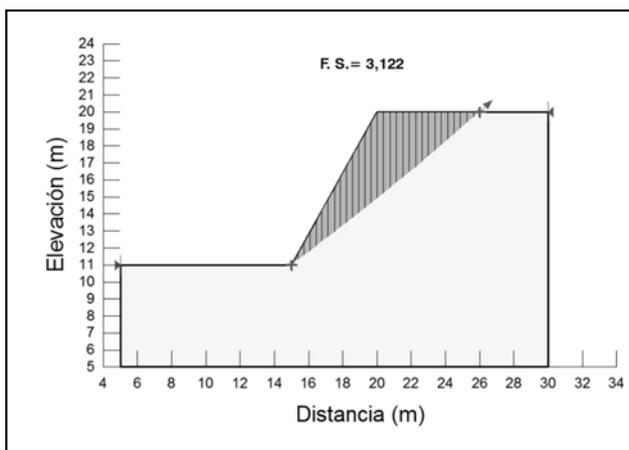


Figura 9. Análisis por estados límite de estabilidad de talud.

Los resultados de las pruebas con grietas parciales inducidas, muestran una envolvente de falla con una cohesión aparente nula y un ángulo de fricción no drenado de  $42^\circ$ , mayor que en la muestra sin grieta. Las curvas esfuerzo deformación de las muestras que están sometidas a pequeños esfuerzos normales, se presenta una repentina propagación de la grieta que no permite que la resistencia pico y post-pico se desarrolle; solo

en el caso de las muestras con los esfuerzos normales altos se desarrollaron. Esta propagación de la grieta es la posible causa de la caída de la cohesión aparente y del aumento de ángulo de fricción, ya que esta caída propicia el giro de la envolvente. Además, esta información nos permite concluir, que en el campo el agrietamiento de las partes superficiales (con bajos esfuerzos normales) se propagará hacia las zonas bajas (de esfuerzo normal alto). En este tipo de suelos la caída de resistencia post-pico es notable, y para este caso disminuyó un 70% de su resistencia máxima, lo que provoca en un caso real que exista una disminución del factor de seguridad grande, una vez que la masa de suelo se desplaza.

El análisis cuantitativo de estabilidad de taludes realizado, tomó como referencia los casos prácticos presentados. Se observa que la influencia del agrietamiento y su longitud puede disminuir el factor de seguridad a menos del 33% de su valor original e inclusive si crece la longitud de la grieta hacer completamente inestable el talud. Por ello es importante tomar en cuenta el agrietamiento en los análisis de estabilidad de taludes.

Se necesitan más estudios desde el punto de vista de mecánica de la fractura para poder explicar el comportamiento de propagación de la fractura que se observó en los ensayos. Es claro que el agrietamiento tiene influencia en la envolvente de falla, entonces los ensayos de corte directo con grietas inducidas son una opción que busca la representatividad de las condiciones de campo, y así poder obtener parámetros más confiables.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ASTM D3282 - 09  
Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.  
*ASTM International.*
- ASTM D698-12  
Standard. Test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort  
(12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)).  
*ASTM International.*
- DUNCAN AND WRIGHT, 2005.  
Soil strength and slope stability.  
*John Wiley and Sons. USA.*
- LEROUEIL, S. (2001).  
Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms.  
*Géotechnique, Vol. 51 No. 3:197-243.*
- MITCHELL J. K, AND SOGA K, 2005.  
Fundamentals of Soil behavior.  
*John Wiley & Sons. USA.*
- NORMA UNE103401, 1998.  
Determinación de los parámetros de resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo  
en la caja de corte directo.
- RAYHANI M. H. T. 2008.  
Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils.  
*Engineering Geology, Vol. 97: 25-31.*
- SKEMPTON, A. W. 1964.  
Long-term stability of clay slopes. Fourth Rankine lecture.  
*Géotechnique, Vol. 14 No. 2:77-101.*
- SKEMPTON, A. W. 1970.  
First-time slides in over-consolidated clays.  
*Géotechnique, Vol. 20 No. 3:320-324*