

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE MUESTRAS DE SUELO INALTERADO Y ALTERADO

Diego Humberto Frías Guzmán<sup>1</sup>

Martín Hernández Marín<sup>2</sup>

## Resumen

La determinación de la resistencia a la tensión resulta esencial para conocer el fenómeno del fracturamiento en suelos. En el presente trabajo se muestran los resultados de un análisis experimental comparativo de la resistencia a la tensión de muestras de suelo inalterado y alterado. El material utilizado en las pruebas fue un suelo arenoso obtenido del valle de Aguascalientes. Para la comparación de resultados, las muestras de suelo alterado fueron compactadas dentro de un molde hasta obtener una densidad seca similar al de las muestras de suelo inalterado. Se realizaron tres procedimientos de pruebas en muestras alteradas para analizar la resistencia a la tensión con diferentes contenidos de agua: a) se varió el contenido de agua al momento de la compactación; b) el suelo se compactó totalmente saturado, y se sometió a un proceso de secado; y c) un proceso similar al anterior, en el cual las muestras se dejaron secar hasta un contenido de agua de 9.2%, y después se rehidrataron. De los resultados obtenidos, se observa una mayor resistencia a la tensión en muestras de suelo inalterado, mientras que en muestras alteradas, las sometidas a un proceso de secado se aproximaron más a los resultados obtenidos en muestras inalteradas.

**Palabras clave:** *resistencia a la tensión, suelo inalterado, suelo alterado, proceso de secado, rehidratación.*

---

1 Maestro en Ingeniería. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos. difrias@hotmail.com

2 Doctor en Ciencias. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Departamento de Geotecnia e Hidráulica del Centro de Ciencias del Diseño y la construcción. mhernandez@correo.uaa.mx

## Abstract

The tensile strength is an important parameter to know the phenomenon of fracturing in soils. This investigation presents the results of a comparative experimental analysis of the tensile strength of undisturbed and disturbed soil samples. The material used in the tests was sandy soil obtained from the Valle de Aguascalientes. For the comparison of results, disturbed soil samples were compacted into a mold to obtain a dry density similar to that of undisturbed soil samples. Three test procedures were performed on disturbed samples to analyze the tensile strength with different water contents: a) the water content was varied at the time of compaction; b) the soil was compacted totally saturated, and then was left to dry until the water content was similar to the measured in undisturbed soil samples; and c) a process similar to b), in which the samples were allowed to dry to a water content of 9.2%, and then the samples were rehydrated. From the obtained results, a larger tensile strength was obtained from undisturbed soil samples, whereas in disturbed samples, the samples under a drying process were closer to the results obtained from undisturbed soil samples.

**Keywords:** *tensile strength, undisturbed soil, disturbed soil, drying process, rehydration.*

## Introducción

La resistencia a la tensión se define como el esfuerzo requerido para causar una fractura por tensión, y es un parámetro importante para distintas ramas de la ingeniería. Por ejemplo en ingeniería agrícola, la fractura por tensión en suelos finos es deseable, debido a que es un factor importante en la habilidad de las raíces de las plantas para penetrar dentro del suelo (Munkholm *et al.*, 2002; Ibarra *et al.*, 2005). En ingeniería civil y geotécnica, una baja resistencia a la tensión puede causar fracturas no deseables en el suelo, las cuales pueden afectar la infraestructura urbana. En años recientes, se ha incrementado el interés en el entendimiento de la resistencia a la tensión del suelo, generando avances en el estudio de fracturas por tensión.

La resistencia a la tensión en el suelo está influenciada principalmente por la unión o la energía de contacto entre los agregados del suelo, como resultado de varias fuerzas físico-químicas entre partículas (la repulsión o atracción eléctrica de doble capa), la cementación debida a la precipitación, y la succión (Lu *et al.*, 2007). Algunos estudios experimentales han demostrado que el contenido de agua en el suelo puede causar variación en la magnitud de la resistencia a la tensión debido a cambios

en las fuerzas que contribuyen a la resistencia a la tensión, como los mencionados anteriormente (Fang y Daniels, 2006).

Para materiales no cohesivos como las arenas es generalmente aceptado en ingeniería que éstas presentan resistencia al cortante y una poca o nula resistencia a la tensión. Materiales cohesivos como arcillas tienen una mayor resistencia. El incremento de la cohesión está asociado con una parcial saturación en materiales como las arenas. A lo cual la cohesión tiende a cero si el suelo subsecuentemente es saturado. La resistencia a la tensión del suelo varía con el contenido de agua, los factores sobre los que depende la resistencia dependen de esto, por lo que se puede dividir en tres estados: el estado seco, el estado parcialmente saturado y el estado saturado.

En general, los procedimientos actualmente en uso para determinar este parámetro se clasifican en dos tipos: pruebas de tensión indirecta y pruebas de tensión directa. En las pruebas de tensión indirecta, el esfuerzo de tensión es generado aplicando una fuerza de compresión uniformemente distribuida o una flexión en un espécimen con una geometría específica de manera que, al quedar sometido a la condición de esfuerzo o de flexión se produzca un plano en el que se cree una falla debido a esfuerzos de tensión. Las pruebas de tensión directa, el espécimen se somete a un esfuerzo de tensión homogéneo en dirección del eje de la muestra. La prueba de tensión directa tiene la ventaja de que es la única prueba en la cual todos los esfuerzos y deformaciones inducidos son homogéneos y pueden ser calculados desde una medición directa sin hacer suposiciones sobre la respuesta esfuerzo-deformación del material.

Todavía existe una falta de información sobre la resistencia a la tensión del suelo, donde en escasos trabajos se presentan resultados obtenidos de muestras inalteradas. Se presenta y discute un análisis comparativo entre resultados de la resistencia a la tensión de muestras de suelo inalterado y alterado, obtenidos mediante un aparato de tensión directa. También se realizan pruebas variando el contenido de agua en las muestras mediante tres procedimientos.

## Material y equipo

Se utilizó un suelo arenoso para este estudio, la muestra de suelo fue obtenida del municipio de Jesús María dentro del valle de Aguascalientes, México. En la Figura 1 se muestra la distribución de los granos del suelo estudiado, el cual tiene una densidad seca de  $1.58 \text{ g/cm}^3$  y una relación de vacíos de 0.55. En el suelo, se observó una considerable cantidad de cementante, el cual generalmente incrementa la resistencia del suelo. Dentro del valle, este tipo de suelo es localmente llamado “tepetate” y es reconocido por su dureza, como es descrito por Pacheco-Martínez *et al.*

(2013). El agente cementante en este suelo es generalmente observado en forma de grumos porosos de color blanco, y están compuestos principalmente por carbonato de calcio, demostrado por la reacción del suelo en contacto con el ácido clorhídrico. El carbonato de calcio es probablemente traído al valle por corrientes de las montañas ubicadas al noreste, compuestas principalmente de rocas de carbonato.

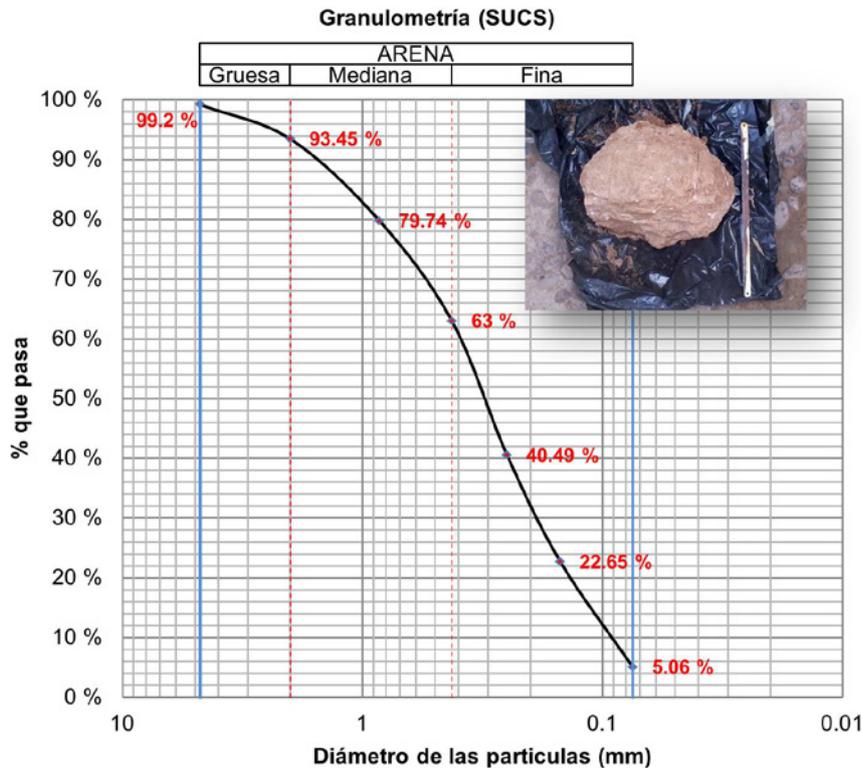


Figura 1. Curva granulométrica del suelo.

En la Figura 2 se muestra una representación del aparato usado para las pruebas de tensión. El aparato consiste de un marco, sobre el cual se encuentra un set de dos placas, una de las placas se encuentra fija al marco y la otra se mueve axialmente. La placa móvil está adaptada al aparato sobre cuatro carruchas, y su desplazamiento es guiado por baleros. Durante la prueba, la placa móvil es jalada por un contenedor de carga a través de un cable que pasa por una polea, como se observa en la Figura 2a. Durante la prueba, la carga de tensión fue incrementada a  $0.015 \text{ N s}^{-1}$  ( $1.5 \text{ g s}^{-1}$ ) hasta que la muestra fallara por tensión. Para el cálculo de la resistencia a la tensión, a la carga de tensión total con la que se fracturó la muestra () se le resta la carga requerida justo antes de co-

menzar el movimiento de la placa móvil incluyendo el peso de la muestra fracturada sobre la placa (); la fuerza resultante se divide entre el área del plano de falla () para obtener la resistencia a la tensión (), lo anterior se expresa con la siguiente ecuación:

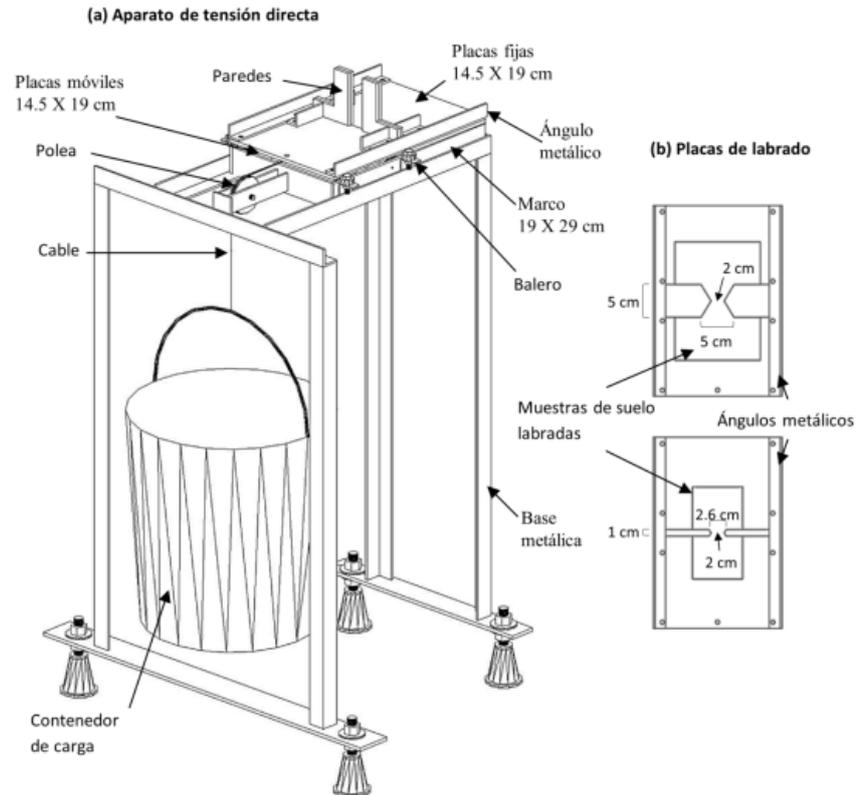


Figura 2. Esquema del aparato de tensión directa.

El procedimiento de preparación de las muestras fue distinto para muestras inalteradas y para muestras alteradas. En el caso de muestras de suelo inalterado, se utilizó un set adicional de dos placas removibles. Para el caso de muestras de suelo alteradas, se utilizó un molde.

Para las pruebas con suelos inalterados, la muestra fue labrada hasta obtener una geometría específica para generar la falla en un área predispuesta. Las dos placas adicionales usadas para el labrado de la muestra se mantienen unidas entre ellas por dos ángulos metálicos. El lado de contacto entre estas placas tiene una reducción en forma de trapecio como se observa en la Figura 2b. Estas placas fueron construidas con diferente tamaño en el lado de contacto, de modo de trabajar con diferentes tamaños de granos de las muestras de suelo: la larga para suelos

de grano grueso y la pequeña para suelos de grano fino. Las muestras de suelo inalterado fueron cortadas y devastadas con disco de corte diamantado hasta obtener un bloque de espesor próximo a los 4.5 cm, y con longitud variable de los lados, dependiendo del tipo de suelo. Para controlar la fractura en la muestra en una zona predispuesta, el área en el centro del bloque de suelo fue reducida, de modo que se obtuviera una sección transversal central de acuerdo con la geometría diseñada de las placas de labrado. En la Figura 3b se observa una parte del proceso de labrado de la reducción de la sección transversal central de la muestra de suelo. En esta figura, se puede observar que las placas de labrado se colocaron debajo de placas guías externas para asegurar un corte perpendicular en las paredes de la muestra de suelo. Una vez finalizado el proceso de labrado, se fijan las placas de labrado junto con la muestra en aparato de tensión. Después se colocan cuatro paredes metálicas, las cuales son responsables de transmitir la carga a la muestra, como se observa en la Figura 4a. Para asegurar la homogeneidad en la transmisión de los esfuerzos entre el área de contacto de la muestra y de las paredes metálicas, se utilizó una pequeña porción de cemento Portland para rellenar los espacios vacíos. Después de colocar las paredes metálicas, se liberan las placas de labrado quitando los ángulos metálicos en los bordes, permitiendo el movimiento de la placa móvil junto con la placa de labrado sobre ésta.

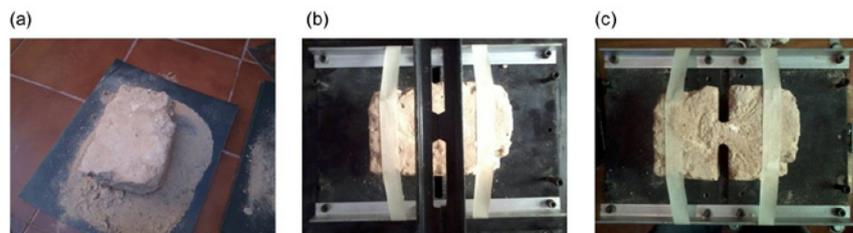


Figura 3. Proceso de labrado de muestras de suelo inalterado. (a) Bloques de suelo cortado con disco de diamante; (b) reducción de la sección transversal con una segueta; (c) muestra labrada.

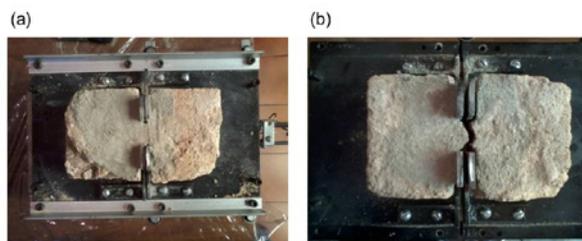


Figura 4. Prueba de tensión. (a) Placas de labrado y paredes fijas al aparato; (b) muestra de suelo fracturada por tensión.

Para medir la resistencia a la tensión de muestras de suelo alterado, se construyó un molde basado en el utilizado por Kim y Hwang (2003). Este molde se adaptó al aparato de tensión, como se muestra en la Figura 5a, el cual consiste en dos mitades metálicas iguales, las cuales están sujetas entre sí mediante tornillos y una abrazadera de barra. Para las muestras alteradas, se compactó 637.7 gramos de suelo, cantidad que corresponde a la masa de suelo requerida para obtener una densidad seca de  $1.58 \text{ g/cm}^3$  en un volumen de  $404.6 \text{ cm}^3$ , el cual corresponde al volumen interior del molde a una altura de 5 cm. La compactación se hizo en tres capas, cuidando que cada capa de suelo fuera compactada uniformemente, de tal modo que se obtuviera una densidad seca lo más homogénea posible.

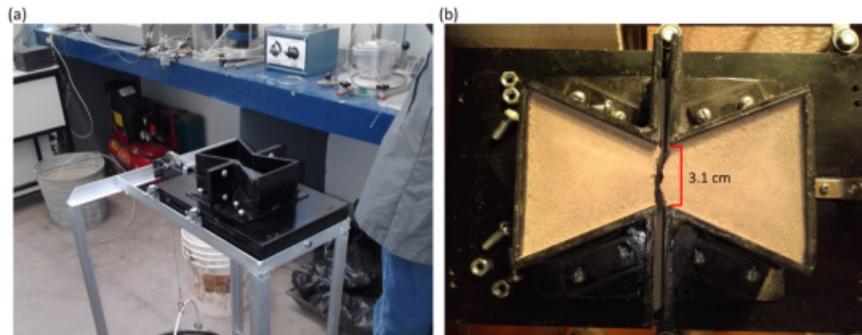


Figura 5. Molde utilizado para pruebas con suelo alterado. (a) Molde fijado al aparato de tensión; (b) Muestra de suelo fracturada por tensión.

### Condiciones de pruebas de tensión

Para un análisis comparativo de resultados en muestras de suelo inalterado, todas las muestras fueron colocadas en las placas de labrado en la misma orientación de su posición natural en el campo. Sin embargo, en el caso del suelo alterado, tres tipos de condiciones de prueba para determinar la resistencia a la tensión se realizaron para analizar la resistencia a la tensión con diferentes contenidos de agua:

#### *Pruebas en muestras de suelo alterado con variación en el contenido de agua de moldeo*

El suelo fue ensayado con diferente contenido de agua al momento de ser compactados, manteniendo constante su densidad seca estimada. Antes de compactar el suelo en el molde, el material se mezcló con agua desti-

lada y se dejó en una bolsa impermeable para que el agua se distribuyera uniformemente en el suelo. La Tabla 1 muestra los contenidos de agua correspondientes a diferentes grados de saturación. Para cada contenido de agua, se realizaron tres pruebas de resistencia a la tensión para obtener valores promedios representativos.

Saturación (%)	Contenido de agua (%)
15	3.4
30	6.7
45	10.1
60	13.5
75	16.8
90	20.2
100	22.5

Tabla 1. Equivalencia de la Saturación con el contenido de agua.

#### *Pruebas en muestras de suelo alterado sometidas un proceso de secado*

El objetivo de este procedimiento fue estimar la resistencia a la tensión mediante un proceso de secado, en el cual las muestras se compactaron completamente saturadas de modo de ver que efecto tiene el secado en su resistencia a la tensión. La muestra se dejó secar dentro del molde permitiendo el drenado. El inicio del proceso de secado consistió en colocar las muestras fuera de los rayos del sol durante un periodo de 24 a 36 horas, de manera que la pérdida de agua fuera lenta para mantener lo más posible inalterada la estructura de la muestra de suelo. Después de este periodo, la muestra fue colocada bajo los rayos de sol para perder el agua intersticial. Se midió la resistencia a la tensión a diferentes contenidos de agua, estableciendo como límite el contenido de agua medido en las muestras de suelo inalterado (9.2 %).

#### *Pruebas en muestras de suelo alterado incrementado el contenido de agua a partir de un proceso de secado*

Este procedimiento fue realizado para observar el comportamiento de la resistencia a la tensión después de incrementar el contenido de agua de una muestra sometida a un proceso de secado, simulando en parte el proceso de rehidratación del suelo en temporada de lluvias. El proceso

de la prueba fue igual al descrito anteriormente, donde para este caso, todas las muestras se dejaron secar a 9.2% de contenido de agua, correspondiente al contenido de agua al momento de la prueba en su estado inalterado. Después del secado, se agregaron 4 ml de agua destilada a la muestra cada 2 horas. Para este procedimiento en particular, tres muestras fueron realizadas: la primera a un contenido de agua de 13.9%, otra a un 16.8%, y una última a 22.5% (muestra 100% saturada), después, las muestras se cubrieron con plástico para prevenir evaporación y se dejaron por 24 horas para que el agua se distribuyera uniformemente en la muestra de suelo.

## Resultados

En la Figura 6 se muestra una comparación de la resistencia a la tensión de muestras de suelo inalterado y alterado a similar contenido de agua al medido en las muestras inalteradas cuando fueron sometidas a tensión. En esta figura, la columna de “Suelo inalterado” corresponde al promedio de las resistencias a la tensión obtenido de muestras inalteradas, y la resistencia a la tensión de la columna de “Suelo alterado, sin proceso de secado” corresponde a la prueba con variación en el contenido de agua de moldeo. La columna de “Suelo alterado, con proceso de secado” es el resultado de las muestras alteradas sometidas a un proceso de secado. Comparando las columnas en la Figura 6, una gran diferencia puede ser vista, particularmente entre la columna de “Suelo inalterado” y “Suelo alterado, sin proceso de secado”. Esta diferencia puede estar asociada con el incremento a la resistencia a la tensión debido a la presencia de agentes cementantes. Las pruebas correspondientes a “Suelo alterado, sin proceso de secado” no tuvieron un proceso de secado que permitiera que el agente cementante mantuviera las partículas de suelo unidas, a diferencia del resultado mostrado en “Suelo alterado 2”, el cual presentó una mayor aproximación al de “Suelo inalterado”, en parte debido a la contribución de los agentes cementantes. La diferencia entre estas pruebas puede deberse en parte al proceso de remoldeo, ya que la estructura de suelo inalterado es mecánicamente disgregado, provocando que el cementante y otras fuerzas internas pierdan el efecto de cohesión entre las partículas del suelo en las muestras alteradas.

La Figura 7 muestra los resultados de la resistencia a la tensión de muestras alteradas con diferentes contenidos de agua mediante tres procedimientos, donde la línea (a) “Sin proceso de secado” corresponde a la prueba con variación en el contenido de agua de moldeo, la línea (b) “Con proceso de secado” muestra el comportamiento de la resistencia a la tensión durante la pérdida de agua de la muestra alterada, y la línea (c) “Con

proceso de secado y rehidratación” son los resultados obtenidos de muestras incrementando el contenido de agua después de haber sido sometida a un proceso de secado. Se puede observar que el humedecimiento tiene un pronunciado efecto en las líneas (a) y (b); sin embargo, para los resultados en muestras sometidas a secado, se observa que aun alcanzando el 100% de saturación, la resistencia a la tensión es mayor que la resistencia de las muestras que no estuvieron sometidas a secado. Esta diferencia probablemente es debida a que el efecto del cementante contenido en la muestra mantenga su fuerza de cohesión después del proceso de secado e incluso aun siendo totalmente saturada la muestra el cementante todavía mantenga algo de su adherencia entre las partículas. De los resultados observados en la línea (b), se puede observar que para una saturación entre el 90% la resistencia a la tensión alcanza un máximo y después decrece para un contenido de agua menor y que al ir disminuyendo éste la resistencia tiende a incrementarse; este comportamiento puede ser debido a la succión y al cementante del suelo, donde para las resistencias obtenidas alrededor del 90% de saturación probablemente sea la succión sea el factor principal en aportar resistencia a la tensión, y para contenidos de agua menores puede deberse al cementante.

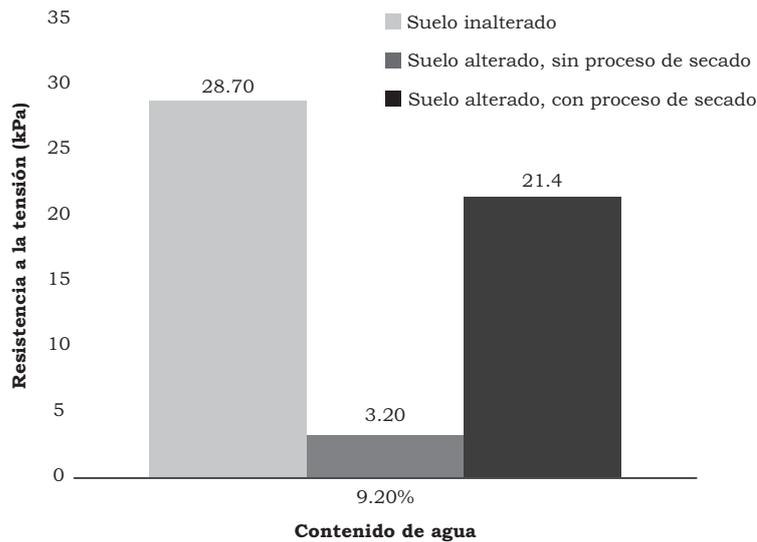


Figura 6. Comparación de las resistencias a la tensión entre muestras de suelo inalterado y alterado en igual contenido de agua.

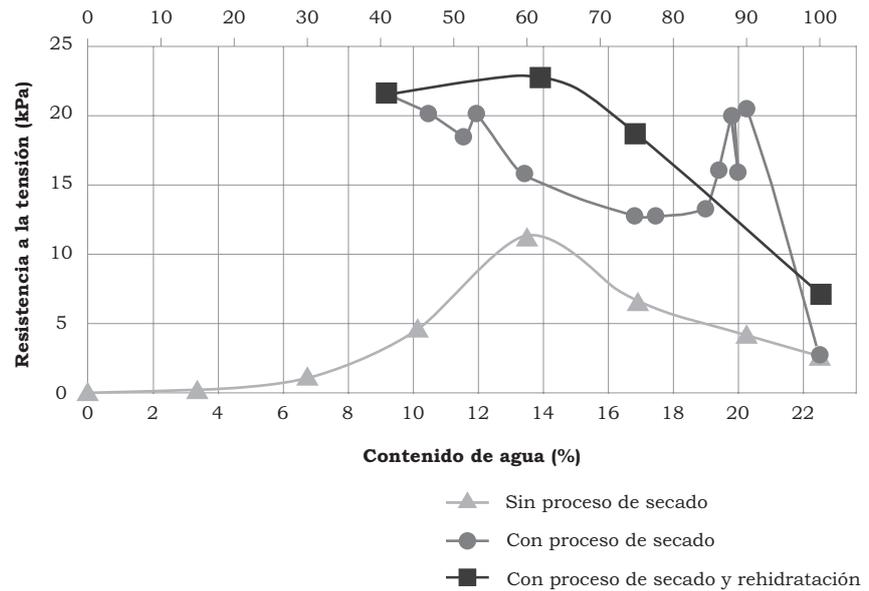


Figura 7. Comparación de la resistencia a la tensión de muestras alteradas a diferentes contenidos de agua mediante procesos diferentes.

## Conclusiones

Se realizó un estudio experimental comparativo de la resistencia a la tensión de muestras de suelo inalterado y alterado obtenido del valle de Aguascalientes. Los resultados obtenidos en muestras inalteradas fueron mayores que las resistencias a la tensión obtenidas de muestras alteradas.

Los resultados de la resistencia a la tensión de muestras alteradas sometidas a un proceso de secado fueron numéricamente más similares a los resultados obtenidos en muestras inalteradas, en gran parte debido a que el proceso de secado permitió que el agente cementante, el cual está compuesto principalmente por carbonato de calcio, mantuviera unidas las partículas de suelo.

Del comportamiento de la resistencia a la tensión en muestras alteradas variando el contenido de agua, se observa claramente que el contenido de agua influye en la resistencia a la tensión, en la que los resultados obtenidos a través de un proceso de secado pueden ser la mejor opción para conocer el comportamiento de la resistencia a la tensión variando el contenido de agua debido a que se tendría una mayor aproximación al comportamiento de un suelo inalterado.

## Bibliografía

- Fang, H.Y., Daniels, J.L. (2006). *Introductory Geotechnical Engineering: An Environmental Perspective*. Abingdon: Taylor & Francis Group.
- Ibarra, S. Y., McKyes, E., y Broughton, R. S. (2005). *Measurement of Tensile Strength of Unsaturated Sandy Loam Soil*. *Soil & Tillage Research* 81(1), 15-23.
- Kim, T.H. Hwang, C. (2003). "Modeling of tensile strength on moist granular earth material at low water content". *Engineering Geology* 69, 233-244.
- Lu, N., Wu, B., Tan, C.P. (2007). "Tensile strength characteristics of unsaturated sands". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133, 144-154.
- Munkholm, L. J., Schjønning, P., y Kay, B. D. (2002). "Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics". *Soil & Tillage Research* 64, 125-135.
- Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., Burbey, T.J., González-Cervantes, N., Ortíz-Lozano, J.A., Zermeño-De-Leon, M.E., Solís-Pinto, A. (2013). "Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México". *Engineering Geology* 164: 172-186.