



RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA AL CORTE Y LA CURVA DE RETENCIÓN AGUA-SUELO DISPERSO DE LA CIUDAD DE RIOVERDE, S. L. P., MÉXICO

RELATIONSHIP BETWEEN SHEAR STRENGTH
AND SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE OF THE
DISPERSIVE SOIL OF RIOVERDE CITY, S. L. P., MEXICO

César Augusto García Ezquivel^{1*}
Eduardo Rojas González¹
Gustavo Gallegos Fonseca²
María de la Luz Pérez Rea¹
Genoveva Hernández Padrón³

¹Universidad Autónoma de Querétaro,
Santiago de Querétaro, México

²Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, México

³Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad de México, México

*jordan_cesar23@hotmail.com

Resumen

La mecánica de suelos clásica se desarrolla con el estudio de los suelos saturados. Consustancial a esta disertación se establecen modelos constitutivos que explican el comportamiento mecánico y volumétrico de estos sistemas bifásicos, basándose en el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi. Sin embargo, gran parte de la superficie terrestre presenta suelos en estado no saturado que exhiben comportamientos inusuales. Los parámetros de resistencia al cortante que definen la envolvente de falla de los suelos no saturados son: cohesión efectiva (c'), ángulo de fricción efectivo (φ') y efecto de la succión matricial (φ_u) en la cohesión. Estos parámetros son importantes para el análisis de estabilidad de taludes y diseño de cimentaciones. En el presente artículo se exponen series de pruebas triaxiales consolidadas-drenadas a distintos grados de saturación realizadas en trayectoria de humedecimiento en un suelo con características dispersivas en la ciudad de Rioverde, San Luis Potosí; la curva de retención agua-suelo se determina para ambas trayectorias de secado y humedecimiento con la técnica de papel filtro. Los resultados se presentan en diagramas de esfuerzo efectivo contra esfuerzo desviador ($p' - q'$), esfuerzo desviador contra succión ($q' - S$), grado de saturación contra ángulo de fricción efectivo ($S_w - \varphi'$) y grado de saturación contra cohesión efectiva ($S_w - c'$). Se vislumbra que el suelo en estudio alcanza una resistencia máxima para una succión de 2000 kPa y se reduce en 60 % para valores mayores de succión.

Palabras clave: curva de retención agua-suelo, esfuerzos efectivos, GEO, pruebas triaxiales CD, succión matricial, suelos no saturados.



Abstract

Classical soil mechanics is developed with the study of saturated soils. With it, constitutive models are established that can explain the mechanical and volumetric behavior of these two-phase systems based on Terzaghi's effective stress principle. However, in a large part of the earth's surface there are soils in an unsaturated state that present unusual behaviors. The shear strength parameters that define the failure envelope of unsaturated soils are: effective cohesion (c'), effective friction angle (φ') and change in shear resistance generated by change in matric suction. (φ_b). These parameters are important for slope stability analysis and foundation design. This article presents a series of Consolidated-Drained triaxial tests at different degrees of saturation, which were carried out in a wetting trajectory in a soil with dispersive characteristics in the city of Rioverde, S.L.P., México. The water-soil retention curve is determined for both drying and wetting trajectories with the filter paper technique. The results are presented in diagrams of effective stress vs deviator stress ($p' - q'$), deviator stress vs suction ($q' - S$), degree of saturation vs effective friction angle ($S_w - \varphi'$) and degree of saturation vs effective cohesion ($S_w - c'$). It is observed that the soil under study reaches a maximum resistance for a suction of 2000 kPa and is reduced by 60% for higher suction values.

Keywords: soil-water retention curve, effective stress, GEO, triaxial test CD, matric suction, unsaturated soils.



Introducción

El desarrollo de la mecánica de suelos clásica se ha concentrado en el estudio de los suelos saturados, debido al estado saturado que constituye el estado crítico en cuanto a resistencia y asentamientos para los suelos. Otra causa es la practicidad de estudio de la condición bifásica en comparación con la trifásica.

Los suelos saturados son considerados sistemas bifásicos en los cuales los vacíos entre las partículas están ocupados por líquido, por lo que las fases que constituyen este sistema son: líquida (agua) y sólida (partículas de suelo) como muestra la Figura 1.

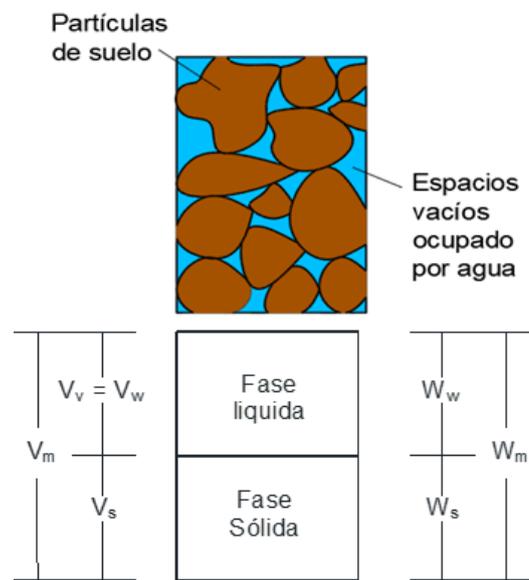


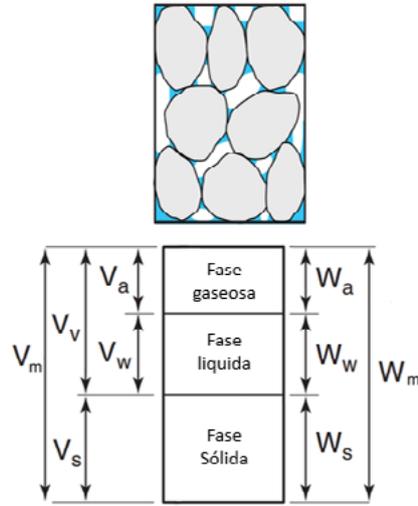
FIGURA 1.
Fases de un suelo saturado.

En 1923, Terzaghi formuló el principio de esfuerzos efectivos para este tipo de suelos, estos controlan el comportamiento mecánico de los mismos, como la resistencia al cortante y los cambios de volumen que se presentan durante procesos de consolidación [1]. La ecuación de esfuerzos efectivos para suelos saturados se escribe en (1), donde el esfuerzo efectivo (σ') es definido como el exceso de esfuerzo total aplicado (σ) sobre la presión de agua en los poros (u_w). Dicho en otras palabras, el esfuerzo efectivo es aquel que actúa solamente en la fase sólida del suelo.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (1)$$

Empero, gran parte de la población mundial habita centros urbanos donde predominan suelos con niveles freáticos profundos y los vacíos del suelo no se encuentran totalmente ocupados por agua [2]. A estos suelos se les denomina suelos no saturados o parcialmente saturados, los cuales cuentan con tres fases: sólida, líquida y gaseosa (aire y vapor de agua) como se muestra en la Figura 2.

FIGURA 2. Fases de un suelo no saturado [3].



En términos de resistencia al esfuerzo cortante en suelos no saturados, existen tres parámetros necesarios para definir su envolvente de falla: cohesión efectiva (c'), ángulo de fricción efectivo (φ') y cambio de la resistencia al corte generado por cambio en la succión matricial (φ_b). Los parámetros de resistencia al corte son importantes para el análisis de estabilidad de taludes y diseño de cimentaciones [4].

El análisis de esfuerzo efectivo para un suelo no saturado es presentado en (2) como una extensión de la teoría de suelos saturados por Bishop (1959). Abarca un parámetro χ relacionado al grado de saturación del suelo y también incluye la presión en la fase gaseosa del suelo (u_a) [5].

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad (2)$$

En la ecuación anterior, el parámetro χ asume valores de 0 a 1, siendo nulo para suelos secos y 1 para suelos saturados, en cuyo caso la expresión equivale a la ecuación de Terzaghi. La diferencia $u_a - u_w$ corresponde a la succión matricial en los poros, que contribuye al incremento de la resistencia al esfuerzo cortante de suelos finos [6]. En suelos saturados la succión es igual a 0, y varía conforme a la sequedad del suelo en un rango de 0 a 1 GPa [7]. Esta variación afecta el comportamiento mecánico y volumétrico de los suelos no saturados.

La curva de retención agua-suelo (CRAS), también conocida como la curva característica agua-suelo, describe la cantidad de agua retenida en el suelo bajo equilibrio para una succión matricial dada [8]. Generalmente se usa el contenido volumétrico de agua (θ), no obstante, en la práctica de ingeniería geotécnica se utiliza el grado de saturación (S_w), el cual indica el porcentaje de espacios que están ocupados por agua.

La succión actúa un papel complejo en los suelos, ya que para un mismo grado de saturación se presentan valores distintos durante condiciones



de secado o humedecimiento, esto se debe al fenómeno de histéresis [9]. Este fenómeno puede atribuirse a la irregularidad de la geometría de los poros, el efecto del ángulo de contacto de los meniscos de agua, el aire atrapado y la expansión o contracción [10].

En este artículo se presentan resultados experimentales de laboratorio, en los que se observa la resistencia al esfuerzo cortante a distintos grados de saturación. Como objeto de estudio fue seleccionada la ciudad de Rioverde, ubicada en San Luis Potosí, dado que su suelo presenta características dispersivas. El objetivo es determinar la relación que ostenta la succión en la resistencia de este tipo de material.

Materiales y métodos

El suelo de Rioverde (S.L.P.) ofrece un limo inorgánico de alta plasticidad (MH) con características dispersivas, cuyas propiedades índices han sido determinadas en [11]. La mineralogía establecida por difracción de rayos X (DRX) indica la presencia de yeso y sodio.

La experimentación se realizó en dos etapas. La primera estipula el comportamiento hidráulico del suelo por medio del CRAS; para expresar la curva se midió la succión (S) del suelo mediante la técnica del papel filtro [12]. Esta prueba se realiza para la trayectoria de humedecimiento y secado, con la finalidad de obtener valores de succión para el fenómeno de histéresis en el suelo dispersivo. La segunda etapa calcula la resistencia al esfuerzo cortante por medio de pruebas triaxiales consolidadas-drenadas (CD), de acuerdo con la norma ASTM D7181 [13]. Estas pruebas resultan pertinentes debido a que los esfuerzos totales son iguales a los efectivos, ya que la velocidad de aplicación de carga es lenta respecto a la capacidad de drenaje del suelo, por tanto, no se genera presión de poro ($\delta_u = 0$).

Las probetas para la prueba triaxial se fabricaron en un molde cilíndrico de 3.71 cm de diámetro y 7.42 cm de altura. Se compactaron en una prensa manual en tres capas hasta lograr replicar el peso volumétrico seco del material en campo; el anclaje entre capas es viable mediante el método de escarificación. Los instrumentos se prepararon a grados de saturación de 0, 30, 50, 65, 80 y 100 % siguiendo una trayectoria de humedecimiento. En cada experimento se ensayaron tres probetas se aplicaron esfuerzos de confinamiento de 10.00, 20.00 y 30.00 Ton/m². Se realizan dos réplicas de cada prueba.

“...En el presente artículo se exponen series de pruebas triaxiales consolidadas-drenadas a distintos grados de saturación realizadas en trayectoria de humedecimiento en un suelo con características dispersivas en la ciudad de Rioverde, San Luis Potosí.



Los resultados se presentan en diagramas de esfuerzo efectivo contra esfuerzo desviador ($p' - q'$), esfuerzo desviador contra succión ($q' - S$), grado de saturación contra ángulo de fricción efectivo ($S_w - \phi'$) y grado de saturación contra cohesión efectiva ($S_w - c'$).

Resultados y discusión

TABLA 1. Propiedades geotécnicas del suelo de la ciudad de Rioverde S.L.P. [11].

Las propiedades geotécnicas y dispersivas del suelo de la ciudad de Rioverde se muestran en las Tablas 1 y 2 respectivamente. Se puede observar que el suelo corresponde a un limo inorgánico de alta compresibilidad (MH) y presenta un grado de dispersión intermedio, con un peso volumétrico de 1.62 g/cm^3 a un contenido de humedad de 33.21% , densidad seca de 1.21 g/cm^3 y gravedad específica de 3.25 .

Si el suelo cuenta con características dispersivas, es susceptible de presentar colapso por la inestabilidad estructural que adquiere al entrar en contacto con el agua, ya que las partículas de suelo se repelen entre sí debido a la presencia del sodio intercambiable en su estructura.

PROPIEDADES	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Gravas	G	%	0.00
Arenas	S	%	2.62
Limos	M	%	87.44
Arcillas	C	%	9.94
Limite líquido (cono inglés)	ll	%	60.55
Limite líquido (copa de Casagrande)	ll	%	55.30
Limite plástico	lp	%	48.98
Índice de plasticidad (cono inglés)	pi	%	11.57
Índice de plasticidad (copa de Casagrande)	pi	%	6.32
Contracción lineal	ls	%	3.71
Contracción volumétrica	vs	%	11.62
Clasificación del suelo			mh
Contenido de humedad natural	ω	%	33.21
Peso volumétrico	γ_m	g/cm^3	1.62
Peso volumétrico seco	γ_d	g/cm^3	1.21
Gravedad específica	S_s		3.25

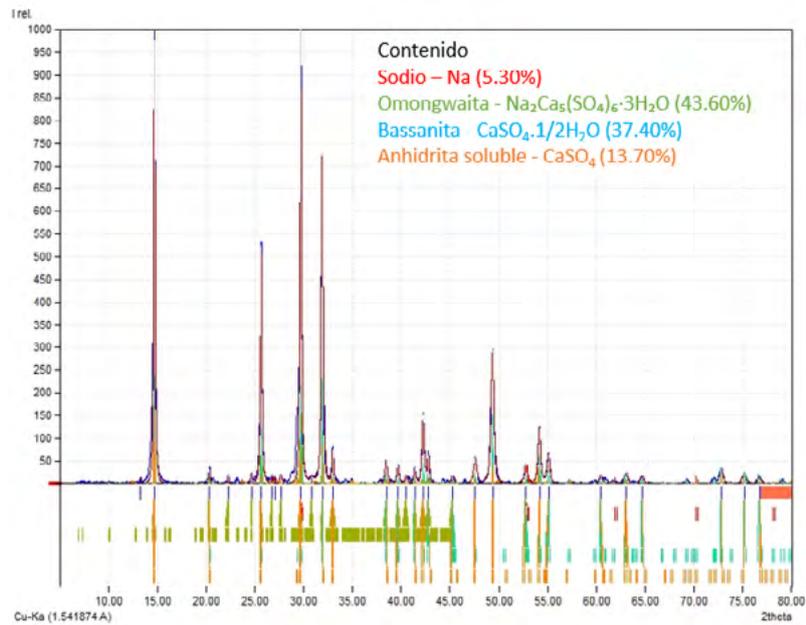


TABLA 2.
Propiedades geotécnicas del suelo de la ciudad de Rioverde, S. L. P. Obtenido de pruebas físicas especiales [11].

FIGURA 3. Análisis mineralógico por difracción de rayos X del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P., México.

PRUEBA	GRADO DE DISPERSIÓN
Crumb	Intermedio
Doble Hidrómetro	Dispersivo
Pinhole	Intermedio
Dictamen Final	Intermedio

En la Figura 3 se muestra el difractograma resultante del análisis de DRX, se observa que el suelo se compone de 43.60 % omongwaita, 37.40 % bassanita, 13.70 % anhidrita soluble y 5.30 % sodio. La anhidrita es un mineral común en depósitos de sal que, junto con la bassanita, al hidratarse se transforman en yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Por otro lado, la omongwaita es un mineral con una estructura similar a la bassanita que se puede encontrar como pequeñas inclusiones en el yeso.



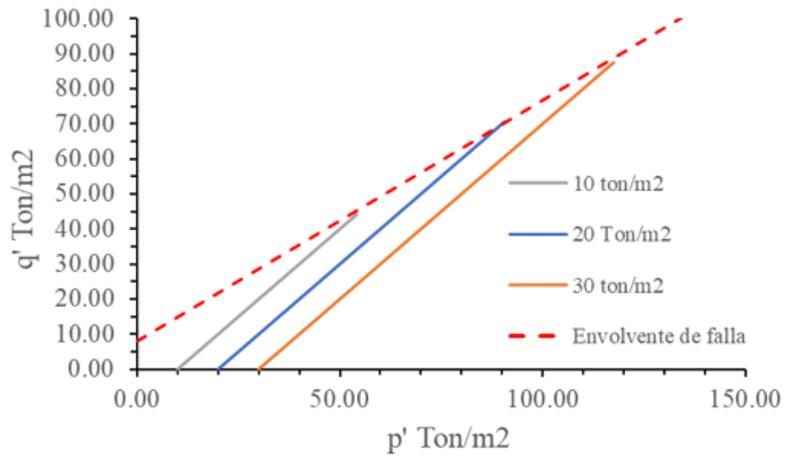
El método del papel filtro es una técnica económica que permite medir la succión en un rango de 0.01 a 100 mpa. Sin embargo, la precisión de los resultados dependerá de la adecuada medición de la humedad del papel filtro. No se debe dejar expuesto demasiado tiempo durante la medición, dado que se pueden presentar pérdidas de humedad, lo cual hace que la succión varíe drásticamente.

Las curvas de retención de agua del suelo estudiado se obtuvieron en trayectoria de secado y humedecimiento (Figura 4). Se observa:

1. La succión aumenta de manera no lineal hasta presentar valores de 208 mpa a un grado de saturación de 0 %.
2. El suelo presenta valores mayores de succión para la trayectoria de secado a comparación del humedecimiento.

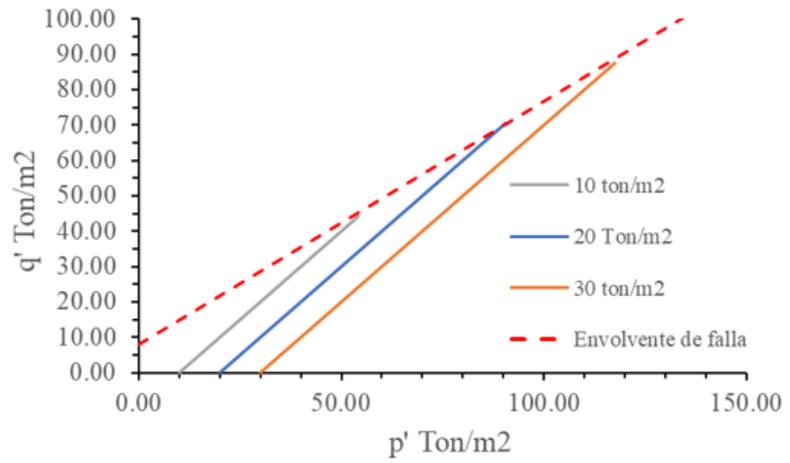


FIGURA 4. CRAS para la trayectoria de secado y humedecimiento del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P.

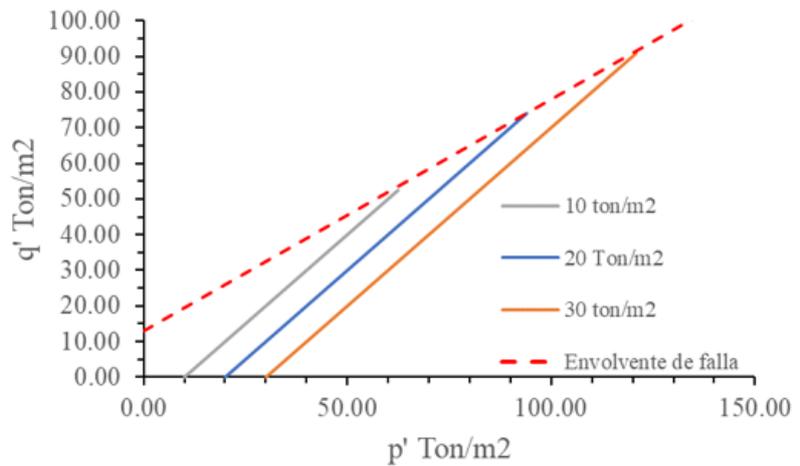


Los diagramas de esfuerzo efectivo contra esfuerzo desviador ($p' - q'$), obtenidos de las pruebas triaxiales CD a grados de saturación de 0, 30, 50, 65, 80 y 100 %, se muestran en las Figuras 5 a 10.

FIGURA 5. Diagramas $p' - q'$ de pruebas triaxiales CD ensayadas a $S_w = 0\%$.
a) Réplica 1,
b) Réplica 2.



a)



a)



FIGURA 6. Diagramas p' - q' de pruebas triaxiales CD ensayadas a $S_w = 30\%$.
a) Réplica 1,
b) Réplica 2.

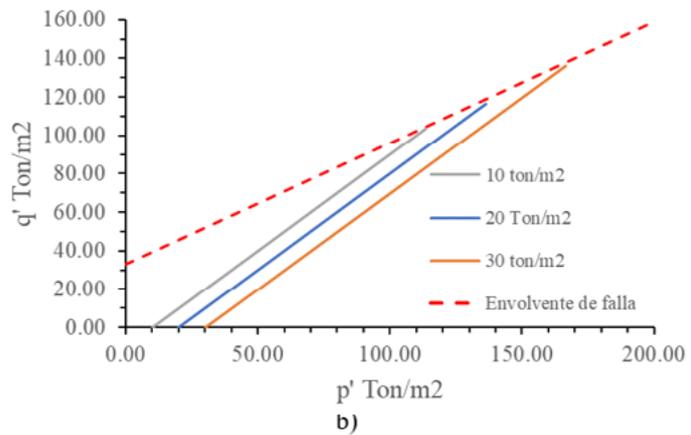
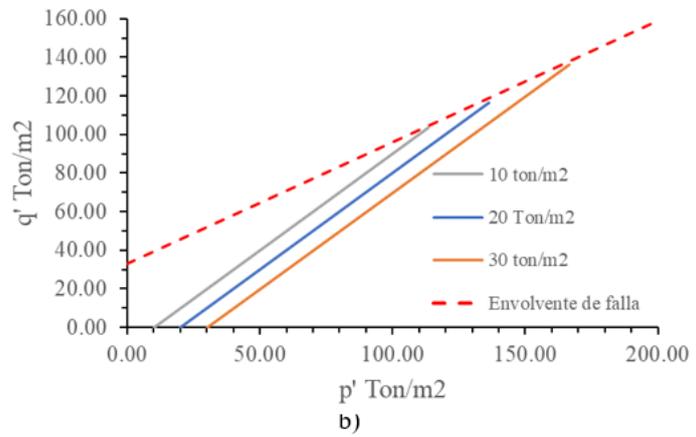
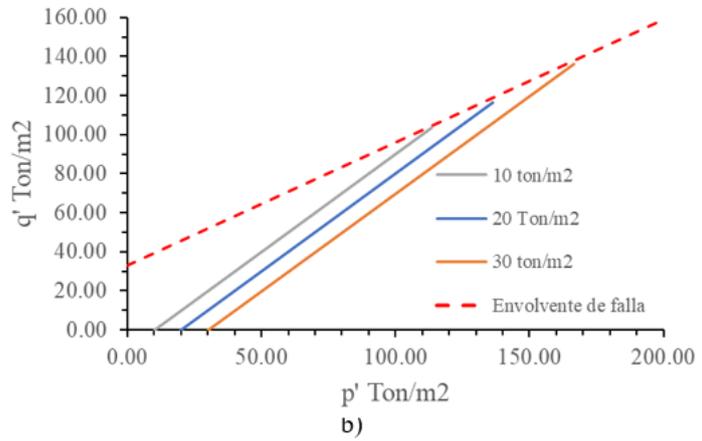
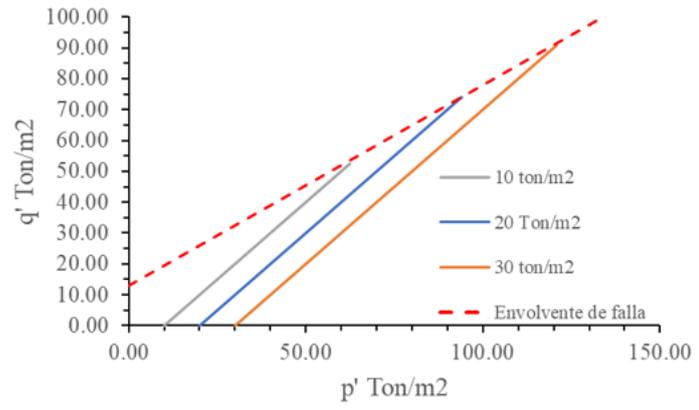


FIGURA 7. Diagramas p' - q' de pruebas triaxiales CD ensayadas a $S_w = 50\%$.
a) Réplica 1
b) Réplica 2.



FIGURA 8. Diagramas p' - q' de pruebas triaxiales CD ensayadas a $S_w = 65\%$.

- a) Réplica 1
- b) Réplica 2.

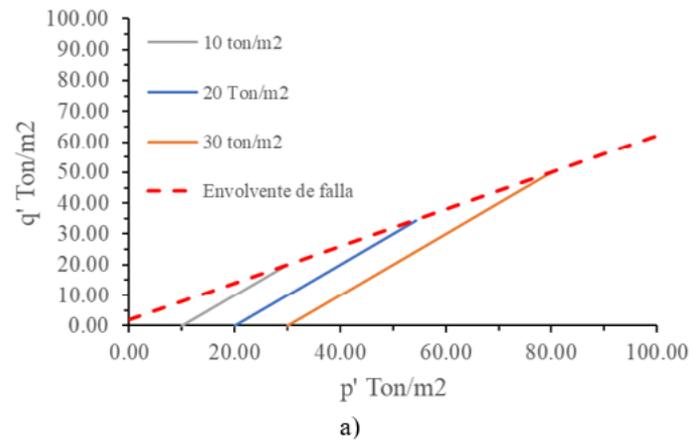
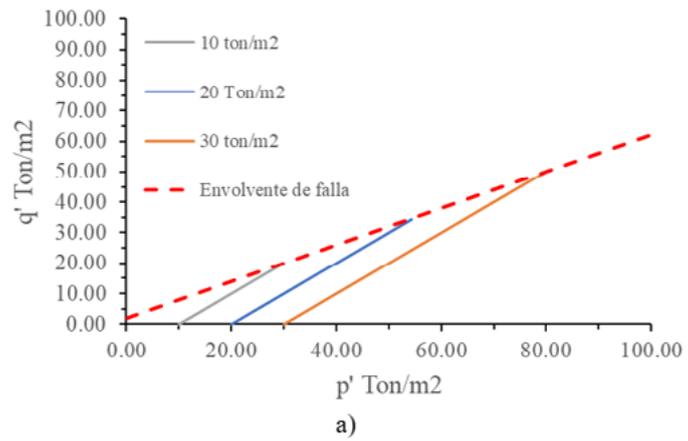
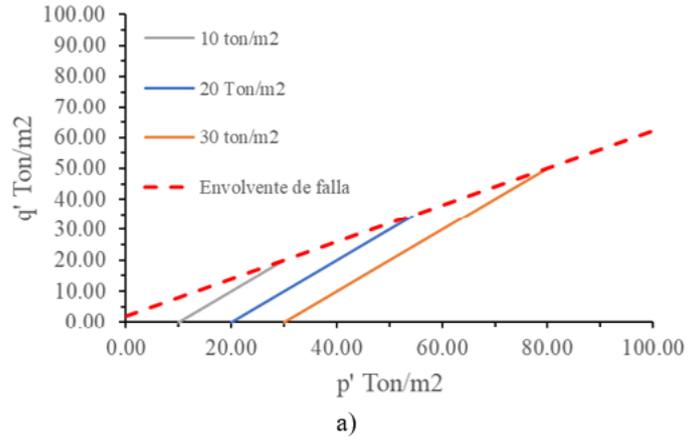


FIGURA 9. Diagramas p' - q' de pruebas triaxiales CD ensayadas a $S_w = 80\%$.

- a) Réplica 1,
- b) Réplica 2.

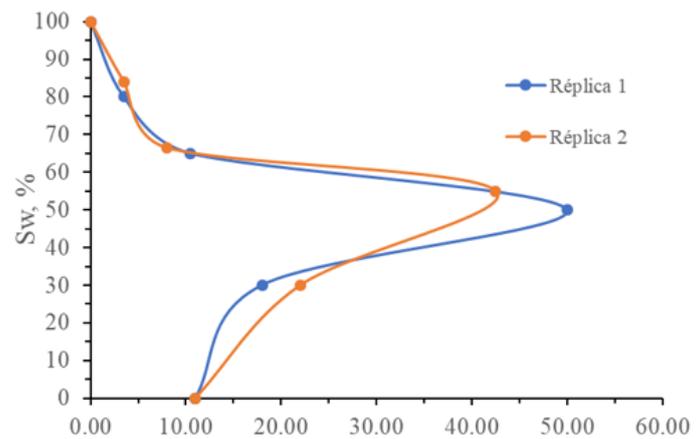
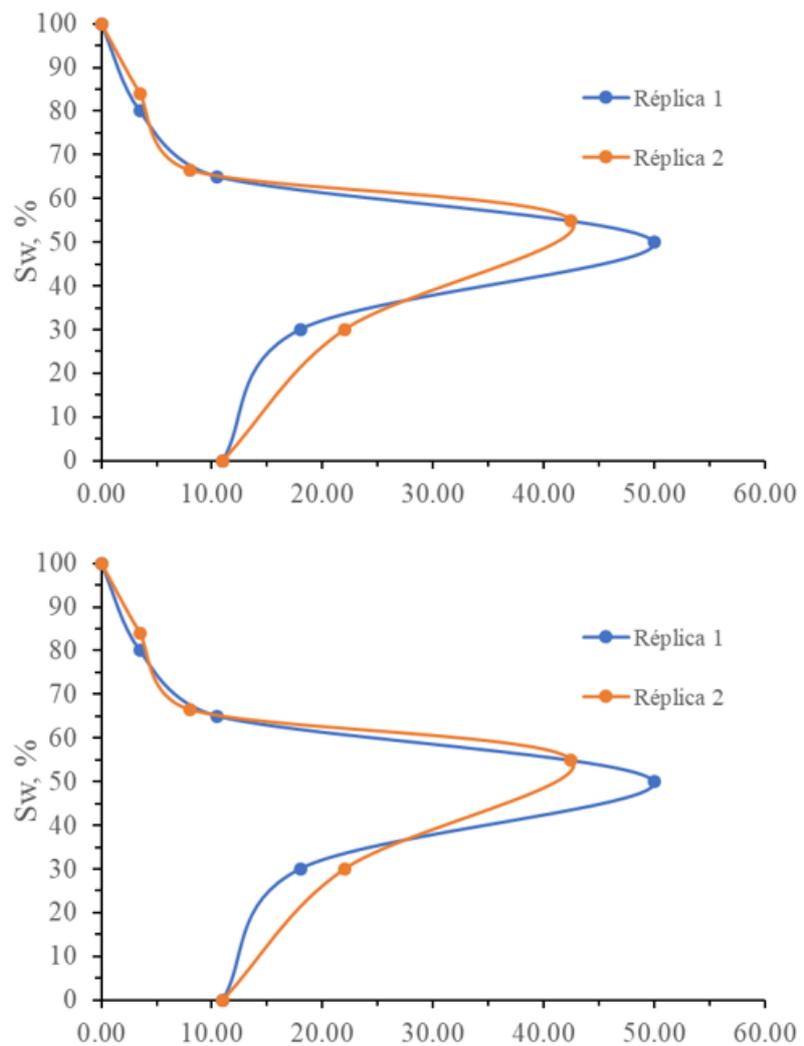




FIGURA 10. Diagramas p' - q' de pruebas triaxiales CD ensayadas a $S_w = 100\%$.
a) Réplica 1,
b) Réplica 2.



El análisis de los resultados de las pruebas triaxiales CD se basa en la suposición de que no se presentan cambios significativos de succión en las probetas ensayadas durante la etapa de falla. De los diagramas p' - q' (Figuras 5-10) se calcula el ángulo de fricción efectivo y la cohesión efectiva, y posteriormente se grafican contra el grado de saturación. Los diagramas $S_w - \phi'$ y $S_w - c'$ se muestran en las Figuras 11A y 11B respectivamente. En A se observa que ϕ' se reduce de manera prácticamente lineal conforme el suelo se va saturando, teniendo valores en un rango de 33 a 42° . Este efecto puede estar ligado a la presencia del sodio y al correspondiente comportamiento dispersivo del suelo. En B se observa que la cohesión se reduce de 50 Ton/m^2 a 10.50 Ton/m^2 cuando pasa de un grado de saturación de 55 a 65% . Este comportamiento es típico de los limos, que, al igual que las arenas, presentan un máximo de cohesión. No obstante, en este caso la presencia de arcillas impide que la cohesión llegue a cero durante el secado.

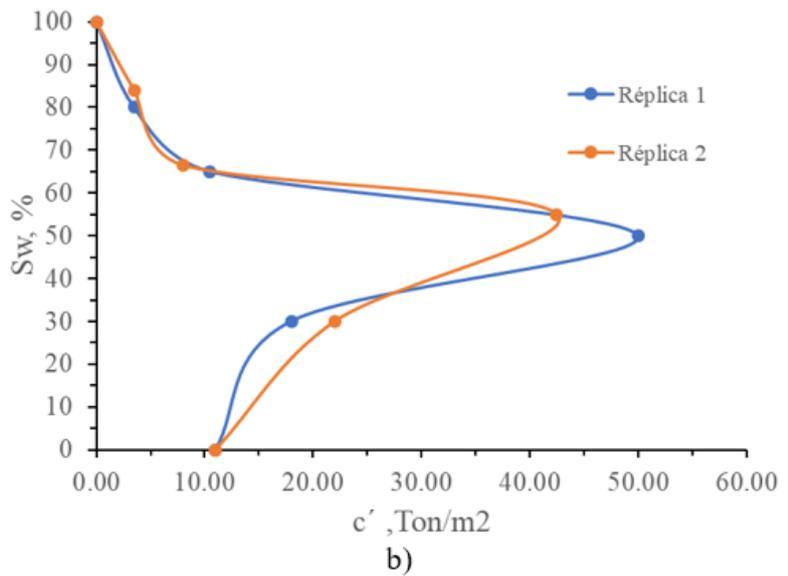
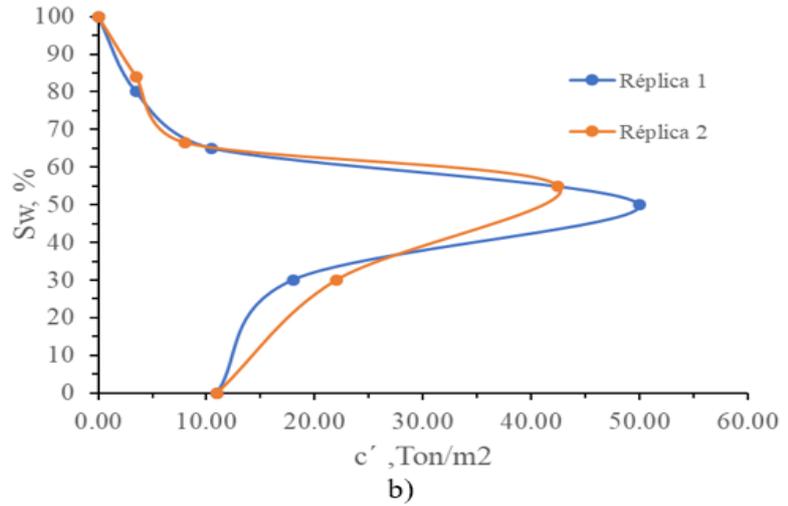


FIGURA 11.

- a) Diagrama $S_w - \phi'$,
- b) Diagrama $S_w - c'$.

Se determina el valor máximo de q' en cada prueba y se grafica contra la succión correspondiente al grado de saturación, tal como se muestra en la Figura 12. Se observa que la resistencia al cortante se mantiene aproximadamente constante hasta succiones de 100 kPa. Posteriormente, la resistencia se incrementa con rapidez hasta llegar a un valor máximo con una succión de 2000 kPa. Por último, la resistencia se reduce en un 60 % para succiones mayores a 10 000 kPa.

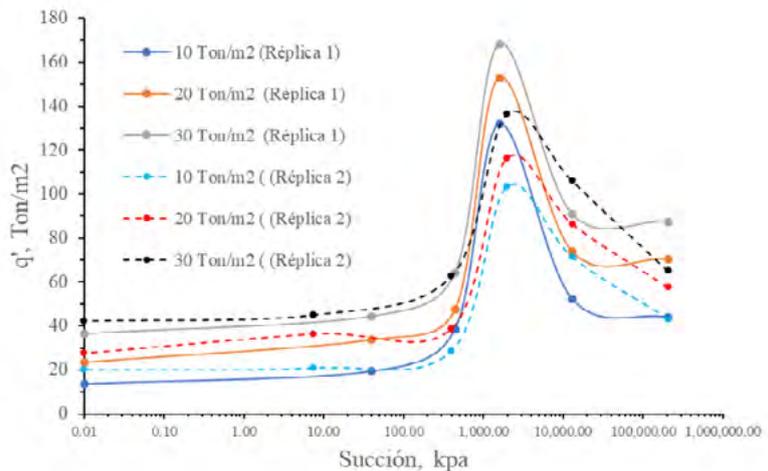
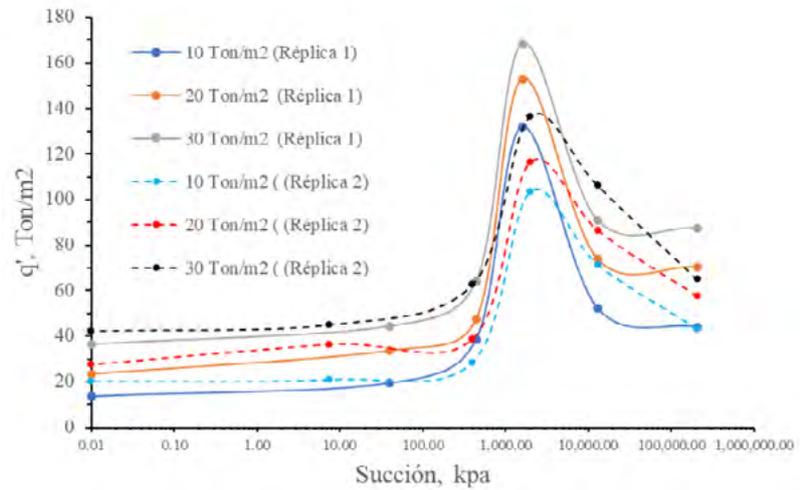


FIGURA 12. Diagrama $q' - S$ para la trayectoria de humedecimiento del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S. L. P.



FIGURA 12. Diagrama q' - S para la trayectoria de humedecimiento del suelo dispersivo de la ciudad de Rioverde, S.L.P.



Conclusiones

La dispersividad del suelo de la ciudad de Rioverde, S.L.P., México se ve reflejada en una disminución prácticamente lineal del ángulo de fricción del suelo al aumentar el grado de saturación de 0 a 100 %.

El suelo dispersivo en estudio alcanza un valor de resistencia máximo para cierta succión y posteriormente se reduce para succiones mayores, lo cual se debe a la combinación de la reducción del ángulo de fricción y de un máximo de cohesión conforme se incrementa el grado de saturación. Estos casos no han sido completamente documentados y analizados en la literatura, ya que, en general, la succión incrementa la resistencia al corte de un suelo no saturado. En el caso del suelo estudiado la presencia de sodio y yeso, además de un porcentaje reducido de arcilla (10 %), puede estar detrás de este comportamiento. Actualmente se planean algunos ensayos adicionales que permitan dilucidar este fenómeno.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología y a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo económico brindado en concepto de beca de Maestría.

Referencias

- [1] J. Leal Vaca, G. Gallegos Fonseca, y E. Rojas González, "Estimación de esfuerzos efectivos a partir del parámetro χ de Bishop en una arena limosa", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 14, pp. 139-151, 2013. DOI: 10.1016/S1405-7743(13)72232-7.



- [2] M. A. Alfaro Soto, "Geotecnia en suelos no saturados", *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 32, no. 125, pp. 471-481, 2008.
- [3] J. L. Briaud, "Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils", Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2013.
- [4] T. Mohammad, B. Huat, F. Ali, y H. S, "Relationship Between Shear Strength and Soil Water Characteristic Curve of an Unsaturated Granitic Residual Soil", *American Journal Environmental Sciences*, vol. 2, no. 4, 2006. DOI: 10.3844/ajes-sp.2006.142.145.
- [5] J. Burland y J. Jennings, "Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils", *Géotechnique*, vol. 12, no. 2, pp. 125-144, 1962. DOI: 10.1680/geot.1962.12.2.125.
- [6] N. Lu y W. Likos, "Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, no. 2, 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:2(131).
- [7] C. I. Verdin Montes, "Modelación de Suelos Expansivos Mediante Esfuerzos Efectivos", Tesis de maestría, Fac. Ing., UAQ, Querétaro, 2018.
- [8] M. Tuller y D. Or, "Retention of Water in Soil and the Soil Water Characteristic Curve", *Encyclopedia of Soils in the Environment*, vol. 4. pp. 278-289, 2004.
- [9] W. Albadri, M. J. Noor, y I. Alhani, "The Relationship Between the Shear Strength and Water Retention Curve of Unsaturated Sand at Different Hydraulic Phases", *Acta Geotechnica*, vol. 16, no. 4, pp. 1-15, 2021. DOI: 10.1007/s11440-021-01189-7.
- [10] J. Ramírez Jiménez, "Influencia de los Ciclos de Histéresis en el Comportamiento Mecánico de un Suelo No Saturado", Tesis de maestría, Fac. Ing., UAQ, Querétaro, 2020.
- [11] C. A. Garcia Ezquivel, E. Rojas González, y G. Gallejos Fonseca, "Determination of the dispersive properties of the soil of Rioverde city, Mexico", *Memorias del XIX Congreso Internacional de Ingeniería*, 2023.
- [12] *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*, ASTM D5298-10, ASTM International, 2010. [En línea] Disponible en: <https://www.astm.org/d5298-10.html>
- [13] *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*, ASTM D7181-11, ASTM International, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/77789/ec3d78304f8d44219a9620acad-d522ee/ASTM-D7181-11.pdf>