

Influencia de la humedad en el comportamiento de la resistencia al esfuerzo cortante en arcillas expansivas

Alejandro García-Elías¹, Armando Aguilar-Meléndez¹, Alejandro Córdova-Ceballos¹, José L. Sánchez-Amador¹, Israel Hernández-Bautista¹, Israel Hernández-Romero²

Facultad de Ingeniería Civil¹, Facultad de Ciencias Químicas²
Universidad Veracruzana
Poza Rica, Ver., México

[alejagarcia, armaguilar, acordova, jossanchez, ishernandez]@uv.mx, zs11005559@estudiantes.uv.mx

Abstract— In the present document a correlation between the resistance to the shear stress in expansive clays of the southeast area of the city of Poza Rica of Hidalgo Veracruz, and the natural humidity is presented. The study was carried out through the test of the vane, due to the fact that it is a practical method to know the resistance to the shear stress for cohesive soils. This is an "in situ" method that it does not require to extract unaffected samples. The investigation was made in 15 places of the area mentioned before, with the purpose of determining the correlation between the natural humidity and the resistance to the shear stress.

Keyword— *Resistance to the shear stress, clays, expansive clays, vane, natural humidity.*

Resumen— En el presente documento se muestra la correlación entre la resistencia al esfuerzo cortante en arcillas expansivas, de la zona sureste de la ciudad de Poza Rica de Hidalgo Veracruz, y la humedad natural. El estudio se realizó a través de la prueba de la veleta, por lo práctico que resulta este método para suelos cohesivos y porque se puede realizarse "in situ" sin la necesidad de extraer muestras inalteradas. La investigación se efectuó en 15 sitios de la zona antes mencionada, con el propósito de determinar la correlación entre la humedad natural y la resistencia al esfuerzo cortante.

Palabras claves— *Resistencia al esfuerzo cortante, arcillas, arcilla expansiva, veleta, humedad natural.*

I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las propiedades de los suelos es de suma importancia para el correcto análisis y diseño de cimentaciones, muros de contención y la estabilidad de taludes, principalmente. Una de estas propiedades del suelo, es el esfuerzo cortante, parámetro que debe tenerse presente, debido a que nos indica cuál es la carga límite que este suelo puede soportar hasta ceder y dejar de funcionar de manera favorable.

En base a investigaciones realizadas por la Universidad Veracruzana, se tiene el conocimiento que en la ciudad de Poza Rica de Hgo. Ver., existen suelos arcillosos expansivos, los cuales provocan diversos problemas en las construcciones, principalmente en estructuras ligeras. Estos suelos se caracterizan por las diferentes variaciones de volumen que presentan (expansión – contracción), como consecuencia de los cambios de humedad, pero durante este proceso de cambio de humedad la resistencia al esfuerzo cortante también se ve afectada. Por lo anterior, en el presente trabajo se estudió la correlación entre la humedad y la resistencia al esfuerzo cortante.

En algunas arcillas y lutitas laminares, el aumento de volumen causado por la reducción del esfuerzo, es de tal magnitud, que tiene la capacidad de romper carreteras y estructuras. Así mismo, si la humedad de este suelo se mantiene normalmente bajo, por ejemplo debido a la aridez del lugar, la reducción en la rapidez de la evaporación, causada por la presencia de la losa de un edificio, puede conducir a la acumulación de humedad y a una expansión de gran intensidad [1].

Cabe resaltar que la gran mayoría de las construcciones de interés social en la región de Poza Rica son de uno o dos niveles, y con mucha frecuencia para esas viviendas no se realizaron estudios de mecánica de suelos, por razones económicas, o bien, por menospreciar o desconocer la importancia de tales estudios. Luego entonces la variación de los esfuerzos no fueron adecuadamente considerados en la etapa de diseño y construcción [2].

Valorar o determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos se puede decir que compone una de las partes fundamentales de toda la Mecánica de Suelos. Por lo anterior, se puede inferir que una valoración correcta de este parámetro constituye un paso previo imprescindible, para intentar con esperanzas de éxito, cualquier aplicación de la Mecánica de suelos, sobre todo en el análisis de estabilidad de obras civiles [3].

El conocimiento de la resistencia al esfuerzo cortante en el suelo arcilloso expansivo podrá ser de gran utilidad, para quienes se dedican al campo de la construcción, ya que podrá servir como referencia a tomarse en cuenta, para poder realizar el correcto diseño de las diferentes estructuras, que tengan una relación con el suelo.

A. Región de estudio

Para un estudio más preciso, fue necesaria la determinación del área de estudio, mismo que comprende la zona sureste de la ciudad de Poza Rica (figura 1 y 2). La elección de dicha zona, se basa en las diferentes investigaciones realizadas y publicadas por académicos de la Universidad Veracruzana, principalmente de la Facultad de Ingeniería Civil, del cual ya se tiene evidencia de la presencia de suelos expansivos.

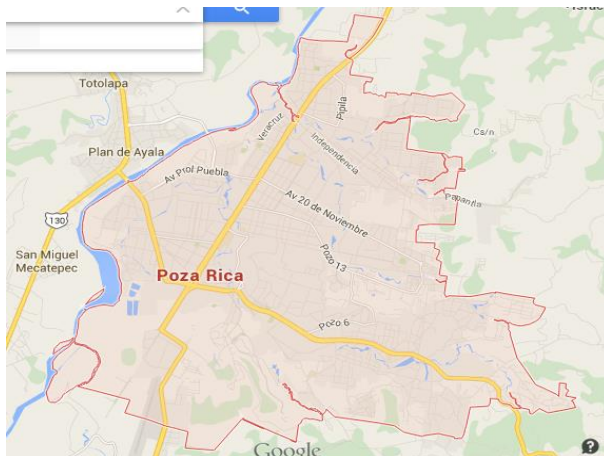


Fig. 1. Poza Rica, Ver., fuente: Google maps.

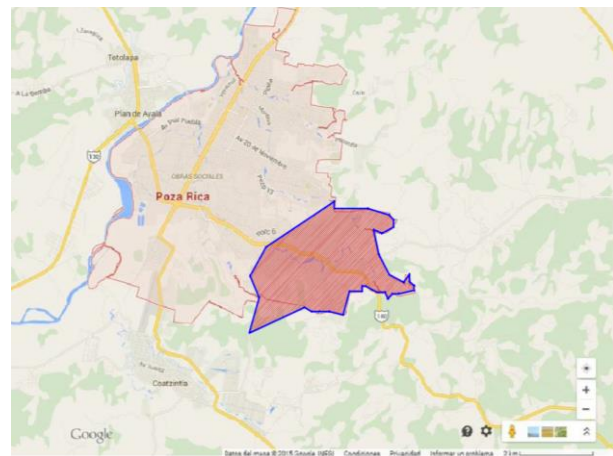


Fig. 2. Zona de estudio, fuente: Google maps.

II. MARCO TEÓRICO

Por resistencia al corte o resistencia al esfuerzo cortante puede entenderse como el valor máximo o límite, de la resistencia al corte que se le pueda inducir dentro de su masa, esto antes de que ceda provocando que la estructura falle [4].

Otra manera de definir lo anterior sería como la última o máxima resistencia que el suelo puede soportar. Específicamente, se ha interpretado como la resistencia interna que ofrece la masa de suelo por área unitaria para resistir la falla al deslizamiento a lo largo de cualquier plano (conocido como plano de falla) dentro de él [5].

A. Teoría de Ruptura Mohr-Coulomb

En la actualidad, la Mecánica de Suelos considera a la teoría de falla como la combinación de dos teorías clásicas algo diferentes. La primera establecida en 1773 por Coulomb, en la cual menciona que un material falla cuando el esfuerzo cortante actuante en un elemento plano a través de un suelo, alcanza el valor representado por la siguiente expresión:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \theta \quad (1)$$

donde:

τ_f = Esfuerzo cortante actuante, final o de falla.

c = Cohesión

θ = Ángulo de fricción interna del suelo

La otra teoría es la propuesta por Mohr, la cual establece que, en general, la falla por deslizamiento ocurrirá a lo largo de la superficie particular, en la que la relación del esfuerzo tangencial o cortante al normal (oblicuidad) alcance un cierto valor máximo. Dicho valor máximo fue postulado por Mohr como una función tanto del acomodo y forma de las partículas del suelo, como la del coeficiente de fricción entre ellas. Matemáticamente la condición de falla puede establecerse como se indica en la Ec. 2 [6].

$$\tau_f = \sigma \tan \theta \quad (2)$$

De manera original, Mohr estableció su teoría pensando sobre todo en suelos granulares, mientras que Coulomb propuso la ecuación Ec. 1, como criterio de falla para suelos cohesivos que comprenden a los suelos granulares como un caso particular, en el que la resistencia al esfuerzo cortante es cero para un esfuerzo normal actuante nulo; esto equivale a particularizar la ecuación Ec. 1 del caso $C=0$. En rigor la diferencia esencial entre la teoría de Mohr y de Coulomb estriba en que para el primero el valor de θ no debe ser necesariamente constante. En tanto que en una representación con esfuerzos normales en el eje de las abscisas y tangenciales en el eje de las ordenadas, la Ec. 1 quedará representada por una línea recta, la Ec. 2 quedará representada por una línea curva, que sólo como caso particular podrá ser recta.

Hoy en día la Mecánica de Suelos utiliza generalmente el criterio de falla, es decir el de Mohr-Coulomb, atribuyendo la falla al esfuerzo cortante y aceptando que este depende del esfuerzo normal actuante en el plano de falla, pero se acepta también que la relación entre ambos esfuerzos no es constante. La teoría de Coulomb, que resulta ahora un caso particular de la generalizada de Mohr-Coulomb, puede ser suficientemente satisfactoria en muchos problemas de esfuerzos bajos y a los suelos plásticos saturados y normalmente consolidados. En los suelos plásticos no saturados o preconsolidados, la generalización que representa el criterio de Mohr resulta adecuado [3].

Cabe recalcar que la teoría de falla de Mohr-Coulomb representada por la ecuación no. 1, permite en general, llegar a resultados bastante satisfactorios en las aplicaciones de la Mecánica de Suelos a los problemas prácticos, pero sin duda no es una teoría perfecta en el sentido de que no permite predecir todas las fallas observadas, ni explica toda la evidencia experimental disponible [6].

B. Determinación del esfuerzo cortante en arcillas

Para la determinación del esfuerzo cortante existen diferentes métodos y procedimientos para su obtención, entre las más comunes son:

- Prueba de corte directo: En esta prueba se valoran de manera directa los esfuerzos normal y de corte en el plano de falla; cortando un prisma rectangular de una muestra de suelo que posteriormente se introduce con precisión en una caja metálica dividida en dos mitades horizontales, se coloca en forma de emparedado entre dos placas metálicas acanaladas y dos

pedras porosas. Colocando en la parte superior una almohadilla de presión y una caja externa. Después se aplica una carga vertical sobre el suelo, haciendo uso de un suspensor estático de pesas. Finalmente, se somete a la acción del corte mediante una fuerza horizontal a una velocidad de deformación constante. El procedimiento anterior se repite al menos en cuatro o cinco especímenes tomados de la misma muestra. Se calculan y se grafican los valores de los esfuerzos antes mencionados [4].

- Prueba triaxial: Esta prueba es aplicable en arcillas y arenas. Y consiste en colocar una muestra de suelo dentro de una membrana de hule en una cámara de apariencia transparente. A la cual se le aplica una presión de confinamiento (σ_3) alrededor de la muestra por medio del fluido en la cámara. Un esfuerzo adicional puede aplicarse a la muestra en la dirección axial para provocar la falla ($\Delta\sigma = \Delta\sigma_f$). Así también de acuerdo al drenaje del espécimen puede ser permitido o detenido, la cual depende sumamente de las condiciones de la prueba. En el caso particular de las arcillas existen tres tipos de pruebas que son posibles determinar con este método. Prueba consolidada drenada (prueba CD), Prueba consolidada no drenada (Prueba CU) y Prueba no consolidada no drenada (Prueba UU) [7].
- Prueba de compresión simple: La realización de este ensayo, el cual también es conocido como ensayo de compresión simple o ensayo de compresión uniaxial permite obtener un valor de carga última del suelo, el cual tiene relación con la resistencia al corte del suelo y entrega un valor de carga que puede utilizarse y en proyectos que no requieran de un valor más preciso, aunque si bien es cierto se obtiene un resultado bastante conservador [8].
- Prueba de la veleta: Prueba realizada en el sitio, donde se tiene que tomar en consideración que las arcillas y los limos blandos, y de manera especial los de alta sensibilidad, pueden verse afectados de manera considerable por efecto de alteraciones durante el muestreo del mismo, haciendo con ello poco confiable la resistencia al corte medida en el laboratorio. En esta prueba se utiliza un aparato conocido como veleta, la cual es utilizada para determinar la resistencia al corte en el sitio, evitando con ello el obtener muestras inalteradas. Esta prueba es adecuada para la determinación de la resistencia al corte en suelos sin drenar de suelos arcillosos que se encuentren saturados las cuales se encuentren sin fisuras y limos saturados. Sin embargo no es tan confiable para suelos que presenten fisuras o secuencia de microestratos [4].

Como puede observarse, para la determinación de este parámetro existen diferentes métodos, sin embargo, para los suelos de tipo arcilloso pueden ser determinados con más facilidad aún. Lo anterior, se debe a que pueden determinarse mediante las dos últimas pruebas antes mencionadas, que no son tan complejas de realizar, tales como lo son la prueba de compresión axial no confinada o bien la prueba de la veleta [8].

C. Prueba de la Veleta.

La veleta es un dispositivo, el cual sirve para medir la resistencia al corte de los suelos cohesivos y suaves evitando con ello extraer muestras inalteradas de los mismos; es decir, este aparato mide la resistencia al esfuerzo cortante en el lugar. Dicho aparato consiste en dos placas metálicas, cruzadas que forman cuatro aletas de forma rectangular, las cuales son hincadas en el suelo que va a ensayarse [8].

De acuerdo a la normas ASTM D 2573-15 este método de ensayo proporciona una indicación de la resistencia al corte sin drenaje in situ de arcillas y limos, grano pequeño- fino, y otros geo materiales nobles como la escoria de la mina, la suciedad orgánica y sustancias que requieren la determinación de la resistencia no drenada. Dicho ensayo es aplicable a los suelos con una fuerza inferior a 200kPa. Y varios suelos sensibles pueden ser moldeados de nuevo durante la inserción de las paletas.

Dicho método es utilizado de manera amplia en una variedad de exploraciones geotécnicas para evaluar la fuerza de carga rápida para el análisis de tensión total de arcillas y limos de grano fino saturadas. Así mismo la prueba se realiza habitualmente en combinación con otras pruebas de campo y de laboratorio [9].

En nuestro caso se utilizó una Veleta 16-T0174, el cual es un equipo muy utilizado en la Mecánica de Suelos. El equipo está compuesta por un cuerpo cilíndrico torsional y tres paletas intercambiables de diferente tamaño. En donde la veleta apropiada es elegida en base a la fuerza del suelo a ensayar. Esta veleta es posible usarla tanto in situ como en el laboratorio para suelos que presentan una $C_u=24 \text{ t/m}^2$ (240 Kpa).

III. METOLOGÍA EXPERIMENTAL

A. Obtención de la resistencia al esfuerzo cortante in situ

La determinación de la resistencia al corte se realizó con la veleta 16-T0124, equipo ubicado en el laboratorio de materiales de la Universidad Veracruzana perteneciente a la Facultad de Ingeniería Civil en la región de Poza Rica de Hgo. Ver.

La prueba de la veleta se realizó en 15 lugares diferentes de la ciudad de Poza Rica de Hgo. Con el propósito de tener una muestra representativa de la zona sureste de la ciudad. El procedimiento realizado para cada prueba fue el siguiente:

- Con el conocimiento de que la gran mayoría de las construcciones de interés social, tales como; casas, departamentos, entre otros, son desplantadas a un metro de profundidad aproximadamente, se optó por realizar excavaciones a esa misma profundidad con herramienta manual, ver figura 3 y 4.
- Una vez definido la profundidad, se realizó la correcta instalación del equipo, la cual consistió en el correcto ajuste entre la extensión y las diferentes paletas de la veleta, como se muestra en las figuras 5 y 6. La paleta a utilizar se definió a través de ensayos previos, en ellos se observó que la resistencia de los suelos a evaluar se encontraban por arriba de 12 Ton/m , por esa misma razón se hizo uso de la veleta de tamaño inferior, debido a que con ella se podían evaluar hasta 24 Ton/m.
- Habilitado el equipo de la manera correcta, se procedió a hincarlo en el suelo, para ello la veleta se introdujo completamente en el suelo a analizar.
- Una vez hincado el equipo, se ajustó el vernier a cero y se procedió a girarlo en sentido horario, hasta hacer fallar el suelo para después tomar el valor como la resistencia ultima al corte.

En cada sondeo evaluó tres veces la resistencia y se promediaron los valores, con el propósito de contar con un valor representativo de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Los resultados obtenidos con esta prueba, se muestran en la tabla 1.



Fig. 3 Excavación con herramienta manual.



Fig. 4. Excavación a un metro de profundidad.



Fig. 5 Veleta y accesorios



Fig. 6 Ajuste de la veleta y accesorios

Tabla I. Resistencia al esfuerzo cortante de 15 lugares de la zona sureste de la ciudad de Poza Rica.

Sondeo	Lugar	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura promedio
1	Viviendas ST. Agueda	24.00	23.00	23.80	23.6
2	AIPM - V. Carranza	17.00	18.00	17.00	17.33
3	CBTIS - Sor Juana Inés de la Cruz	12.00	12.00	12.40	12.13
4	Las Fincas	17.00	17.40	17.00	17.13
5	Gregorio L. González	24.00	24.00	25.00	24.33
6	Petromex- Las Choapas	21.00	22.00	22.00	21.67
7	Lomas Verdes	24.00	25.00	25.00	24.00
8	Moctezuma	16.00	16.00	17.20	16.40
9	Zaragoza	18.40	17.40	19.40	18.40
10	Los Pinos	15.60	16.00	16.00	15.87
11	Rio Potomac- C. 10	18.00	17.20	17.20	17.47
12	Libramiento Bicentenario	18.00	18.00	18.40	18.13
13	F. I. Madero - C. de la Rosa	22.00	22.40	22.00	22.13
14	Fracc. Huastecas	22.00	22.00	22.80	22.27
15	Guaymas	16.00	16.00	15.60	15.87

B. Propiedades índice

Así mismo, se evaluaron las propiedades índice de los diferentes suelos extraídos de campo, para posteriormente clasificarlos en la carta de plasticidad del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y tomando como referencia la tabla propuesta por Seed, Woodward y Lundgren para estimar el nivel de expansión de los suelos, los resultados se muestran en la tabla 3.

La determinación de propiedades índice consistió en la evaluación de la humedad natural, como se muestra en la tabla 2, además de los límites líquido y plástico, de los cuales se desprende la evaluación del índice de plasticidad, el cual se determinó como lo establece la norma ASTM 4318-05. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla II. Humedad natural de 5 lugares de la zona sureste

Sondeo	Lugar	Humedad natural (%)
3	CBTIS - Sor Juana Inés de la Cruz	23.43
15	Guaymas	21.11
9	Zaragoza	18.79
7	Lomas Verdes	17.29
5	Gregorio L. González	17.47

Tabla III. Resultado de las pruebas índice, clasificación de suelos de acuerdo al SUCS y Grado de expansividad.

Sondeo	Lugar	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice plástico	Tipo de suelo	Grado de expansividad
1	Viviendas ST. Agueda	45.17	17.05	28.11	CL	Medio, Alto
2	AIPM - V. Carranza	44.35	22.65	21.70	CL	Medio, Alto
3	CBTIS - Sor Juana Inés de la Cruz	40.86	19.87	20.99	CL	Medio, Alto
4	Las Fincas	42.71	19.81	22.91	CL	Medio, Alto
5	Gregorio L. González	34.10	16.03	18.08	CL	Medio
6	Petromex- Las Choapas	46.07	21.02	25.05	CL	Medio, Alto
7	Lomas Verdes	49.21	20.20	29.01	CL	Medio, Alto
8	Moctezuma	46.97	23.93	23.04	CL	Medio, Alto
9	Zaragoza	42.92	16.09	26.82	CL	Medio, Alto
10	Los Pinos	39.25	21.05	18.20	CL	Medio
11	Rio Potomac- C. 10	41.06	21.60	19.46	CL	Medio
12	Libramiento Bicentenario	46.31	22.52	23.78	CL	Medio, Alto
13	F. I. Madero - C. de la Rosa	36.29	19.06	17.32	CL	Medio
14	Fracc. Huastecas	36.45	20.54	15.91	CL	Medio
15	Guaymas	48.72	19.05	29.66	CL	Medio, Alto

IV. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al comparar la humedad natural presente en la estructura del suelo, es posible observar la relación que guardan entre la resistencia. En esta investigación se analizaron 5 humedades de los diferentes lugares de la zona estudiada, y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 4.

Tabla IV. Humedad natural y el esfuerzo cortante de 5 lugares de la zona sureste

Sondeo	Lugar	Humedad natural (%)	Esfuerzo cortante (Ton/m ²)
3	CBTIS - Sor Juana Inés de la Cruz	23.43	12.13
15	Guaymas	21.11	15.87
9	Zaragoza	18.79	18.40
7	Lomas Verdes	17.29	24.00
5	Gregorio L. González	17.47	24.33

Con el propósito de encontrar una relación que defina el comportamiento entre la humedad natural y el esfuerzo cortante, así mismo observar la uniformidad de los resultados, se obtiene la correlación, indicada en la figura 7.

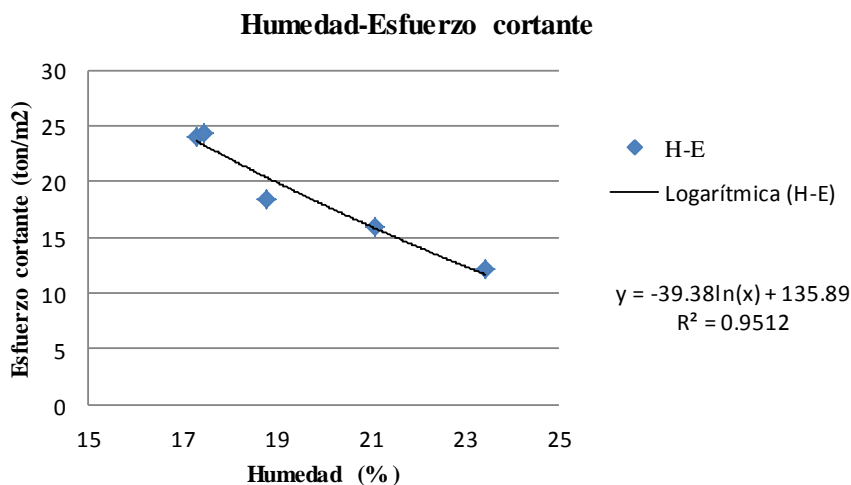


Fig. 7 Correlación entre la humedad natural y la resistencia al esfuerzo cortante.

Después de realizar el análisis respectivo, se encontró que la línea de tendencia que mejor agrupa el comportamiento de los datos fue el comportamiento logarítmico. Luego entonces la ecuación que define el comportamiento de las arcillas expansivas es la ec. 3.

$$y = -39.38 \ln(x) + 135.89 \tag{3}$$

que en términos de la humedad y la resistencia del esfuerzo cortante quedaría:

$$\tau = -39.38 \ln(w\%) + 135.89 \tag{4}$$

Donde:

τ = Resistencia al esfuerzo cortante (ton/m²)

w% = Humedad natural del suelo en porcentaje.

La Ec.4 se recomienda utilizar sólo cuando se tenga condiciones similares de suelo al presente estudio, es decir que el suelo presente las mismas propiedades índice, tipo de suelo y el grado de expansividad.

V. CONCLUSIONES

El análisis presentado tal como se especificó desde un principio, sólo fue de la zona sureste de la ciudad de Poza Rica. Así también, sólo se muestra un análisis estadístico a partir de las humedades naturales del suelo, por lo cual, dichos resultados deben considerarse como una propuesta de análisis que pueda servir como referencia de diseño a los constructores.

Los puntos de análisis presentan desde arcillas muy blandas y suaves, hasta arcillas con características de una arcilla compacta, debido a su alta resistencia a la fractura. En dichas arcillas la capacidad de carga es razonablemente adecuada para la construcción de edificaciones de pocos niveles, sin embargo, al analizar la expansividad del material en relación con las propiedades índice, se puede observar que el suelo se encuentra entre zonas con expansividad en nivel alto y medio. Esto último significa que pueden generarse daños en las viviendas con características mencionadas anteriormente.

También, se debe tener presente que, la resistencia al esfuerzo cortante, es sólo un parámetro de los suelos que interpreta un estado de falla y de ninguna manera sustituye al análisis de capacidad de carga.

Finalmente es importante señalar que la ecuación 4 se puede utilizar para determinar la resistencia al esfuerzo cortante a la falla de un suelo, siempre y cuando el suelo en estudio reúna condiciones semejantes a los resultados presentados en esta investigación.

RECONOCIMIENTOS

La investigación que se presenta ha sido realizada, gracias al apoyo de los integrantes y colaboradores del CA Estructura UV-CA215. Se agradece especialmente, la colaboración de Israel Hernández Bautista, así como también a la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Veracruzana en Poza Rica. Se agradece también el apoyo otorgado mediante recursos PRODEP.

REFERENCIAS

- [1] Ralph B. Peck, Walter e Hanson, Tomás H. Thornburn (2011), Ingeniería de cimentaciones, Editorial Limusa, México, pp. 98.
- [2] Alejandro García, Alejandro Córdova, José L. Sánchez Amador, Armando Aguilar, (2012), Reducción del esfuerzo de expansión en arcilla expansiva con extracto compuesto de Puluxnú, XXVI Reunión nacional de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica, SMIG, México, pp. 1000.
- [3] Eulalio Juarez Badillo-Alfonso Rico Rodriguez (2005), Macanica de suelos, tomo I, Editorial Limusa, Mexico, pp. 371 y 373.
- [4] Roy Whitlow (1994), Fundamentos de mecánica de suelos, Segunda edición Editorial CECSA. México, pp. 231, 239-240 y 287-288.
- [5] Oscar valerio Salas (2011), Ensayos triaxiales para suelos, Revista Métodos y materiales, Universidad de Costa Rica, Vol. 1, Num, pp. 15.
- [6] Alfonso Rico Rodriguez-Hermilo Del Castillo (2011), La Ingeniería de Suelos en las vias terrestres Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas, Editorial Limusa. Mexico, pp. 63.
- [7] Braja M. Das (2006), Principio de ingeniería de cimentaciones, Editorial Thomson, Mexico, pp. 47.
- [8] Carlos Crespo Villaláz (2010), Mecánica de suelos y cimentaciones, Sexta Edición. Editorial Limusa. México, pp. 163, 168 y 171.
- [9] ASTM D 2573-15 Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils.