

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v4i3.1174>

Determinación de parámetros de resistencia efectivos para arcillas expansivas

Determination of effective resistance parameters for expansive clays

Alexander Molina Villalobos

Alexander.molinav@ufide.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0002-8118-8855>

Universidad Fidelitas

San José – Costa Rica

Artículo recibido: 08 de septiembre de 2023. Aceptado para publicación: 26 de septiembre de 2023.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

Se propone determinar parámetros de resistencia efectivos para arcillas expansivas, mediante ensayos de bajo costo económico y fácil ejecución, el suelo en específico es recolectado mediante muestras inalteradas en la Urbanización de Río de Oro en Santa Ana, Costa Rica, con el fin de determinar la importancia de la consideración del ángulo de fricción efectivo y cohesión efectivo, ante los esfuerzos totales y la variación de la superficie de falla Mohr Coulomb contra los cambios de humedad en el suelo. En campo se realiza el ensayo de penetración dinámica de cono (DCP) normado por ASTM 6951, en el cual se correlaciona la cantidad de golpes con el ángulo de fricción efectivo. En laboratorio se realizan ensayos de clasificación entre los cuales se tienen límites de Atterberg y el ensayo de gravedad específica para catalogar la muestra como un suelo OH, arcillas orgánicas de alta o media plasticidad y según el Código de Cimentaciones de Costa Rica segunda edición (2009), suelo de arcillas expansivas de color gris. Por medio de ensayos de compresión inconfiada ASTM 2166-66, se determina la capacidad última del suelo a diferentes porcentajes de humedad, condición que brinda el parámetro de la cohesión total para cada caso y permite la construcción de la superficie de falla Mohr Coulomb para esfuerzos totales y efectivos, de manera que admite comparar y evidenciar la importancia de los parámetros efectivos en el comportamiento de los suelos. En la investigación se determina, además, que la resistencia última del suelo depende de la capacidad de succión, la cual aumenta conforme disminuye la humedad, relación que se mantiene en la resistencia al corte según disminuye el contenido de agua en el suelo.

Palabras clave: arcillas, suelos, expansivas, resistencia, cohesión

Abstract

It is proposed to determine effective resistance parameters for expansive clays, through tests of low economic cost and easy execution, the specific soil is collected through undisturbed samples in the Urbanization of Río de Oro in Santa Ana, Costa Rica, in order to determine the importance of considering the effective friction angle and effective cohesion, given the total stresses and the variation of the Mohr Coulomb failure surface against changes in soil moisture. In the field, the dynamic cone penetration (DCP) test, regulated by ASTM 6951, is carried out, in which the number

of blows is correlated with the effective friction angle. In the laboratory, classification tests are carried out, including Atterberg limits and the specific gravity test to classify the sample as an OH soil, organic clays of high or medium plasticity and according to the Costa Rican Foundation Code, second edition (2009.), gray expansive clay soil. Through unconfined compression tests ASTM 2166-66, the ultimate capacity of the soil is determined at different moisture percentages, a condition that provides the total cohesion parameter for each case and allows the construction of the Mohr Coulomb failure surface for stresses. total and effective, so that it admits to compare and demonstrate the importance of the effective parameters in the behavior of the soils. In the investigation, it is also determined that the ultimate resistance of the soil depends on the suction capacity, which increases as humidity decreases, a relationship that is maintained in the resistance to cutting as the water content in the soil decreases.

Keywords: clays, soils, expansive, resistance, cohesion

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons . 

Como citar: Molina Villalobos, A. (2023). Determinación de parámetros de resistencia efectivos para arcillas expansivas. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 4(3), 1436–1447. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i3.1174>

INTRODUCCIÓN

Es común que en el país se dé la presencia a nivel superficial de arcillas plásticas con propiedades expansivas, lo que condiciona, no solamente el tipo y nivel de desplante para las cimentaciones de las estructuras, sino también, la dificultad de obtener información de los ensayos de campo, en cuanto a sus propiedades geomecánicas efectivas.

Las propiedades geomecánicas primordiales para establecer un modelo de ruptura serían el ángulo de fricción interna, así como la cohesión del material. Es claro que estos parámetros se pueden establecer con base en dos criterios: esfuerzos totales y esfuerzos efectivos. Los esfuerzos totales no representan el comportamiento real del suelo, por lo tanto, generalmente subestiman la resistencia del material. Los esfuerzos efectivos vienen a representar la condición real tanto de resistencia como de deformación, por tal razón diversas teorías requieren de su medición para ser empleadas, por ejemplo, la Teoría de Empuje de Tierras de Rankine.

No existen datos bibliográficos sobre la medición de parámetros efectivos en suelos arcillosos expansivos a nivel nacional. Por lo indicado anteriormente, y tomando en cuenta los susceptibles que son las arcillas al agua, es muy significativo para la aplicación correcta de teorías en las cuales se requieren de parámetros efectivos, el establecer la magnitud de los mismos y su relación con la humedad del suelo.

Con respecto al tema del empleo de los esfuerzos efectivos en la práctica ingenieril común, el Código de Cimentaciones de Costa Rica (2008) es claro en la importancia del mismo, pero también reconoce su dificultad, en base a lo que menciona el presente código se puede considerar para fundamento de lo anterior que:

“Debe de considerarse que el estudio debe de ser riguroso es en terminología que se relacione a esfuerzos ampliamente efectivos, sin embargo, la dificultad de su aplicación a la situación de corto plazo en suelos cohesivos (o de baja permeabilidad) hace que de forma normal se realice el análisis de esfuerzos totales. Tal experiencia muestra que estos factores de seguridad así obtenidos, permiten reflejar de una forma exacta la realidad, independientemente de que la superficie de falla que se deduce no corresponde con la superficie de falla real”. (p. 16).

Para sustento de lo que se menciona, se pueden considerar como parte de los antecedentes, el aportado por Bonilla Hernández (2010) en su tesis “Verificación de correlaciones de parámetros geomecánicos en arcillas costarricenses mediante pruebas SPT dinámica” en donde trabaja con dos de los resultados buscados en la presente investigación, cohesión efectiva y ángulo de fricción efectiva, sin embargo, lo realiza en parámetros totales para la cohesión. Es una de las únicas investigaciones a nivel nacional que busca obtener parámetros de cohesión y fricción en suelos arcillosos, no obstante, no está específicamente enfocado en suelo expansivos.

Berry (s.f.), plantea que las correlaciones para el ángulo de fricción son bastantes confiables, además: “la mayoría de las ecuaciones usadas dan como resultado el mismo ángulo de fricción para la misma cantidad de golpes” (p.32), sin embargo, esto para suelos arenosos, considera que las correlaciones no fueron implementadas para suelos finos y que la fricción en suelos finos no se obtiene de pruebas como la SPT, por lo que en los resultados de investigación se obtiene valores que difieren en un 41 % del valor promedio en las pruebas realizadas.

Como parte de los resultados, se plantea que “en los terrenos con suelos cohesivos, las correlaciones basadas en los resultados del ensayo NSPT deben considerarse orientativas” (p.37) y que las correlaciones de cohesión y NSPT “son válidas para arcillas casi exclusivamente” sin embargo, concluye que “las correlaciones de cohesión sí son confiables y bastante precisas. Sus resultados son muy similares a los esperados y a los obtenidos en laboratorio”.

Formación de suelos

En su mayoría, en los proyectos de construcción e ingeniería, es de relativa importancia relacionar de manera directa aquellas capacidades propias del suelo con las solicitudes del proyecto, por lo que resalta interés el definir lo que es el suelo. Para Braja (2015), con respecto a la definición de suelo, este autor afirma que “Para propósitos de ingeniería, el suelo puede definirse como el agregado no cementado de aquellos granos minerales y de materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas sólidas” (p.1).

Es por esto que, durante la etapa del diseño y la planeación de una construcción, es fundamental identificar el tipo de formación del depósito de suelos, sobre el que se piensa fundar las diferentes obras de cimientos, muros de contención y otras estructuras de contención o retención de tierras, esto es de utilidad considerando que cada depósito cuenta con sus propias características geomecánicas lo que hace que su análisis se presente de manera diferente. Ante esto, Braja (2015) confirma que:

La mayor parte de los suelos que cubren la superficie de la tierra están formados por la erosión de las rocas. Las propiedades físicas del suelo se establecen principalmente por los minerales que constituyen las partículas del suelo, por lo tanto, la roca de la cual se derivó. (p.16)

Con esto es posible intuir que las propiedades mecánicas de los suelos se ven directamente relacionadas con su composición química y mineralógica, además los granos minerales son los que forman la fase sólida de un agregado que, a su vez, son el resultado de la exposición a la intemperie y la erosión de las rocas.

Las rocas se pueden dividir según su tipo de formación geológica en tres grandes grupos básicos, las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

De esta manera es posible que se visualice que las rocas ígneas provienen del magma, o decir que, del enfriamiento y la solidificación del magma, el cual puede provenir de erupciones volcánicas o de fisuras, y en donde además estas rocas dependen de la composición del magma y de la velocidad del enfriamiento, ante lo cual este último factor es el que condiciona la textura de la roca. Por su parte Hernández, (2006), afirma que:

Las texturas comunes de las rocas son afaníticas, con granos demasiado pequeños para ser distinguidos a simple vista; fanerítica, con cristales intercrecidos de aproximadamente igual tamaño y lo suficientemente grandes para ser identificados a simple vista, porfídica, que tiene cristales más pequeños denominada pasta y vítrea (de vidrio). (p.9)

Las rocas sedimentarias se forman en la superficie de la tierra, debido a procesos de alteración y erosión de rocas preexistentes tales como depósitos de grava, arena, limo y arcilla que la mayoría de los casos se han litificado para formar rocas por medio de los procesos de compactación y cementación. Estas rocas se dividen en dos tipos, en donde Hernández (2006) explica que:

Las rocas detríticas o fragmentarias se componen de partículas minerales producidas por la desintegración mecánica de otras rocas y transportadas sin deterioro químico, gracias al agua...Ejemplos: lutitas y areniscas...Las rocas sedimentarias químicas se forman por sedimentación química de materiales que han estado en disolución durante su fase de transporte...Ejemplos: yeso, anhidrita y calizas. (p.11)

Por último, las rocas metamórficas son aquellas cuya composición y textura originales han sido alteradas mediante factores como la temperatura, la presión y fluidos químicos, proceso al que se le llama metamorfosis. Normalmente los ambientes con calor y presión suficientes para causar metamorfismo se encuentran donde las placas tectónicas de la Tierra se están uniendo.

Por lo tanto, es claro que después de mencionar los diferentes tipos de roca y su formación, se puede describir que los suelos provienen de la desintegración y/o alteración física o química de las rocas.

Todo esto da lugar a diferentes fenómenos de disgregación (alteración o meteorización) y a la transformación de la roca, creándose el perfil de meteorización. En este perfil la roca madre ocupa la parte más baja y alejada de la superficie y el suelo la más alta. Cuando el suelo permanece in situ sin ser transportado, se le conoce como suelo residual y cuando ha sufrido transporte, formando depósitos coluviales, aluviales, etc., se denomina suelo transportado. (González et al, 2014)

Mediante los procesos de meteorización o intemperismo, los cuales consisten en la descomposición de las rocas en fragmentos un poco más pequeños, en los que pueden o no presentarse cambios en su composición química, dándose así la formación de los suelos, mediante el transporte de los productos de la meteorización que tienen su formación en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, la cual al verse sometida a factores externos como el ambiente se disgrega en tres facetas:

Física: la cual se presenta debido a los cambios térmicos y a la acción del agua.

Química: esta es originada por ciertos fenómenos de hidratación, dilatación y oxidación.

Biológica: la cual es producida por la actividad bacteriana.

Caracterización del sitio

Es muy importante conocer sobre el sitio donde se van a extraer las muestras para el proceso de análisis de suelo en la investigación, debido a la relevancia de identificar la zona del país a la cual corresponde el tipo de suelo por testear, en este caso se logró trabajar con arcillas expansivas del sector de Santa Ana, más específicamente de la Urbanización Río Oro.

Clasificación de suelos

Para propósitos ingenieriles es muy importante diferenciar y tener clasificación de los materiales con los que se trabaja, en este caso, de los diferentes tipos de suelos existentes, los cuales serán clasificados mediante el Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS) para este proyecto, metodología que se basa en el tamaño de las partículas, límite líquido y el índice de plasticidad. Actualmente se encuentra estandarizado por la norma ASTM D 2487-93.

SUCS presenta el siguiente sistema de clasificación para los suelos, que son divididos en:

- Suelos de grano grueso.
- Suelos de grano fino.
- Suelos altamente orgánicos.

Según (González et al, 2014) las clasifica de la siguiente manera:

Gravas: con tamaño de grano entre unos 8-10 cm y 2 mm, se caracterizan porque los granos son observables directamente. No tienen retención de agua por la inactividad de su superficie y los grandes huecos presentes entre partículas.

Arenas: con partículas comprendidas entre 2 y 0,060 mm, todavía son observables a simple vista. Cuando se mezclan con el agua no se forman agregados continuos, sino que se separan de ella con facilidad.

Limos: con partículas comprendidas entre 0,060 y 0,002 mm (algunas normativas indican que este último valor debe ser 0,005 mm, pero no hay apenas consecuencias prácticas entre ambas distinciones). Retienen el agua mejor que los tamaños superiores.

En esta metodología primeramente se da la clasificación por tamaños, posteriormente se determina si el suelo es bien graduado o mal graduado y si tiene arenas, material fino, arcillas o limos.

Arcillas

La arcilla es uno de los suelos más problemáticos en cuanto se hace referencia a la cimentación de construcciones y estabilidad de taludes, por sus diferentes características y propiedades de expansión según sea el tipo de arcilla, estos suelos son producto de la erosión química o física, normalmente se habla de tres diferentes tipos de arcillas, clasificadas según su estructura reticular en: caolinitas, ilitas y montmorillonitas, esta última es la que mayor capacidad de expansiva presenta.

Las arcillas corresponden a cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que a la vez consiste de un material granuloso muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 4 micras y que se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados. (Hernández, 2006, p.30)

Hay diferentes consideraciones en cuanto al diámetro de las partículas de arcilla, tal y como se muestra en la tesis de Amador y Arroyo (2002):

Se da el nombre de arcillas a partículas sólidas con diámetro mejor de 0.005 mm (algunos autores establecen 0.002 mm) y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclado con agua. Poseen gran capacidad de absorción en estado seco, en estado húmedo, son bastante impermeables al deshidratarse, se endurecen mucho, sin embargo, existen otros elementos característicos de las mismas. (p.13)

Existen tres criterios fundamentales para clasificar los suelos arcillosos, según Hernández (2006) son las siguientes:

- Suelos cuyas partículas sean menores o igual a 2 micras (0,002 mm).
- La plasticidad con que cuente el suelo.
- La composición mineralógica del mismo.

Según las condiciones de este criterio, los tres grupos de minerales de arcilla son:

- Caolinitas.
- Iltas.
- Montmorillonitas.
- Parámetros geotécnicos
- Gravedad específica
- La gravedad específica (Gs) de los sólidos del suelo es utilizada en muchos cálculos en la mecánica de suelos y es posible de determinar en laboratorio con precisión.

Teoría de Mohr Coulomb

Con respecto al tema de la resistencia al esfuerzo cortante en suelos, existe mucha información, sin embargo, dos de los más grandes investigadores y reconocidos en esta área son Coulomb y Terzagui. De acuerdo a lo que considera Coulomb (1995) "los suelos tienden a presentar características mixtas, lo mismo que decir que presentan cohesión y fricción interna, estructuradas por una ecuación que es conocida en Mecánica de Suelos con el nombre de ley de Coulomb" (p.19).

Una de las teorías de falla más utilizadas en la mecánica de suelos es la de Mohr Coulomb, que refleja la superficie la envolvente de rotura del suelo o también llamada línea de resistencia intrínseca, es un criterio aplicado a materiales frágiles que plantea una falla por la combinación crítica de esfuerzos normales y tangenciales en un plano de falla.

Es un modelo matemático que se basa en el rozamiento interno, que se produce en las partículas del material y describe la respuesta del material a esfuerzos cortantes y tensión normal. En general, es aplicada a materiales que presentan una resistencia a la compresión, muy superior a la resistencia a tracción.

Es una medida de la interacción entre partículas, de origen en las fuerzas moleculares y las películas de agua, por tanto, se puede deducir que la cohesión de los suelos varía conforme el contenido de humedad. Suarez define la cohesión como: "una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo" (p.82, 1998), otra definición dada por Olivos en su tesis para optar por el título de Ingeniero Civil es: "En el escenario de la mecánica de suelos, la cohesión es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación". (Olivos, p.53, 2015)

La cohesión también se puede precisar como la adherencia entre las partículas del suelo, debido a la atracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares internas (Campos, Gómez, Torres, pág. 39, 2006).

La unidad de medida es en kg/cm^2 , los valores de cohesión varían mucho conforme el tipo de suelo, se puede hablar de suelos arenosos, limosos y arcillosos, son estos últimos los que cuentan con una mayor cohesión entre partículas. Al estar aunada la cohesión a la permeabilidad del suelo y el estado energético del agua, es de importancia tomar en cuenta que:

Las fuerzas básicas responsables de la retención y del movimiento del agua en el suelo, son descritas como cohesión y adhesión. La fuerza de cohesión es la atracción entre moléculas de agua, mientras la adhesión es la atracción de las moléculas con la superficie sólidas. La fuerza de adhesión genera que algunas moléculas de agua se encuentren unidas de forma rígida a las partículas de suelo y se llama agua absorbida, en cambio las moléculas unidas por fuerzas de cohesión sobre superficie de los granos de suelo pueden ser fácilmente removidas. Las fuerzas de cohesión y adhesión juntas regulan el movimiento de agua. En suelos arcillosos la adhesión y cohesión ejercen sus fuerzas sobre sus propiedades de plasticidad. (Campos, Gómez, Torres, pág. 39, 2006)

Ángulo de fricción interno

El ángulo de fricción interno es una característica o propiedad de los materiales granulares, que además cuenta con una interpretación física fácil de comprender, que se relaciona con el máximo ángulo de reposo para la pendiente de un material, es un parámetro muy importante en la mecánica de suelos, es utilizado para determinar la estabilidad de taludes, cálculo de empujes de tierra y la resistencia de una cimentación. (González, et al 2014, p.139) En la actualidad hay muchos métodos para determinar el ángulo de fricción o bien correlaciones mediante distintas metodologías.

Esfuerzo efectivo

En una masa de suelo existen esfuerzos dentro de la estructura del suelo que son resultado de las fuerzas que actúan sobre los puntos de contacto entre las partículas individuales y existen esfuerzos dentro del fluido intersticial que ocupa los vacíos del suelo. Se puede razonar intuitivamente que el esfuerzo efectivo estará relacionado más directamente con el comportamiento del suelo que el esfuerzo total o la presión intersticial (Lambe W., 2012, p.257).

Esta relación se conoce como principio de esfuerzo efectivo y fue postulada la primera vez por Karl Terzaghi, en 1936. Este simplemente postula que en cualquier punto de una masa de suelo saturado el esfuerzo total en cualquier dirección es equitativo a la suma algebraica del esfuerzo efectivo en esa dirección y la presión intersticial. (p.50)

Succión

La succión corresponde a la capacidad o la fuerza, con la que cuenta el suelo para evitar que las partículas de agua sean removidas de él a través de la evaporación. De acuerdo a lo que considera Ridley (1993), con respecto a la succión, este autor la plantea como la energía que se requiere para remover una molécula de agua de la matriz de suelo por medio de la evaporación. La succión total o energía necesaria para remover del agua, cuenta con dos componentes conocidos, la succión matricial y la succión osmótica, en donde la primera se encuentra ligada a los efectos de la capilaridad y la segunda a efectos generados por sales disueltas en el agua.

La succión matricial (Ψ_m), es la componente de la succión total asociada a la capilaridad, debida a la tensión superficial en la interfase agua-aire y a la adsorción desarrollada en la superficie de las partículas. La succión matricial se expresa como la diferencia entre la presión del agua y la presión del aire en los poros ($u_a - u_w$). (Meza, 2012)

METODOLOGÍA

La metodología de la presente investigación, tiene como finalidad la evaluación de criterios sobre las arcillas expansivas, se emplea un enfoque cuantitativo considerando que se requiere fundamentar los aspectos que son observables y que son susceptibles de cuantificar, como parte de los resultados en pruebas de laboratorio mediante la aplicación de metodologías ya existentes y normadas. El modelo de investigación aplicado corresponde a una investigación de tipo básica y aplicada, que permite la orientación de la investigación, a la búsqueda de conocimientos nuevos, específicos e inmediatos, además de la búsqueda de soluciones de problemas que permite la transformación de las condiciones del fenómeno.

Se trabaja en la recolección de información para la adquisición de conocimientos en el área de investigación geotécnica. La investigación se establece como transversal considerando que esta es recolectada en un tiempo único, con la finalidad de analizar las incidencias e interrelación en un momento establecido, además es de tipo descriptiva, considerando que la información permite el análisis de las incidencias e interrelaciones en las arcillas expansivas, así como lograr la determinación de la resistencia efectiva en suelos expansivos y su relación con los diferentes parámetros de cohesión y ángulos de fricción efectivos, en donde además se incluyen muestreos en campo y pruebas de laboratorio.

Como parte de los instrumentos utilizados para la recolección de la información se trabajó una base de datos que permite la comprobación de datos y resultados matemáticos, los cuales permiten determinar patrones de comportamiento y comparar resultados. Como parte de la recolección de la información se toma en cuenta la recolección de muestras inalteradas que se realizará con base a las diferentes muestras tomadas, en donde la arcilla expansiva ha sido ubicada.

Otros de los instrumentos a utilizar corresponden al equipo de laboratorios de suelos pertenecientes a la Universidad Fidelitas los cuales corresponden a: horno para secado de muestras, cápsulas para humedad, balanzas, maquina de Casagrande, tubos Shelby, equipos para ensayos de resistencia como la Multiplex para pruebas de compresión inconfiada, además de los instrumentos utilizados en el lugar para ensayos con el cono dinámico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se van a dividir los resultados por tipo de ensayo, primeramente, se mencionan los ensayos de clasificación realizados para caracterizar el suelo, es decir, límites de Atterberg y gravedad específica, posterior el ensayo de penetración dinámico de cono, ensayos de compresión inconfiada y por último la determinación de la superficie de falla Mohr Coulomb.

Resultados Límites de Atterberg

Como paso fundamental se debe caracterizar o identificar el tipo de suelos con el que se va a trabajar, para lo que se utiliza el sistema unificado de clasificación de suelos o SUCS por sus siglas, sin embargo, se logra realizar en laboratorio por limitaciones de tiempo, los ensayos de límite líquido y límite plástico, adicional a ello se realiza el ensayo de gravedad específica. Se presentan los límites de plasticidad para la clasificación SUCS, y se aclara que el ensayo de límite líquido se realizó dos veces para validar los datos obtenidos y dan ambos como resultado el mismo valor, mientras que para el límite plástico se tomaron 3 muestras y se hizo un promedio de los resultados obtenidos, dando como resultado finales en límites de plasticidad; Límite líquido 98%; Límite plástico 37%, e índice de plasticidad 61%, los resultados obtenidos para las pruebas de límite líquido, en ambas es posible observar el mismo resultado de porcentaje de humedad para una correspondencia de 25 golpes.

En el Código de Cimentaciones de Costa Rica, es posible observar que los valores obtenidos en el laboratorio para la pruebas de límite líquido se encuentra entre los rangos dados de "Límite líquido: 77 % - 150 %" (CCCR, 2009, p.30) para arcillas expansivas color gris.

Según la carta de plasticidad después de analizar los resultados obtenidos para el límite líquido y el índice de plasticidad, se está en presencia de un suelo CH u OH, donde CH son arcillas inorgánicas de alta plasticidad y OH arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad, sin embargo, no es posible determinar específicamente cuál, al no presentar en el alcance y disponibilidad ensayo de granulometría y los porcentajes pasando, no obstante, fue posible determinar una plasticidad muy alta en el suelo, por lo que se plantea que se estudia un suelo de arcillas orgánicas de alta plasticidad.

Resultados gravedad específica

Seguidamente se exponen los resultados del ensayo de gravedad específica, dicho procedimiento se realizó dos veces para lograr consenso en los resultados y validar la información recolectada, en manera de brindar veracidad al trabajo realizado y a la adecuada ejecución del ensayo.

Se obtiene un valor promedio para la gravedad específica en el suelo de estudio de 2,60 por lo que, al comparar con los parámetros brindados en Código de Cimentaciones de Costa Rica, segunda edición (2009), se adquiere un valor de diferencia en porcentaje de 1,15 % con respecto al valor más cercano dado para arcillas expansivas grises que tiene un rango de 2,63 a 2,70.

En el Código de Cimentaciones de Costa Rica, es posible observar que los valores obtenidos en el laboratorio para las pruebas de límite líquido y límite plástico se encuentran entre los rangos dados de 77 % - 150 % y 26%-50% respectivamente.

Además, los resultados obtenidos en el ensayo de gravedad específica tienen un valor muy cercano a los brindados en el Código de Cimentaciones de Costa Rica, asimismo, existe la posibilidad de errores en laboratorio con los equipos de medición y la eliminación completa del aire en las muestras que pueden afectar el resultado.

Por lo que con los resultados de límite plástico, límite líquido y gravedad específica que concuerdan con los rangos brindados en el Código de Cimentaciones de Costa Rica, se puede concluir que se trabajó en presencia de un suelo arcillo expansivo de color gris.

Resultados de ensayo de penetómetro dinámico de cono

El ensayo in situ de penetómetro dinámico se inició a una profundidad de 40cm, altura que corresponde a la capa superior de las muestras inalteradas recolectadas, de manera que sea un ensayo representativo con respecto al suelo sujeto de estudio en laboratorio.

Los resultados de interés y que brindan la información necesaria para relacionar el ensayo con el ángulo de fricción efectiva corresponden al primer tramo de profundidad analizado, de 0,40m a 0,85 m, tramo que se asocia a la profundidad de las muestras inalteradas, se representan en el cuadro 11, el número de golpes cada 15 cm de penetración, según el tramo de profundidad.

Se busca relacionar el ensayo de Penetrómetro de Cono Dinámico ASTM 6951, contra el ángulo de fricción efectivo, para lo que es necesario primeramente correlacionar los golpes del CPT con los del SPT, para posterior utilizar las correlaciones existentes para el ángulo de fricción efectivo y el número de golpes en el SPT.

Se utiliza la correlación para el ensayo CPT Y SPT de Navarro y Gómez (2004), utilizando como promedio de golpes en el ensayo de cono dinámico $x=7,66$ que corresponde al primer tramo de análisis en la prueba en sitio.

Resultados de ensayos de resistencia al corte mediante compresión inconfiada en estado inalterado

En los 10 ensayos realizados de compresión inconfiada para determinar la resistencia al corte de los suelos en estado inalterado se utiliza la máquina de CBR marca MATEST, la cual trabaja con deformación controlada, emplea dos deformímetros, uno para medir la deformación de la muestra y otro conectado a un anillo de carga calibrado para medir la presión soportada en el espécimen sujeto a estudio.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Fidélitas. Para conseguir diferentes porcentajes de humedad en las muestras, se secaron al aire en ausencia de luz solar, por períodos distintos de tiempo debido que, al intentar secar muestras al horno, las partes externas de los cilindros presentaron una contracción del suelo que debilitó las muestras al punto de quebrarse o dejar fisuras de hasta dos centímetros en este proceso.

Se observan los resultados del esfuerzo último vs deformación unitaria, para los ensayos de compresión inconfiada, en los cuales es posible determinar que la capacidad última al esfuerzo cortante, depende directamente del porcentaje de humedad presente en las muestras, son así las arcillas parcialmente saturadas muy susceptibles a los cambios en el porcentaje de agua.

También se muestra el esfuerzo último igual a cero, lo cual no implica que la muestra al tener un porcentaje de humedad bajo con un valor de 4,73%, no sea capaz de soportar ninguna carga, pero sí es posible afirmar que el equipo utilizado para realizar las pruebas de compresión inconfiada fue incapaz de registrar la carga aplicada a la muestra. Los resultados de todos los ensayos de compresión inconfiada muestran los esfuerzos últimos de cada ensayo con su respectivo porcentaje de humedad.

De manera que se evidencia la tendencia de carga última soportada según el porcentaje de humedad, donde para contenidos de agua entre el 14 % y 22 % se da una cresta con los valores máximos, mientras que, hacia los extremos de ese rango, se disminuyen significativamente los resultados en el eje de coordenadas.

La succión varía según el porcentaje de humedad, por lo cual al ver los cambios en los esfuerzos últimos según el cambio del porcentaje de agua en las muestras, es posible determinar que los esfuerzos últimos varían conforme la capacidad de succión y si se entiende cómo trabaja el fenómeno de la succión, es evidente que conforme disminuye el contenido de agua en un suelo aumenta la succión, de manera que es observable este fenómeno conforme disminuye la humedad de las muestras y aumenta el esfuerzo cortante.

Por otra parte, es posible observar que los ensayos se realizaron en humedades de 19%, 21%, 23%, 25% y 27%, dando con mayor capacidad al esfuerzo cortante las muestras falladas a una humedad del 21 % con una resistencia máxima al esfuerzo cortante entre 4 y 5 kg/cm².

Al comparar con los resultados obtenidos en laboratorio se observa que se tiene una variación importante, primero con respecto a la resistencia última en kg/cm² y como segundo por los porcentajes de humedad a los que se realizaron los ensayos, sin embargo, es posible determinar que a humedades superiores al 23 % los suelos de arcillas expansivas presentan una pobre capacidad de resistencia al esfuerzo cortante, mientras que a humedades entre valores de 19 % y 23 % se incrementa significativamente este parámetro.

A pesar de contar con valores mucho mayores para la resistencia al corte en los suelos recolectados en Río Oro de Santa Ana, se tiene la misma tendencia de los resultados de López (1995), donde se registran los parámetros más altos a humedades cercanas al 20 % y una disminución conforme se aumenta el porcentaje de agua.

CONCLUSIÓN

Con el muestreo inalterado en campo, es posible extraer todas las muestras de cilindros para los ensayos de compresión confinada, mantener la humedad del sitio y la integridad o composición original de las muestras; los ensayos de penetración con cono dinámico y ensayo de compresión confinada, logran determinar parámetros efectivos de resistencia para arcillas expansivas, mediante correlaciones de los valores del CPT y la construcción del círculo de Mohr, de manera que se concluye efectivos estos ensayos de campo y laboratorio para la medición de parámetros efectivos en arcillas expansivas.

Se demuestra que la capacidad última de los suelos finos arcillosos parcialmente saturados, depende de la succión, conforme menor es el contenido de agua en el suelo, mayor es la capacidad de succión, relación que se observa en la capacidad última de los suelos conforme disminuye la humedad y aumenta la succión.

Se logra determinar los esfuerzos efectivos, ángulo de fricción efectivo y cohesión efectiva para arcillas expansivas parcialmente saturadas, a diferentes contenidos de humedad, mediante la construcción de la superficie de rotura de Mohr Coulomb.

No se consigue comparar los resultados de la superficie de falla de Mohr Coulomb para arcillas expansivas con documentos de otras universidades, debido a la escasa investigación existente en esta área de la geotecnia; únicamente se logra comparar los resultados de compresión confinada, de manera que se valida el comportamiento de la carga última contra la humedad y se propone utilizar parámetros de resistencia efectivos para el diseño de estructuras, dada la significativa diferencia ante parámetros totales de resistencia, para evitar peligros de diseños contraproducentes.

REFERENCIAS

Braja M, Das. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica. (4ª ed.). D.F., México. Cengage Learning.

Berry, L., Reid, D. (s.f) Mecánica de suelos. Recuperado de: https://www.academia.edu/31824775/Mec%C3%A1nica_De_Suelos__Peter_L._Berry_and_David_Reid.pdf

Código de cimentaciones de Costa Rica (2008)

Gonzales, G., De Barcia, E., Sulbaran, Y., Ucar, O. (2014). Determinación del parámetro de resistencia, ángulo de fricción interna (ϕ) y su relación con los parámetros de densidad relativa (D_r) y relación de vacíos (e) en suelos granulares. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/075/507550626003.pdf>

Gonzales et al. (2004) "Water (Agua)," de OpenStax College, Biología (CC BY 3.0). Descarga gratis el artículo original en <http://cnx.org/contents/185cbf87-c72e-48f5b51ef14f21b5eabd@9.85:7/Biology>(Se abre en una ventana nueva).

Hernández, M. (2006). Estudio geológico y reconocimiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, Estado Aragua. Recuperado de: https://www.academia.edu/11619305/tesis_ARCILLA

Lambe, W., (2012) Mecánica de suelos. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/342867083/Mecanica-de-Suelos-William-T-Lambe>.

Meza, O, V. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/3251/43362>

Olivos, V, M. (2015). Estimación del ángulo de fricción interna y cohesión no drenada a partir de correlaciones basadas en ensayos in situ para suelos del Piedemonte de los cerros Orientales de Bogotá DC. Recuperado de: <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00002524.pdf>

Ridley, A. M. (1993). The measurement of soil moisture suction (PhD Thesis).University of London.

Terzaghi K. The Shear Resistance of Saturated Soils, en: Proceeding 1st International Conference, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Massachusetts, United States of America, junio 1936.