**XII SIMPOSIO INTERNACIONALDE ESTRUCTURAS, GEOTECNIA Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**Aplicación de la teoría no saturada para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales**

***Application of the unsaturated theory for the geotechnical design of surface foundations***

**Ing. Anaisy Martínez de León**

1. Anaisy Martínez de León. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara, Cuba. E-mail: anaisy@vc.hidro.cu.

**Resumen:**

Las teorías de la Mecánica de suelos tradicional tienen sus limitantes a la hora de ser aplicadas en problemas geotécnicos en los suelos parcialmente saturados, en las últimas décadas muchos autores han investigado sobre el comportamiento de los mismos. En el presente trabajo se muestra una recopilación de teorías sobre capacidad de carga, linealidad y asentamiento sobre los suelos parcialmente saturados y se realizó una hoja de cálculo con la ayuda del Matcad 14 para el cálculo.

Se realiza el diseño teórico de bases de cimentaciones para un suelo con distintos valores de saturación y succión, mediante la implementación de la hoja de cálculo, donde se hizo una valoración de cuál es la condición más crítica que da como resultado del diseño. Se realizó un estudio teórico de la influencia de las distintas variables dentro del diseño general de cimentaciones, donde se tuvieron en cuenta el tipo de suelo, la succión y el grado de saturación, la capacidad de carga, linealidad y deformación, la relación entre la capacidad de carga y la tensión límite de linealidad, los valores de áreas obtenidos por primer estado límite, linealidad y asentamiento permisible.

***Abstract:***

 *The theories of traditional soil mechanics have their limitations when applied to geotechnical problems in partially saturated soils, in the last decades many authors have investigated their behavior. In the present work a compilation of theories on load capacity, linearity and settlement on partially saturated soils is shown and a spreadsheet was made with the help of Matcad 14 for the calculation.*

*The theoretical design of foundation foundations for a soil with different values ​​of saturation and suction is carried out, by means of the implementation of the spreadsheet, where an assessment was made of which is the most critical condition that results from the design. A theoretical study of the influence of the different variables within the general design of foundations was carried out, taking into account the type of soil, the suction and the degree of saturation, the load capacity, linearity and deformation, the relationship between the load capacity and linearity limit voltage, the values ​​of areas obtained by the first limit state, linearity and allowable settlement.*

**1. Introducción**

El suelo parcialmente saturado es un sistema trifásico compuesto por sólidos, líquidos y gases.

El término “succión del suelo” fue usado por Schofield, (1935) para representar la “deficiencia depresión” en el agua de poros de algunos suelos (saturados o no saturados) que tenían la capacidad de absorber agua si se le adicionaba agua a la presión atmosférica. El término succión o potencial de agua designa a la integrante del estado de esfuerzo que tiene en cuenta aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructural de un suelo. Sin su participación resulta imposible definir el estado de esfuerzo y entender la respuesta deformacional de un suelo parcialmente saturado. Para Blight (1965), el efecto de la succión en un suelo no saturado es equivalente al de una presión exterior aplicada. (Barrera Bucio & Garnica Angusa, 2002).

La succión total es referida como la cantidad de energía asociada a la capacidad del suelo para retener agua (Lee y Wray, 1995). Ridley (1993) la define como la energía requerida para remover una molécula de agua de la matriz de suelo por medio de la evaporación. La energía necesaria para remover el agua del suelo o succión total tiene dos componentes, una asociada al efecto de la capilaridad denominada succión matricial (Ψm) y una componente debida a la presencia de sales disueltas en el agua, llamada succión osmótica So. (Ochoa, 2012).

 Ψ = Sm + So (1)

La succión matricial (Sm) se define como la diferencia entre presión de aire (ua) de poros y presión de agua de poros (uw) (Fredlund, 1979) y (Alonso, Gens, & Hight, 1987).

 (2)

Está 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 osmótica (So) es la componente de la succión asociada a la presencia de sales disueltas en el agua. La presencia de sales disueltas, reduce la presión de vapor en el espacio que se encuentra por encima de la interfase agua-aire, por lo tanto, se requiere de una mayor energía para remover una molécula de agua. Esta energía adicional requerida, es la succión osmótica, y es independiente de los efectos por capilaridad.

La succión estará, en consecuencia, en directa relación con lo que se podría denominar mayor o menor tendencia del suelo a absorber agua. Para un mismo índice de poros y en procesos monótonos, cuanto mayor o menor sea la humedad o el grado de saturación, menor o mayor será la succión.

**2. Metodología**

2.1 Capacidad de carga en suelos parcialmente saturados

La capacidad de carga de cimentaciones superficiales se estima utilizando los enfoques presentados originalmente por Terzaghi (1943) y Meyerhof (1951) (Braja, 2000) asumiendo que el suelo se encuentra en un estado de condición de saturación. La estimación de la capacidad de carga de cimentaciones superficiales mediante la Mecánica de Suelos convencionales para suelos no saturados puede subestimar los valores de capacidad de carga y conducir a diseños conservadores y costosos. Tomado de (Trista, 2015) citado por (Fathi M.O. Mohamed, 2007)

Suelos c - φ y φ

A partir de la teoría de Terzaghi (1943) sobre la capacidad de carga se introduce un término respecto a la succión matricial en suelos parcialmente saturados. Vanapalli et al. (1996) y Fredlund et al. (1996) proponen una relación entre tan φ b = Sκtan φ, Vesić (1973) incluye los factores ξcyξγ quedando como resultado la siguiente ecuación de capacidad de carga:

qu= [c´+ (ua− uw)Sψtan φ´]Ncξc+ 0.5γBNγξγ  (3)

Vanapalli y Fredlund (2000) y Garven y Vanapalli (2006), hacen otra contribución a esta teoría relacionando el termino Ψ con el índice de plasticidad.

(Venapalli & Mohamed, 2007)citado por (Fathi M O Mohamed et al. 2011) crean la ecuación semi-empírica basada en el modelo de superficie de pruebas de equilibrio, para predecir la variación de la capacidad de carga con respecto a la succión matricial en suelos parcialmente saturados de la siguiente manera.

 (4)

Dónde:

 = cohesión efectiva, en kPa

=peso específico húmedo, en kN/m3

= profundidad del cimiento, m

 B = ancho del cimiento

 = valor de la entrada de aire de la curva de retención de agua del suelo, en kPa

= media del valor de entrada de aire, en kPa

 = ángulo de fricción efectiva

= grado de saturación, en %

 = parámetro de ajuste del modelo

, , = factores de forma

, , =factores de profundidad,

, = factores de capacidad de carga

Realizando un ajuste de la ecuación propuesta por Brinch – Hansen, que es la que utiliza la norma cubana, con los parámetros del suelo parcialmente saturado a los que hace referencia (VANAPALLI & TAEK OH, 2011) en la anterior formulación. Una vez sustituidos los valores, la formulación de capacidad de carga para suelos parcialmente saturados queda de la siguiente forma.

 (5)

 (6)

 (7)

El ajuste del se realiza por medio de la ecuación 6, dicho ajuste fue plateado por (Venapalli & Mohamed, 2007). Tomado de (Trista, 2015).

Dónde: =parámetro que depende del índice plástico del suelo (IP).

Suelos c

Para el caso de los suelos cohesivos puros la formulación planteada por Brinch – Hansen, que es la que utiliza la norma cubana, viene dada por la ecuación 1.23, que se modificó empleando los parámetros de resistencia del suelo parcialmente saturado.

 (8)

Vanapalli lleva a cabo un modelo de equilibrio realizando pruebas en un suelo parcialmente saturado cohesivo puro para cinco valores diferentes de succión matricial, (Venapalli & Mohamed, 2007) quedando que:

 (9)

 (10)

Donde y es resistencia a compresión bajo condición saturada y no saturada respectivamente, es la presión atmosférica siendo igual a 101,3 kPa, es el grado de saturación y

 Son parámetros de ajustes., Para 8,0 ≤ Ip (%) ≤ 15,5 y Para 15,5 <Ip (%) < 60,0 (11)

2.2. Calculo de asentamientos en suelos parcialmente saturados.

Para realizar el cálculo de los asentamientos es necesario conocer hasta donde el suelo de la base de la cimentación tiene comportamiento tenso-deformacional lineal, para lo cual las tensiones actuantes no pueden ser mayores que la tensión límite de linealidad. Se realiza el cálculo de la tensión límite de linealidad basándonos en la expresión 12 de la (NC-XX, 2004).

R´ =  (12)

A partir de esta expresión se realizaron los ajustes correspondientes con los parámetros de resistencia para la condición de saturación parcial que se utilizan en la fórmula de Vanapalli de capacidad de carga como se muestra en la expresión 13.

 (13)

Método de la sumatoria de capas para el cálculo de asentamientos absolutos([2004](#_ENREF_2)):

Para la determinación del asentamiento absoluto en los puntos característicos da la base de un cimiento se puede emplear el método de sumatoria de capas usando la siguiente expresión:

 (14)

Donde:

n= cantidad de estratos por debajo del nivel de cimentación hasta una profundidad igual a la potencia activa

Hi= espesor del estrato (i) existente por debajo del nivel de cimentación hasta una profundidad igual a la potencia activa

= variación de la deformación unitaria vertical en un punto de la frontera superior (i) y calculado en una vertical que pase por el punto característico del cimiento donde se calculará el asiento absoluto

= ídem para el punto centro del estrato (i)

= ídem para la frontera inferior (i)



Figura 1. Método de la Sumatoria de Capas para el cálculo de asentamientos absolutos.

Cálculo de variación de la Deformación Unitaria.

* Suelos con Eo como parámetro deformacional.

 (15)

Donde:

σ´zp – incremento de la presión efectiva vertical en el punto de la masa de suelo donde se determinará, la cual es producida por las cargas impuestas a esta.

En este caso se puede determinar la variación de la deformación unitaria utilizando los resultados de los ensayos edométricos o consolidación triaxial que caracteriza la compresibilidad de los suelos.

* Curva de e vs σ´z .

 (16)

Donde:

ei – índice de poros correspondientes a la presión σ´zg en el punto de la masa de suelos donde se determina a ε .

ef – índice de poros correspondientes a la presión σ´zg + σ´zp en el punto de la masa de suelo donde se determina a ε.

σ´zg

σ´zg+σ´zp

σ´z

e

ei

ef

Figura 2. Determinación de ε usando la Curva de e vs. σ´

Además proponemos utilizar el método de la norma cubana para calcular los asentamientos.

Para realizar el del módulo de elasticidad se introduce una variación con respecto a la matriz de succión (VANAPALLI & TAEK OH, 2011):

unsat= Esat (17)

**3. Resultados y discusión**

Se realiza la caracterización de un suelo pertenecientes a la laguna de Oxidación de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV),

Dentro de los ensayos a realizar para la caracterización se encuentran el de granulometría, Hidrómetro, límites de consistencia, peso específico, compactación con la energía del Proctor Estándar, se realizará el ensayo de consolidación clásico y se obtendrán los parámetros de resistencia a cortante de los suelos en condiciones saturadas. Se obtiene la curva de retención de agua de suelo (Sr vs S) mediante el método indirecto del papel de filtro para la medición de la succión del suelo, a los cuales se les realizo la simulación de las curvas de retención de agua por los métodos de ajustes de Van Genuchten, Fredlund y Xing, y de Gallipoli, así como la simulación de las curvas de compresibilidad convencionales empleando la formulación plateada por Rojas y Alanís en el 2012. Obteniendose las propiedades del suelo que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Propiedades del suelo saturado para el cual se realiza el diseño suelo Laguna de Oxidación, Villa Clara

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Suelo*** | ***C******(kPa)*** | ***C\*******(kPa)*** | ***φ 0*** | ***φ 0\**** | ***Ψd0*** | ***Ip******(%)*** | ***h (kN/m3)*** | ***h\* (kN/m3)*** |
| ***Laguna de Oxidación***  | ***58.84*** | ***40.58*** | ***15.04*** | ***12.03*** | ***1.1*** | ***64*** | ***15.01*** | ***14.29*** |

Las propiedades físico mecánicas del suelo investigado en estado de saturación parcial se muestran en las Tabla 2 las cuales fueron determinadas a través las expresiones planteadas por Vanapalli 2008.

Tabla 2. Propiedades de los suelos parcialmente saturados para el cual se realiza el diseño suelo Laguna de Oxidación.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| (ua - uw)AVR (kPa) | Sr (%) |  (kN/m3) | \* (kN/m3) | φ\*uns (°) | Cuns (kPa)Vanapalli | Cuns (kPa)Fredlund | C\*uns (kPa) |
| 32 | 98 | 17.32 | 16.49 | 13.01 | 72.69 | 70.71 | 50.13 |
| 82 | 90 | 16.94 | 16.14 | 92.82 | 86.63 | 64.01 |
| 142 | 80 | 16.41 | 15.63 | 113.42 | 101.98 | 78.22 |

Se realizará el diseño de cimentaciones superficiales sometidas a carga axial, por método de estados límites, para los diferentes grados de succiones obtenidos empleando una hoja de Matcad para suelos parcialmente saturados. Obteniéndose los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 3. Resultados del diseño por capacidad de carga y linealidad del suelo ¨la Laguna de Oxidación¨

1. b)

Figura 3. a) Curvas de capacidad de carga vs succión suelos b) Curva de tensión límite de linealidad vs succión

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Carga muerta | CV larga duración | Su=0kPa y Sr=100% |
| b=l(m) | qbt(kN/m2) | Qbt(kN) | N(kN) | b=l(m) | R'(kPa) | P(kPa) |
| 300 | 200 | 1.25 | 584.67 | 766.87 | 726.88 | 1.3 | 274.686 | 266.686 |
| Su=32kPa y Sr=98% |
| 300 | 200 | 0.85 | 1168 | 706.04 | 701.67 | 1 | 451.667 | 430 |
| Su=82kPa y Sr=90% |
| 300 | 200 | 0.80 | 1628 | 870.69 | 819.2 | 0.8 | 683.22 | 655 |
| Su=142kPa y Sr=80%  |
| 300 | 200 | 0.65 | 2084 | 735.55 | 692.68 | 0.7 | 869.07 | 846.327 |

La Figura 3. a) muestra que con el aumento de la succión aumenta la capacidad de carga en el suelo estudiado, los cuales son predominantemente cohesivos. Para el suelo de la Laguna de Oxidación en Villa Clara los valores de capacidad de carga aumentan 2 veces para una succión de Su=32kPa con respecto al suelo saturado, para Su=82kPa con respecto a la capacidad de carga del suelo saturado aumenta 2.78 veces para una Su=142kPa aumenta 3.56 veces en comparación con el suelo saturado, análisis realizado para una carga axial de 300kN.

Como se aprecia en la Figura 3. b) con el aumento de la succión aumenta la tensión límite de linealidad. Para el suelo de la Laguna de Oxidación en Villa Clara los valores de tensión límite de linealidad aumentan 1.64 veces para una succión de Su=32kPa con respecto al suelo saturado, para Su=82kPa con respecto a la del suelo saturado aumenta 2.49 veces y para una Su=142kPa aumenta 3.16 veces en comparación con el suelo saturado, análisis realizado para una carga axial de 400kN, el comportamiento es similar para todas las cargas estudiadas. Como se puede observar de este análisis, los incrementos de la tensión límite de linealidad con el aumento de la succión son menores que los aumentos relativos que ocurren al chaquear la capacidad de carga, además los aumentos de la capacidad de carga provocan que se requieran áreas de cimientos pequeños para satisfacer dicho estado y como los suelos son muy consolidables no es recomendado utilizar el valor del área de base del primer estado límite para el cálculo de las deformaciones, proponiendo utilizar el área de la base del diseño por linealidad para la determinación de los asentamientos en el segundo estado límite. De ahí en la Figura 4 se muestra el comportamiento descrito que evidencia el descenso del área de la base al aumenta la succión presente en los suelos estudiados.

Figura 4. Curvas de área de la base vs succión, suelos

Tabla 4 Resumen de los asentamientos para el comportamiento de Su (kPa) vs b=l (m)

|  |  |
| --- | --- |
| Suelo | Laguna de Oxidación |
| Su(kPa)/b=l(m) | 0 | 32 | 82 | 142 |
| Sr 100% | Sr 98% | Sr 90% | Sr 80% |
| 1.3 | 2.31 | 1.77 | 1.71 | 1.68 |
| 1.6 | 2.70 | 2.15 | 2.05 | 2.01 |
| 2.0 | 3.39 | 2.84 | 2.74 | 2.72 |

Figura 5. Curvas de Asentamiento vs succión, suelos

En la Figura 5 se muestran los gráficos de Asentamiento vs Succión para diferentes áreas obtenidas en los diseños, con las cargas estudiadas. En las mismas se evidencia que al ocurrir un aumento de las succiones los asentamientos en el suelo disminuyen, esto ocurre en un 25% para cambios de saturaciones de 100% a 95% y en un 28% para cambios de saturaciones de 100% a 90%, aunque como se aprecia en el intervalo de 95% a 90% existe un cambio de pendiente en la gráfica donde los asentamientos disminuyen en 3%.

Una vez realizado el diseño teórico expuesto, se procede al análisis de los resultados obtenidos, a través de gráficos que permiten caracterizar el comportamiento de cada suelo sometido a diferentes condiciones de carga y grado de saturación, con la succión matricial correspondiente en cada caso. En las siguientes figuras se muestran los resultados:

Figura 6. Curva de capacidad de carga entre tensión límite de linealidad vs succión.

Figura 6 Curva de capacidad de carga entre tensión límite de linealidad vs succión Como se observa en las figura anterior la relación entre la capacidad de carga y la tensión límite de linealidad se mantiene casi constante y varia de un intervalo de succión a otro, siempre siendo esta relación mayor que dos.

Figura 7. Curva de los lados de la cimentación obtenidos por asentamiento vs succión.

El comportamiento de los lados de la cimentación obtenidos por un asentamiento permisible de 8cm disminuye a medida que aumenta la succión, donde el mayor cambio de pendiente en las rectas ocurre entre el suelo saturado y 98% de saturación.

Figura 8. Curva de Asentamiento vs Su

En la figura 8 se representa el comportamiento de los suelos para la mayor carga analizada, con el área del suelo saturado de 2m, se observan las curvas que muestran los asentamientos obtenidos son menores a medida que aumentan los valores de succión del suelo; por lo tanto las deformaciones que se producen en los suelos parcialmente saturados son menores que las que ocurren en la condición crítica de este (100% grado de saturación); quedando demostrado que los métodos empleados para dicho cálculo son válidos y factibles para las condiciones cubanas.

**4. Conclusiones**

* En los suelos parcialmente saturados el estado crítico que predomina es el 2do Estado Límite, para la combinación de carga estudiada que considera carga vertical centrada y de larga duración, ya sea por tensión de linealidad o por asentamiento, debido a que las propiedades físico-mecánicas del suelo en este estado aumentan, mejorando el comportamiento ante las cargas actuantes.
* Para los suelos predominantemente cohesivos analizados, al aumentar la succión aumenta la tensión límite de linealidad y los asentamientos disminuyen, por lo que el suelo trabaja en la zona de comportamiento lineal, en las cimentaciones superficiales sometidas las cargas axiales estudiadas.
* Se determinó que el área final obtenida en el diseño geotécnico para suelos parcialmente saturados y predominantemente cohesivos, es menor que para suelos saturados, donde la capacidad de carga en estado de saturación parcial, aumenta a medida que aumenta la succión y no se plantea como la condición crítica de diseño al obtener áreas requeridas más pequeñas que por linealidad.

**5. Referencias bibliográficas**

1. Alonso, E., Gens, A., & Hight, D. (1987). Special Problems Soils. *General report. Proc. 9th European Conf. Soil Meh. Fdn Engng, Dublin, 3*, 1087-1146.
2. Barrera Bucio, M., & Garnica Angusa, P. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terretres.
3. Alonso, E., Gens, A., & Hight, D. (1987). Special Problems Soils. *General report. Proc. 9th European Conf. Soil Meh. Fdn Engng, Dublin, 3*, 1087-1146.
4. Barrera Bucio, M., & Garnica Angusa, P. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terretres.
5. Braja, M. (2000). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (Primera ed.). California State University, Sacramento: Thomson-Learning.
6. Fathi M.O. Mohamed, S. K. (2007). Bearing capacity and settlement behaviour of footings in an unsaturated sand.
7. Fredlund, D. (1979). Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Geotechnical Journal, 16*, 121-139.
8. NC-XX, 2. (2004). *Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales.* Santa Clara: UCLV.
9. Ochoa, V. E. (2012). SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS, DE LA INVESTIGACION A LA CATEDRA UNIVERSITARIA. MEDELLIN: ISSNO120-3630: Boletin de Ciencias de la Tierra.
10. Trista, J. G. (2015). La Hbana, Cuba.
11. VANAPALLI, S. K., & TAEK OH, W. (2011). Mechanics of Unsaturated Soils for the Design of Foundation Structures. Ottava, Canada.
12. Venapalli, S. K., & Mohamed, F. M. (2007). Bearning Caapacity of Model Footins in Unsaturated Soils. Ottawa,Canada.