**XII SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA**

**Estimación de la capacidad de carga de cimentaciones superficiales** **sobre suelos cohesivos parcialmente saturados**

***Estimation of the load capacity of surface foundations on partially saturated cohesive soils***

Ing. Claudia María Rodríguez Rodríguez 1, Dr. Cs. Gilberto Julio Quevedo Sotolongo 2, Ing. Ana Lucia García Suárez 3.

1. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, claudiamrr@uclv.cu
2. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, quevedo@uclv.edu.cu
3. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, agsuarez@uclv.cu

En nuestro país es necesario profundizar en el estudio de los suelos parcialmente saturados, ya que existen importantes problemas geotécnicos donde el estudio de la saturación parcial es fundamental. La estimación de la capacidad de carga de cimentaciones superficiales a través de las formulaciones de la mecánica de suelos convencional para suelos parcialmente saturados puede subestimar los valores de capacidad de carga y conducir a diseños conservadores. La capacidad de carga de cimentaciones superficiales se ha estimado asumiendo en todos los casos que el suelo se encuentra saturado, sin embargo, estas se encuentran por encima del nivel freático y generalmente están en contacto con suelos en un estado de saturación parcial. En la presente investigación se muestran los principales aspectos planteados por varios autores para estimar capacidad de carga de los suelos parcialmente saturados empleándose la formulación propuesta por Brinch-Hansen, teniendo en cuenta los parámetros de resistencia a cortante modificados debido al efecto de la succión. Obteniéndose la variación de la capacidad de carga de una cimentación superficial cuadrada, en estado de saturación total y parcial, estimando los parámetros de resistencia del suelo parcialmente saturado (c y φ) tomando en consideración las formulaciones propuestas por Vanapalli, para cada grado de succión matricial estudiado del suelo del Instituto Pedagógico Félix Varela.

**Abstract:**

In our country it is necessary to deepen the study of partially saturated soils, since there are important geotechnical problems where the study of partial saturation is fundamental. The estimation of the load capacity of surface foundations through the formulations of conventional soil mechanics for partially saturated soils can underestimate load capacity values ​​and lead to conservative designs. The load capacity of surface foundations has been estimated assuming in all cases that the soil is saturated, however, these are above the water table and are generally in contact with soils in a state of partial saturation. The present research shows the main aspects raised by several authors to estimate the load capacity of partially saturated soils, using the formulation proposed by Brinch-Hansen, taking into account the modified shear resistance parameters due to the effect of suction. Obtaining the variation of the load capacity of a square surface foundation, in a state of total and partial saturation, estimating the parameters of resistance of partially saturated soil (cy φ) taking into consideration the formulations proposed by Vanapalli, for each degree of matrix suction studied from the soil of the Felix Varela Pedagogical Institute.

**Palabras claves:** Suelos no saturados; capacidad de carga; curva característica; succión

**Keywords:** Unsaturated soils; bearing capacity; characteristic curve; suction

**1. Introducción**

La Mecánica del Suelo tradicional se ha ocupado del estudio principalmente de los suelos saturados. Ello se debe a que, en general, a que los parámetros de resistencia en los suelos parcialmente saturados son mayores, por lo que es más conservador suponer que, en cualquier caso, los suelos pueden estar saturados y, por otra parte, el estudio de los suelos saturados es menos complejo desde el punto de vista práctico y experimental; pero según ([Alfaro Soto, 2008](#_ENREF_1)) gran parte de la población del mundo se encuentra situada en centros urbanos donde predominan suelos con un nivel freático profundo, por encima de este, los vacíos del suelo se encuentran llenos de agua y aire.

El parámetro que delimita la mecánica de suelos saturada de la parcialmente saturada es la “succión” la cual está asociada a la capacidad de un suelo para absorber y retener agua y nos permite explicar por qué existe agua por encima del nivel freático ya que, si el movimiento del agua en suelo estuviera influenciado solamente por las fuerzas gravitacionales, el nivel freático supondría una barrera natural.

Según Fredlund et al. (1994), la curva de retención del agua en el suelo puede ser definida como la variación de la succión con la capacidad de retención del agua en los macro y micro poros del suelo y existen diversas técnicas para su obtención ya sean directas o indirectas, en la investigación se utiliza la técnica indirecta del papel de filtro debido a la posibilidad existente en el país para su aplicación y a partir de la misma determinar la variación de los parámetros de resistencia a cortante del suelo según las expresiones definidas por Vanapalli para determinar la capacidad de carga en los mismos.

**2. Metodología**

La cimentación es el elemento estructural que se encarga de trasmitir a los suelos de su base las cargas que bajan de la estructura de forma tal que no se produzca fallo por capacidad de carga y no se produzcan deformaciones en la base que sean perjudiciales a los elementos de la estructura soportados. ([NC, 2007](#_ENREF_8))

La capacidad de carga de las cimentaciones superficiales, no es más que la capacidad del suelo de la base de soportar la acción de las cargas sin que se produzcan fallas generales por resistencia a cortante dentro de la masa de suelo. ([NC, 2007](#_ENREF_8))

Para la determinación de la capacidad de carga considerando el suelo saturado, algunos autores han desarrollado a través de la historia de la mecánica de suelos varias expresiones; hace ya varias décadas se han realizado investigaciones donde se plantean estas expresiones para el caso de los suelos parcialmente saturados, de una forma sencilla e introduciendo los parámetros que se ven afectados por el efecto de la succión.

La variable de estado de tensiones asociada con el suelo saturado es el esfuerzo efectivo, (σ - U), donde (σ) tensiones normales totales, y (U) la presión del agua intersticial. Para un suelo parcialmente saturado el cambio de tensión total y los cambios de presiones de agua deben ser tratados de forma independiente. Por lo tanto, (σ - ua) se define como la tensión neta total donde (ua) presión de aire, y (ua - uw) se define como la succión matricial del suelo. La expresión propuesta por Bishop plateada en 1956, para suelos parcialmente saturados es la siguiente:

σ´= (σ−ua) − χ (ua−uw). (1)

Donde:

(ua): la presión del aire

χ: es el parámetro relacionado con el grado de saturación (Sr)

(σ−ua): esfuerzo neto

(ua−uw): succión del suelo

Capacidad de carga en suelos saturados

Karl von Terzaghi enunció una de las primeras expresiones para la determinación de la capacidad de carga (1943), partiendo de las siguientes hipótesis: El ancho (B) del cimiento se considera mayor que la profundidad de cimentación (cimiento superficial) y su longitud es infinita. Se desprecia la resistencia al corte por encima del nivel de cimentación, suponiéndose el terreno por encima como una sobrecarga q=γd, que actúa en un plano paralelo a la base. Se considera el más general de los casos de suelo; con cohesión y fricción.

La expresión para la capacidad de carga, según Terzaghi es:

 (2)

Donde:

* qbr: Máxima capacidad de carga, kN/m2
* C: Cohesión efectiva, kPa
* : Peso específico, kN/m3
* d: Profundidad del cimiento, m
* B: Ancho del cimiento, m
* Nc, Nq, Nγ: Factores de capacidad debido a la cohesión (c), a la sobrecarga (q) y al peso del suelo (γ), y se obtienen en función del ángulo de fricción interna (φ).

Para suelos arenosos sueltos o arcillosos blandos, la falla ocurrirá antes, disminuyéndose la capacidad de carga en 1 ó 2 tercios. (2 C /3; 2 tg(φ) /3).

A partir de las consideraciones de Terzaghi, otros autores e instituciones prestigiosas (Brinch - Hansen 1961,1970; Sokoloski 1960; SNIP 1984; ANSI 1980; Eurocódigo 1997), han coincidido en la estructura de la expresión, observándose algunas variaciones en cuanto a los valores de los factores de capacidad (Nc, Nq, Nγ) a partir de considerar distintos modelos de falla.

La solución dada por Brinch y Hansen (1970) tiene en cuenta la corrección de Meyerhof, e incluye otros factores de corrección como:

* Forma de la cimentación (S (γ;c;q) ). Para un caso real, las dimensiones del cimiento son finitas y conocidas.
* Profundidad de cimentación (d (γ;c;q) ). A mayor profundidad mayor capacidad resistente de la base.
* Inclinación de la carga (i (γ;c;q) ). La inclinación produce una alteración en la distribución de tensiones disminuyendo la capacidad de carga.
* Inclinación del terreno (g (γ;c;q) ). La capacidad de carga varía respecto al ángulo de inclinación del terreno.

Teniendo en cuenta la estructura de la expresión planteada por Terzaghi y las correcciones hechas por sus sucesores, la expresión general para la capacidad de carga en suelos saturados, queda definida como:

qbr= 0.5γB´Nγ Sγ iγ dγ gγ + C’Nc Scic dcgc + q\*NqSqiqdqgq (3)

Donde:

* 1\* – Peso específico de cálculo por encima del nivel de cimentación, en el caso de existir más de un estrato en esta zona se toma un promedio ponderado de estos valores.
* 2\* – Peso específico de cálculo por debajo del nivel de cimentación, hasta una profundidad 1.5 B’
* L´ - Lado mayor entre l´ y b´
* B´- Lado menor entre l´ y b´
* N, NC, Nq- Factores de la capacidad de carga, que están en función de \*
* sγ , sq, sC – factores de corrección debido al efecto de la forma del cimiento
* iγ , ic, iq – factores de inclinación de la carga actuante.
* dγ, dc, dq -factores que valoran el efecto de la profundidad del cimiento dentro del estrato resistente D.
* gγ, gc, gq - factores de inclinación del terreno.

Para el caso de los suelos predominantemente cohesivos la formulación planteada por Brinch – Hansen, que es la que utiliza la norma cubana, se plantea como se muestra en la ecuación siguiente, que se modificó empleando los parámetros de resistencia del suelo parcialmente saturado, con la modificación de la cohesion en función del grado de saturación, como se muestra en la ecuación 8:

𝑞𝑢=5.14 𝐶*(𝑢nsat*) (1+𝑆𝑐´+𝑑𝑐´− 𝑖𝑐´−𝑔𝑐´) +𝑞´ (4)

𝐶𝑢 (𝑢nsat) =𝐶(𝑠at) (1+(𝑢𝑎−𝑢𝑤)/(𝑃𝑎/100) \*(𝑆𝑟)ν/𝜇) (5)

Donde 𝐶𝑢(sat) y 𝐶𝑢(𝑢nsat) es la resistencia a compresión bajo condición saturada y no saturada respectivamente, 𝑃𝑎 es la presión atmosférica siendo igual a 101,3 kPa, 𝑆𝑟 es el grado de saturación y v, μ son parámetros de ajustes, v=2

μ=9 para 8,0 ≤ IP (%) ≤ 15,5 y μ=2.10880 e0.0903 (IP) para 15,5 < IP (%) < 60,0

Capacidad de carga en suelos no saturados

*El marco para estimar la capacidad de carga es prometedor y puede ser extendido en la práctica de la ingeniería geotécnica para el diseño de bases usando la Mecánica de Suelos Parcialmente Saturados.*([Quevedo Sotolongo and Bernal Cordero, 2013](#_ENREF_9)).

En el 2007, mediante ensayos de laboratorio, Vanapalli y Mohamed proponen una expresión semi-empírica, modificando la propuesta inicial de Terzaghi en suelos predominantemente friccionales y considerando la succión matricial. ([Vanapalli and Mohamed, 2007](#_ENREF_11)). Además analizan el enfoque del esfuerzo total desarrollado por ([Skempton, 1948](#_ENREF_10)) readaptándolo para el caso de los suelos cohesivos puros parcialmente saturados y teniendo en cuenta la succión matricial.

 (Vanapalli y Mohamed 2007) plantean 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 c - φ y φ parcialmente saturados de la siguiente manera. (Mohamed et al. 2011), (Oh and Vanapalli 2011)

 (6)

, Donde: Ip: índice de plasticidad y (7)

Donde:

C´ es la cohesión saturada (kPa)

γ es el peso específico húmedo del suelo (kN/m3)

d es la profundidad a la que se encuentra el cimiento (m)

B es el ancho del cimiento (m)

(ua– uw) b Valor de entrada de aire en la curva característica. (kPa)

(ua-uw) AVR Valor promedio de entrada de aire. (kPa)

Φ´ es el ángulo de fricción efectivo (grados)

S es el grado de saturación (%)

Ψ es un parámetro de ajuste.

Sγ, Sq y Sc, son factores de corrección de forma

dγ, dq y dc son factores de corrección de profundidad.

 : Ángulo de fricción modificado en grados

 : Ángulo estimado de dilatancia en grados

Hay una transición suave entre capacidad carga de la ecuación propuesta por Vanapalli y Mohamed (2007) para suelos no saturados y lo convencional de Terzaghi (1943) teniendo la ecuación de capacidad de carga de los suelos saturados. En otras palabras, Vanapalli y Mohamed (2007) la ecuación será la misma que la ecuación de capacidad de carga de Terzaghi cuando el valor de succión matricial es igual a cero.

En Cuba los factores Nc, Nq, Nγ, se obtienen mediante el procedimiento explicado en la NC XX: 2004 que utiliza los factores propuestos por Brinch-Hansen. Además, el ángulo de fricción interna (φ) se modifica según la influencia del ángulo de dilatancia. ([Quevedo Sotolongo and Bernal Cordero, 2013](#_ENREF_9)) ([García Tristá, 2015](#_ENREF_3))

En el caso de los suelos predominantemente cohesivos ([Vanapalli, 2017](#_ENREF_12)) plantea que la capacidad de carga puede ser estimada por la expresión siguiente:

qu=6 𝐶𝑢(𝑢nsat) (8)

**3. Resultados y discusión**

Para la realización de este trabajo se emplearon muestras de suelo del ISP Félix Varela, en la zona norte de la ciudad de Santa Clara, perteneciente al reparto Camacho con vista a la circunvalación, con coordenadas: 607160 E 288870 N.

Los resultados de la granulometría de las muestras de suelo objeto de estudio se muestran en la figura 1 siguiendo las indicaciones de la norma ([NC-20, 1999](#_ENREF_4)) y ([NC-58, 2000](#_ENREF_5)):,

Figura 1. Curvas granulométricas promedio de las muestras de los suelos estudiados.

Los resultados de los límites de consistencia, así como peso específico relativo de los sólidos de las muestras de suelo se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Límites de consistencia y Peso específico de las muestras de suelo estudiadas

|  |  |
| --- | --- |
| **Parámetros** |  |
| Límite Líquido | 86.7 |
| Límite Plástico | 37.3 |
| Índice de Plasticidad | 49.4 |
| Peso específico relativo (Gs) | 2,73 |

En función de los resultados obtenidos en la granulometría y límites de consistencia del suelo estudiado estos se clasifican siguiendo las orientaciones de la norma ([NC-59, 2000](#_ENREF_6)) donde el suelo se clasifica como Arcilla alta compresibilidad, (CH) y por el AASHTO es un A – 7 – 5.

El ensayo de compactación se realizó usando la energía del Proctor, el mismo se realizó teniendo en cuenta la norma (NC-054-141. 1978), para obtener los parámetros de humedad y peso específico seco máximo y remoldear las muestras alteradas. Los resultados de la compactación con la energía del Proctor Estándar son de W opt=27.93% y γmax=13kN\m3.

**Obtención de la curva de retención del suelo estudiado**

Para determinar la succión, se tomó como base la norma ([ASTM. D 5298 10, 2010](#_ENREF_2)) correspondiente a: “Determinación de la Succión en los suelos”, los resultados experimentales de las succiones de las muestras de suelo empleado en la investigación se presentan en la figura 2. El ensayo se realizó empleando papel de filtro Whatman 42, mediante el cual se estima la succión del suelo midiendo indirectamente la cantidad de agua transferida por el espécimen de suelo parcialmente saturado al papel de filtro inicialmente seco. El contenido de agua del papel de filtro en equilibrio se mide gravimétricamente y relaciona la succión del suelo a través de una curva de calibración predeterminada para el papel filtro utilizado.

Figura 2. Curvas de retención de agua del suelo para la Succión Matricial.

El ensayo de corte directo se realiza con el objetivo de determinar los parámetros de resistencia del suelo (c y φ), teniendo en cuenta la norma ([NC-325, 2004](#_ENREF_7)) .Los escalones de carga aplicados a cada fueron de 50, 100, 200 y 400 kPa para ambos suelos. Como resultado de los esfuerzos máximos de las muestras de suelo ensayadas, en la figura 3 se representa la curva de σ vs máx.

Figura3. Gráficos de σ vs máx del suelo estudiado.

**Obtención de la capacidad de carga de una cimentación superficial.**

Para el análisis de las expresiones planteadas se realiza el diseño de una cimentación de lado b=l =1.25m, la cual estar sometida a una carga vertical, centrada; con la cual se realizará la valoración del comportamiento de la capacidad de carga con respecto a la succión.

Se analizarán tres tendencias, debido a que el valor de cohesión del suelo es tan pequeño, o sea que el suelo es predominantemente cohesivo, se aplicaran las expresiones 4, 6 y 8, en la expresión número 6 consideraremos el valor de Fi, como parámetro que aporta a la capacidad de carga. En la expresión número 6 se valorará el suelo como predominantemente cohesivo donde despreciaremos el valor de Fi presente y compararemos ambos resultados con la expresión determinada por Vanapalli 2017.

Figura 4. Gráficos de qu vs del suelo estudiado.

Como se muestra en la figura 4, a medida que aumenta la succión aumenta el valor de capacidad de carga del suelo para las expresiones aplicadas. Para el caso de la determinación de la capacidad de carga por la expresión de Brinch-Hansen considerando el suelo C-Fi los valores obtenidos de capacidad de carga superan a los obtenidos considerando el suelo como predominantemente cohesivo, lo que resalta el aporte de la fricción en la capacidad resistente del suelo.

En el estudio realizado por Vanapalli en el 2008, se plantea que los suelos granulares tienden a disminuir los valores de capacidad de carga para elevadas succiones en un rango de (200 a 300 kPa), en el estudio realizado se evidencia que en los suelos predominantemente cohesivos el aumento de la capacidad de carga es creciente para ese rango de trabajo, como se aprecia al aumentar la succión este incremento de capacidad resistente se acentúa, siendo esta diferencia desde 1% hasta obtener 17% de diferencia.

**4. Conclusiones**

En la Mecánica de Suelos tradicional no se trata el término “succión” el cual está asociado a las fuerzas capilares existentes en los mismos, en estado de saturación parcial, que afecta considerablemente su comportamiento e influye notablemente en los parámetros resistentes del suelo.

Para la obtención de la capacidad de carga de cimentaciones apoyadas en suelos parcialmente saturados se emplearon las formulaciones planteadas por Vanapalli para determinar los parámetros resistentes del suelo a partir de los resultados del ensayo de corte directo y las expresiones para determinar la capacidad de carga, tomando en consideración la formulación de Brinch-Hansen que es la recomendada en la (NC 2007).

En de suelo del ISP Félix Varela, que es clasificado como una arcilla de alta compresibilidad, la capacidad de carga aumenta al aumentar los valores de succión estudiados. En el mismo se aprecia que para el caso de estos suelos con la expresión planteada por Vanapalli se estiman valores superiores a los obtenidos por la expresión de Brinch Hansen sin considerar el aporte de la fricción, pero la misma se encuentra en el cono de variación que puede sufrir la capacidad de carga de este suelo desde su condición más crítica hasta la más favorable para su trabajo de soportar las cargas.

**5. Referencias bibliográficas**

ALFARO SOTO, M. A. 2008. Geotécnica en Suelos no Saturados. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias,* 32**,** 11.

ASTM. D 5298 10 2010. Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

GARCÍA TRISTÁ, J. E. A. 2015. Comportamiento volumétrico de un suelo de la formación Capdevila en condiciones de saturación parcial Jenny García. *Revista Cubana de Ingeniería,* Vol. VI, No. 2**,** 5 - 15.

NC-20 1999. Determinación de la granulometría de los suelos. *Geotecnia.* Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

NC-58 2000. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. *Geotecnia.* Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

NC-59 2000. Clasificación Geotécnica de los suelos. . *Geotecnia.* Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

NC-325 2004. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo (aparato de caja de corte pequeño). Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

NC 2007. Oficina Nacional de Normalización. *Propuesta de norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales.*

QUEVEDO SOTOLONGO, G. & BERNAL CORDERO, A. 2013. *Análisis teórico de la capacidad de carga de suelos parcialmente saturados.* Tesis de grado para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad Central Marta Abreu de las Villas.

SKEMPTON, A. W. “The u = 0 analysis for stability and its theoretical basis”. Proc. 2nd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1948. 72-77.

VANAPALLI, S. K. & MOHAMED, F. M. O. 2007. “Bearing capacity of model footings in unsaturated soils”. *Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Springer Proceedings in Physics.,* 112**,** 483 - 493.

VANAPALLI, W. T. O. A. S. K. 2017. Modeling the stress versus settlement behavior of shallow foundations in unsaturated cohesive soils extending the modified total stress approach.