



Ingeniería y Desarrollo

ISSN: 0122-3461

ISSN: 2145-9371

Fundación Universidad del Norte

GARCÍA TRISTÁ, JENNY; COBELO CRISTÍA, WILLIAN DANIEL;
QUEVEDO SOTOLONGO, GILBERTO JULIO; FLORES
BERENGUER, ISAIDA; RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, CLAUDIA MARÍA

Análisis del comportamiento tenso-deformacional de un suelo
parcialmente saturado para un cimiento circular bajo carga axial

Ingeniería y Desarrollo, vol. 38, núm. 1, 2020, Enero-Junio, pp. 181-196
Fundación Universidad del Norte

DOI: <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.620.112>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85270674011>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UDEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.38.1.620.112>

Análisis del comportamiento tenso-deformacional de un suelo parcialmente saturado para un cimiento circular bajo carga axial

*Analysis of tenso-deformacional
behavior of unsaturated soil for
circular foundation with axial load*

JENNY GARCÍA TRISTÁ *

WILLIAN DANIEL COBELO CRISTÍA **

GILBERTO JULIO QUEVEDO SOTOLONGO ***

ISAIDA FLORES BERENGUER ****

CLAUDIA MARÍA RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ *****

* Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).
Departamento de Estructuras (Cuba). Profesora auxiliar.
Doctora en Ciencias Técnicas. jenny@civil.cujae.edu.cu

** Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).
Departamento de Estructuras (Cuba), Profesor titular.
Doctora en Ciencias Técnicas. wcobelo@civil.cujae.edu.cu

*** Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV).
Departamento de Construcciones (Cuba). Profesor titular.
Doctor en Ciencias. quevedo@uclv.edu.cu

**** Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).
Departamento de Estructuras (Cuba). Profesora instructora.
Magíster en Ingeniería Civil. isaidafb@civil.cujae.edu.cu

***** Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV).
Departamento de Ingeniería Hidráulica (Cuba). Magíster en Estructuras.
Profesora instructora. claudiammr@uclv.cu

Correspondencia: Jenny García Tristá. Dirección: Calle 37 # 165 entre 6 y 8.
Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba.
Teléfono móvil: (+53)52491028. Teléfono oficina: (+53)72663818.



Resumen

El comportamiento de los suelos parcialmente saturados ha sido objeto de numerosos estudios en los últimos años en el ámbito de la mecánica de suelos, debido a las dificultades para la aplicación de las leyes tradicionales del comportamiento del suelo a los problemas geotécnicos que se plantean bajo condiciones de saturación parcial. La presente investigación ilustra una recopilación de los principales aspectos sobre el comportamiento de los suelos parcialmente saturados, para lo cual se toma como caso de estudio un cimiento circular de radio de 2 m sometido a carga axial. Esto con el objetivo de obtener las tensiones y deformaciones que sufre el suelo bajo estas condiciones y compararlas con las obtenidas para el suelo en estado saturado. El suelo de estudio es una arena arcillosa con presencia de cohesión y ángulo de fricción interna, proveniente de la formación Toledo, en La Habana. Para la modelación se empleó el software Sigma/W, en el que se incluyó los parámetros de la curva característica del suelo parcialmente saturado en el análisis realizado.

Palabras clave: cimiento circular, curva característica del suelo, succión, suelo parcialmente saturado.

Abstract

The behavior of unsaturated soils has been the subject of numerous studies in recent years in soil mechanics, due to the difficulties for the application of traditional laws of soil behavior to the geotechnical problems for unsaturation conditions. The present investigation illustrates a compilation of the main aspects about the behavior of unsaturated soils, taking as a case study a circular foundation of 2 meter radius subjected to axial load, in order to obtain the tensions and deformations suffered by the soil under these conditions and compare them with those obtained for the soil in a saturated state. The study floor is a clay – sand floor with the presence of cohesion and friction angle, coming from the Toledo formation in Havana. For the modeling the software used was SIGMA/W where the parameters of the characteristic curve of unsaturated soil were included in the analysis.

Keywords: circular foundation, suction, the soil-water characteristic curve, unsaturated soils.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la mecánica de suelos no saturados se inició en 1970, cuando se desarrollaron las formulaciones de los conceptos y las teorías fundamentales. Sin embargo, estos conceptos y teorías no han sido implementados en la práctica profesional y no hacen parte de las áreas de formación en los programas de ingeniería civil. A diferencia de los suelos secos o saturados, los suelos parcialmente saturados se conforman por tres fases: sólida, líquida y gaseosa; es decir, los espacios vacíos están ocupados por aire y por agua. La fase sólida, constituida por las partículas sólidas del suelo y el agua higroscópica contenida en la capa absorbida y en la doble capa difusa; la fase líquida, compuesta por el agua libre (agua que se mueve por la fuerza gravitacional), el aire disuelto y las sales disueltas, ocupa el espacio de los poros del suelo no ocupados por la fase gaseosa, la cual ocupa el espacio de los poros del suelo no ocupado por la fase líquida, integrada por el aire libre, el vapor de agua y otros gases (anhídridos sulfurosos y carbónicos) [1].

El estudio del comportamiento geotécnico de los suelos se ha desarrollado en consideración a que los suelos se encuentran saturados o secos. Sin embargo, existen importantes problemas geotécnicos en los que el estudio de la saturación parcial es fundamental, ya que gran parte de las formaciones geológicas del planeta están constituidas por suelos parcialmente saturados [2]–[5].

En las últimas décadas se propusieron diferentes métodos empíricos y semiempíricos para la estimación de asentamientos en el terreno. Investigaciones más recientes realizan dichas estimaciones a partir de modelaciones numéricas, principalmente, con base en el método de los elementos finitos, el cual permite representar aspectos tales como el comportamiento del suelo y la interacción suelo-estructura, así como simular secuencias de construcción [6].

2. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

Succión en suelos parcialmente saturados

Un suelo parcialmente saturado tiene la tendencia a recibir agua y aumentar su grado de saturación. Ahora bien, si el suelo tiene determinado grado de saturación se requiere cierta fuerza para remover el agua del espacio poroso y disminuir el grado de saturación del suelo, efectos que se pueden explicar mediante la succión [7].

El efecto de la succión en un suelo parcialmente saturado se refiere a la energía de adsorción, lo que provoca un aumento de la resistencia por el efecto cohesivo. Esta succión se considera compuesta por dos sumandos (ecuación 1), y sus magnitudes

pueden variar desde 0 kPa a 1 GPa, [2], [8], [9]. Por otra parte, J. R. Standing plantea que la succión es la presión isotrópica que impone el agua que ocupa los poros del suelo al absorber más agua [10].

$$S = S_m + S_o \quad (1)$$

Donde:

S_m : succión matricial, es la presión negativa de agua intersticial. Esta succión está directamente relacionada con el estado de esfuerzo derivado de los fenómenos de superficie y gravitatorios; es decir, $(u_a - u_w)$; donde u_a es la presión de poros de aire y u_w es la presión del agua intersticial.

S_o , succión osmótica, es la presión negativa de agua pura a la que habría que someter una masa de agua con la misma composición que la intersticial, a fin de estar en equilibrio a través de una membrana semipermeable. Esta succión estará relacionada con la presión osmótica derivada de la composición del agua [11].

S , succión total, es la suma de la succión matricial y la succión osmótica del suelo.

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

Asentamientos en suelos

La reducción del volumen de los vacíos en una masa de suelo bajo la acción de una carga se define como las deformaciones en los suelos saturados. En la figura 1 se especifica la clasificación de los métodos empleados para calcular dichas deformaciones.

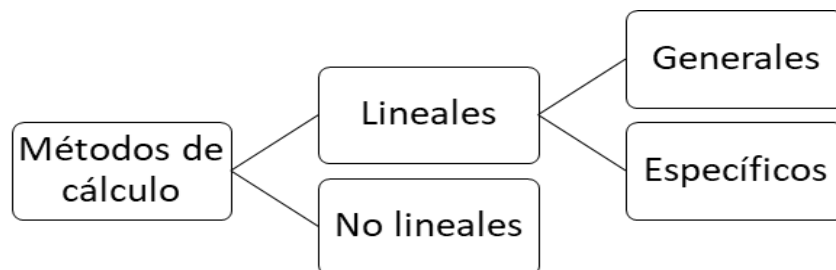


FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS

El método lineal se caracteriza por tener una relación tenso-deformacional lineal del comportamiento de los suelos, y suele ser general o específico. Cuando se aplica a cualquier tipo de suelo, sin importar las condiciones en las que este se encuentre, son generales; cuando existe cierto caso particular de algún tipo de suelo determinado, son específicos [12].

Los métodos de cálculo de asentamientos se basan, fundamentalmente, en el análisis del comportamiento deformacional del suelo mediante variables como la relación de vacíos (e), o el espesor de los estratos que van a soportar el cimiento, entre otros. Entre estos se encuentra el método de la sumatoria de capas, el cual se puede emplear para la determinación del asentamiento absoluto lineal en los puntos característicos de la base de un cimiento (figura 2), mediante las expresiones (2), (3), y (4).

$$S_c = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{6} (\varepsilon_{is} + 4\varepsilon_{ic} + \varepsilon_{ii}) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta \sigma'_{zp}}{E_o} = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad (3)$$

$$\Delta e = C_c [\log(\sigma'_{zg} + \Delta \sigma'_{zp}) - \log(\sigma'_{zg})] \quad (4)$$

Donde,

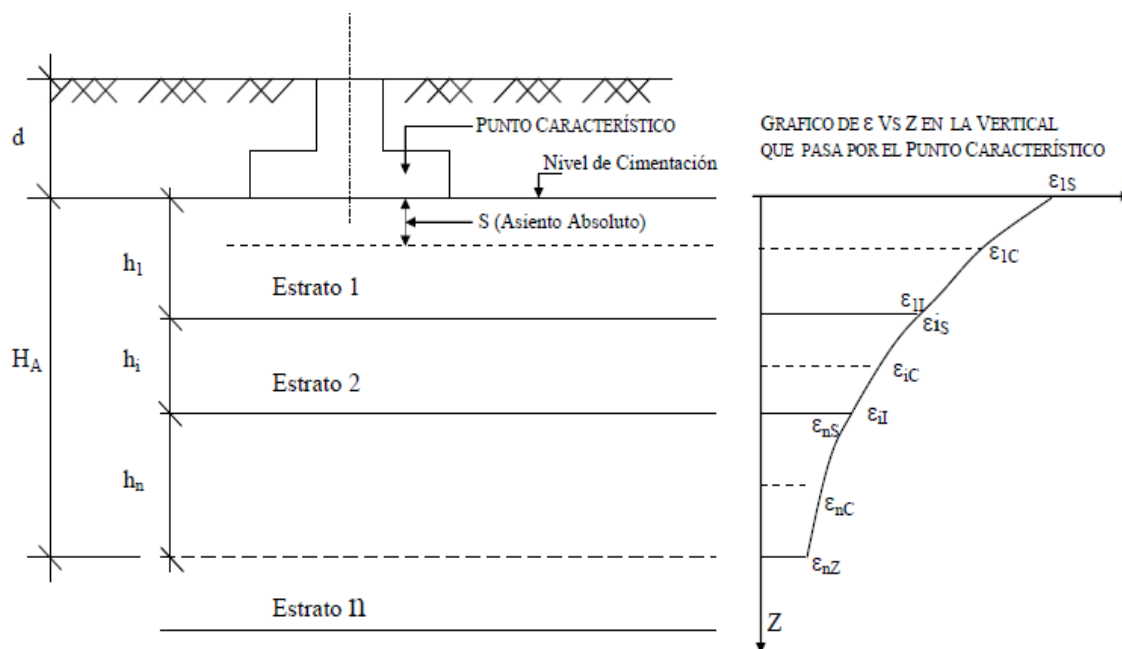
n : cantidad de estratos por debajo del nivel de cimentación hasta una profundidad igual a la potencia activa.

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

ε_{is} : variación de la deformación unitaria vertical en un punto de la frontera superior (i) calculado en una vertical que pase por el punto característico del cimiento donde se calculará el asiento absoluto.

• ε_{ic} : variación de la deformación unitaria vertical en un punto del centro del estrato (i) calculado en una vertical que pase por el punto característico del cimiento en el que se calculará el asiento absoluto.

ε_{ii} : variación de la deformación unitaria vertical en un punto de la frontera inferior (i) calculado en una vertical que pase por el punto característico del cemento en el que se calculará el asiento absoluto.



Fuente: NC-2018 Diseño geotécnico de cimentaciones superficiales

FIGURA 2. MÉTODO DE LA SUMATORIA DE CAPAS PARA EL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS ABSOLUTOS [13]

Este método lo adopta la norma cubana para el cálculo de asentamientos, agregando además una metodología para el cálculo de asentamientos diferenciales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del suelo Toledo

Para la realización de los ensayos en el suelo objeto de estudio y su clasificación se siguieron las orientaciones a las normas NC actualmente vigentes con relación a: determinación de la granulometría [14], peso específico [15], límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad [16], Proctor estándar [17], y el ensayo de corte directo [18]; para el ensayo de succión [19] se empleó la norma ASTM vigente. Los resultados de los ensayos físicos y mecánicos realizados a las muestras de suelos estudiadas se muestran en la tabla 1.

Granulometría, límite de consistencia, peso específico y compactación

Los resultados de la granulometría, de los límites de consistencia y del peso específico relativo de las partículas sólidas de las muestras de suelo objeto de estudio se presentan en la tabla 1.

TABLA 1. PROPIEDADES DEL SUELO TOLEDO

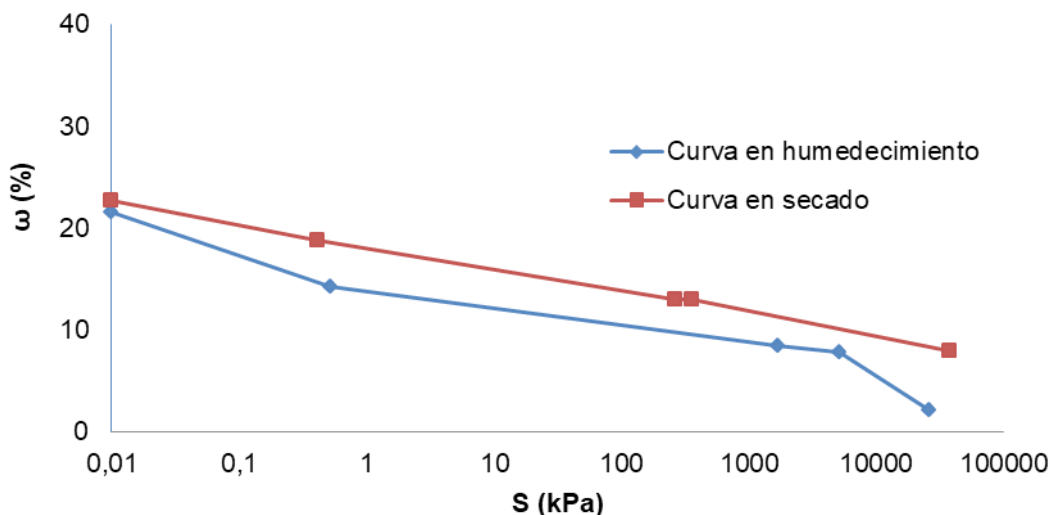
Parámetros	Unidades de medidas	Capdevila
Grava	(%)	28,17
Arena	(%)	34,10
Limos y arcillas	(%)	37,15
Límite líquido (LL)	(%)	63
Límite plástico (LP)	(%)	30
Índice de plasticidad (IP)	(%)	33
Peso específico relativo de las partículas sólidas (Gs)		2,72
Peso específico seco ($\gamma_{d-máx}$)	(kN/m ³)	18,91
Humedad óptima (ω_{opt})	(%)	12

Fuente: elaboración propia

En función de los resultados obtenidos en la granulometría y los límites de consistencia del suelo estudiado se clasifica como SC (arena arcillosa con grava).

Curva de retención del suelo estudiado

A fin de determinar la succión se tomó como base la norma ASTM de obtención de la succión en el laboratorio [19]. Los resultados experimentales de las succiones de las muestras de suelo empleado en la investigación se presentan en la figura 3. El ensayo de succión se realizó empleando papel de filtro Whatman 42.



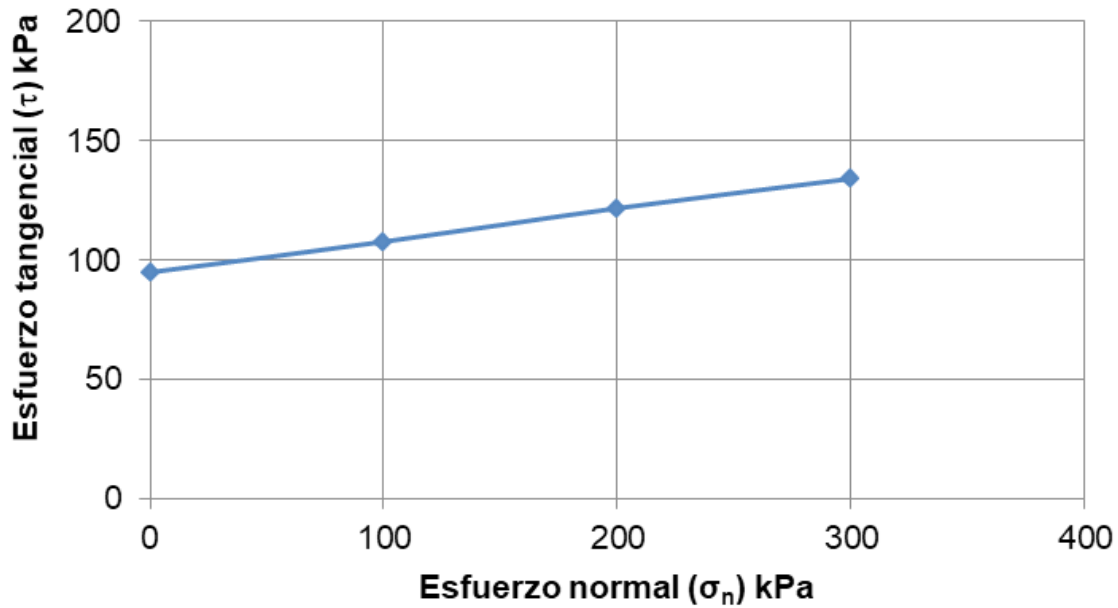
Fuente: elaboración propia

FIGURA 3. CURVA CARACTERÍSTICA PARA EL SUELO DE LA FORMACIÓN TOLEDO

Parámetros de resistencia saturados del suelo estudiado

Este ensayo se realiza con el objetivo de determinar los parámetros de resistencia del suelo (c y ϕ), en conformidad con la norma NC-352 correspondiente a “Geotecnia. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo (aparato de caja de corte pequeño)” [18]. Para la realización de este ensayo se utilizaron muestras compactadas con la energía del Proctor estándar. A cada una de las muestras se le aplicó una carga vertical de 50, 100 y 200 kPa, con una velocidad de aplicación de 0,61 mm/min para el suelo Toledo.

Como resultado de los esfuerzos máximos de las muestras de suelo ensayadas, en la figura 4 se representa la curva de σ vs $\tau_{\text{máx}}$.



Fuente: elaboración propia

FIGURA 4. CURVA DE Σ VS $T_{MÁX}$ PARA EL SUELO DE LA FORMACIÓN TOLEDO

Como resultado del gráfico de la figura 4 se tiene que los parámetros de resistencia para el suelo de la formación Toledo son los que se presentan en la tabla 2. El ensayo se realizó con muestras de suelos saturadas por medio de la inundación de la caja de corte.

TABLA 2. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LOS SUELOS OBJETOS DE ESTUDIO

Parámetros	Toledo
Cohesión (kPa), C	95
Ángulo de fricción interna ($^{\circ}$), ϕ	7,5

Fuente: elaboración propia

El muestreo se realizó de acuerdo con un procedimiento aleatorio en el sitio geológico de la formación Toledo. Las muestras se extrajeron sin alterar, de acuerdo con la normativa correspondiente. Después de realizar cinco ciclos de pruebas de laboratorio, se determinaron los valores promedio de las propiedades y los parámetros para cada suelo estudiado.

Resultados del comportamiento tenso-deformacional para el suelo Toledo

El caso de estudio de la investigación es una cimentación superficial circular de radio de 2 m y 0,5 m de peralte total de la base. La cimentación estará apoyada sobre el suelo Toledo, donde se determinará el comportamiento tenso-deformacional de este cuando ocurran variaciones del grado de saturación. Este caso de estudio fue modelado en su totalidad en el software Sigma/W.

El suelo de soporte del modelo geométrico está representando en un semiespacio infinito cuyas dimensiones son de 12 m de ancho y 10 m de profundidad. Para el dimensionamiento del subdominio suelo se empleó el criterio de potencia activa (H_a), al tomar en consideración lo planteado en la propuesta de la norma cubana [13], ya que este debe ser acotado a un volumen finito cuyas dimensiones mínimas no afecten o introduzcan acciones no naturales en el comportamiento del sistema que se estudia.

La carga axial a la que está sometido el cimiento tiene un valor de 2200 kN y el área es igual a 12,56 m², por lo que la carga introducida al modelo será igual a 700 kPa a lo largo de toda la base de la cimentación.

Con el propósito de definir las condiciones de bordes se decidió, para la frontera lateral, restringir los desplazamientos horizontales (no así los verticales), a fin de permitir el reajuste de las partículas del suelo y que los desplazamientos en ese sentido se propaguen hasta el final del continuo sin generar distorsiones en el modelo numérico; también se restringieron los movimientos en el borde exterior del modelo.

El modelo constitutivo del suelo se asume con un comportamiento elasto-plástico según el criterio de Mohr-Coulomb, a fin de aprovechar el comportamiento del material sometido a esfuerzos que sobrepasan el límite de linealidad elástica y la formación de zonas de plastificación. El criterio de fallo permite evaluar el estado tensional del material en cada incremento de esfuerzo para determinar su estado de comportamiento (elástico o plástico).

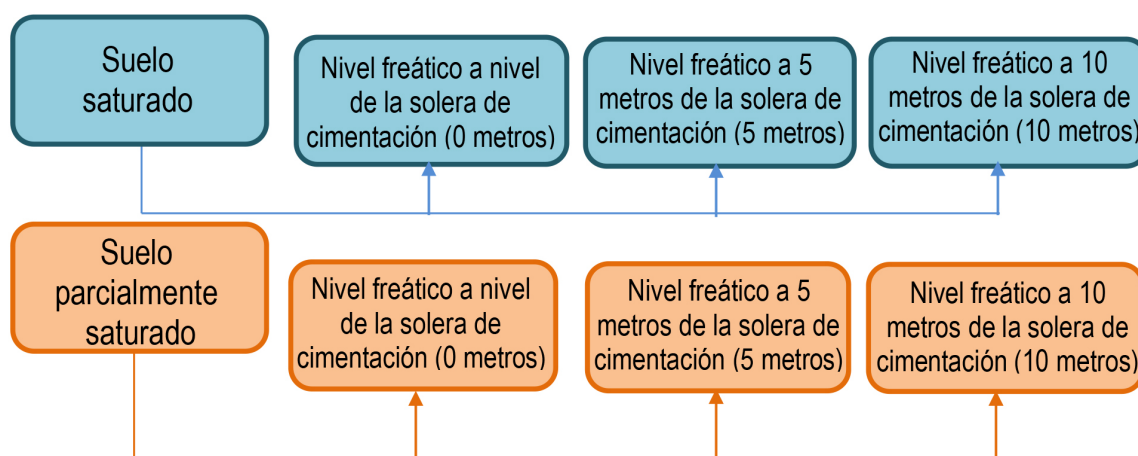
El modelo de comportamiento atribuido al suelo cuenta con los parámetros de módulo de elasticidad ($E = 25\,000\text{ kPa}$) y coeficiente de Poisson ($\mu = 0,3$) [20]. Los parámetros que caracterizan su resistencia mecánica al esfuerzo cortante son: cohesión (c), ángulo de fricción interna (ϕ), obtenidos en el laboratorio, y ángulo de dilatación (ψ). Este último resulta polémico debido a su naturaleza, por lo que, a falta de un criterio único, se consideró un valor del 10 % del ángulo de fricción interna ($\psi = 10\% \phi$), según lo planteado por Mohamed [21] para suelos parcialmente saturados.

El modelo constitutivo empleado es un modelo elasto-plástico que permite describir el comportamiento tensión-deformacional de suelos parcialmente saturados, implementado en el software que se utilizó en la investigación con base en un análisis ma-

temático apoyado en elementos finitos. En lo concerniente al asentamiento se tomó como referencia la propuesta de la norma cubana de cimentaciones superficiales desarrollada en el 2018.

Análisis de la modelación del caso de estudio

En la figura 5 se muestran los casos definidos en la modelación para las diferentes consideraciones del suelo parcialmente saturado, en el que se incluirá en cada uno de los modelos los resultados obtenidos mediante la curva característica del suelo.



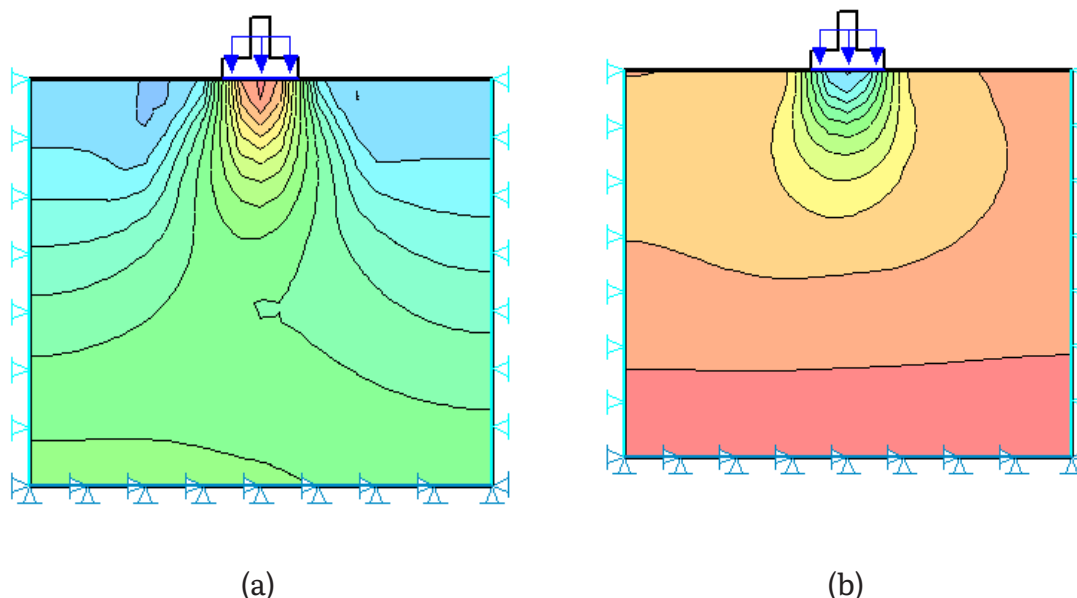
Fuente: elaboración propia

FIGURA 5. CASOS DE ESTUDIO DEFINIDOS EN LA MODELACIÓN

Con las condiciones descritas se procede a la obtención de las tensiones y deformaciones producidas bajo la cimentación circular apoyada sobre un suelo de formación cubana Toledo, manteniendo los parámetros de resistencia del suelo, a la vez que se varía el posicionamiento del nivel freático y se incorpora, posteriormente, la curva de retención.

Suelo saturado

En el análisis se detectó que no existieron cambios en las tensiones debido a la carga impuesta ni en las deformaciones, tal como se muestra en la figura 6, la cual ejemplifican el comportamiento de la masa de suelo para el suelo saturado.



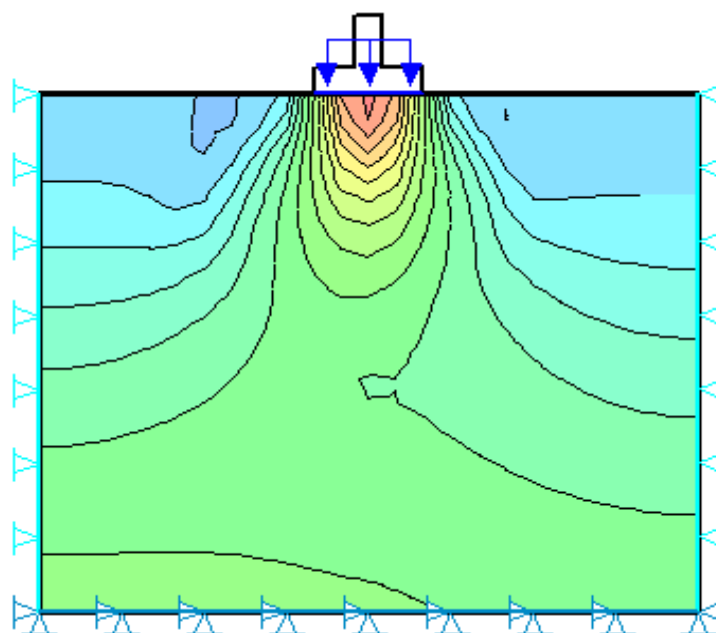
Fuente: elaboración propia.

FIGURA 6. A) TENSIONES DE PESO PROPIO + CARGA IMPUESTA PARA $NF = 0 \text{ m}$; B) ASENTAMIENTOS PARA $NF = 0 \text{ m}$

Al no observarse variación en el comportamiento de las tensiones debido a la carga impuesta ni en las deformaciones, es posible aseverar que cuando se considera en el análisis tenso-deformacional el suelo en estado saturado, no ocurre variación, aunque el nivel freático cambie a lo largo del análisis. Esto en razón a que ya se está considerando la condición más desfavorable del suelo.

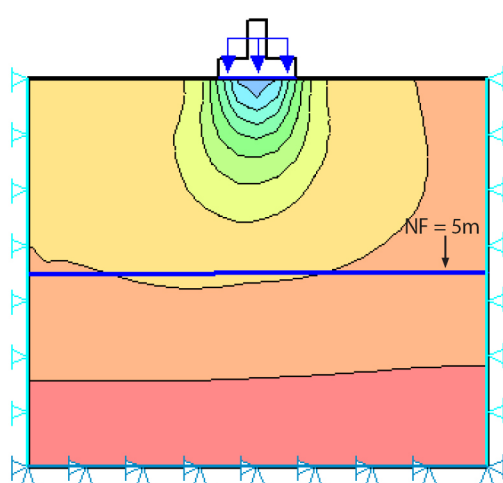
Suelo parcialmente saturado

En la figura 7 se muestra la distribución de tensiones debida a la carga impuesta que se produce en el suelo al incorporar la curva característica obtenida mediante los ensayos de laboratorio.

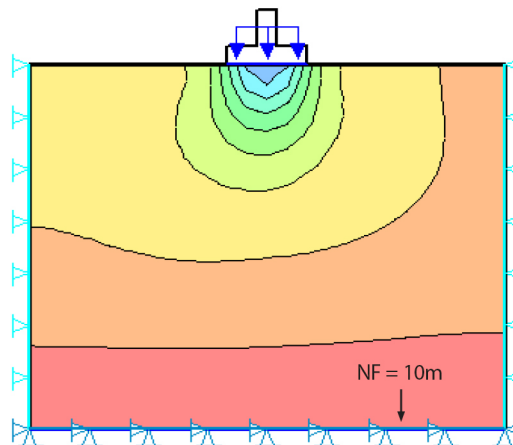


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 7. TENSIONES DE PESO PROPIO + CARGA IMPUESTA
PARA $NF = 0 \text{ m}$, $NF = 5 \text{ m}$ Y $NF=10 \text{ m}$



(a)



(b)

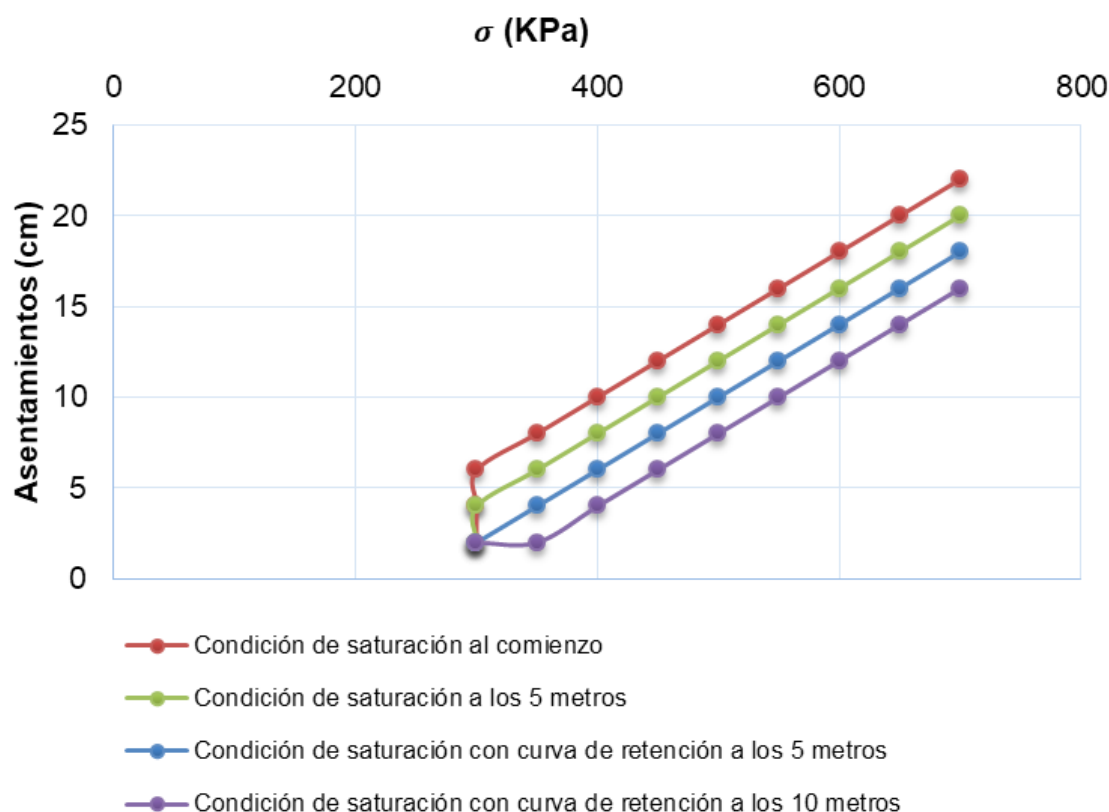
Fuente: elaboración propia.

FIGURA 8. A) ASENTAMIENTOS PARA $NF = 5 \text{ m}$; B) ASENTAMIENTOS PARA $NF = 10 \text{ m}$

En la figura 8 aparecen los asentamientos producidos con la variación del nivel freático, considerando el nivel freático a 5 m y 10 m de profundidad respecto al nivel del suelo donde se encuentra apoyado el cimiento circular estudiado.

Se muestra que los asentamientos varían en función de la profundidad a la que se encuentre el nivel freático, dado que a partir de la profundidad y de la curva característica cambia el comportamiento del suelo para el estado parcialmente saturado.

En la figura 9 se evidencia el comportamiento tenso-deformacional en las cuatro condiciones analizadas en la investigación.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 9. ASENTAMIENTOS Y TENSIONES DEBIDO A LA CARGA IMPUESTA PARA LOS CUATRO CASOS ESTUDIADOS

Asimismo, se aprecia que los asentamientos son mayores para la condición de saturación total del suelo y que disminuyen de manera progresiva en la saturación parcial a medida que el nivel freático se aleja de la base de la cimentación.

El suelo en su fase saturada ($NF = 0$ m) experimenta el mayor valor de asentamiento, haciéndose cada vez menor a medida que aumentan los valores de succión (figura 9). Esto se debe, fundamentalmente, a que en las curvas de compresibilidad del suelo (e vs σ), a medida que aumenta la succión, disminuye la variación de la relación de vacíos para un intervalo de tensión normal.

4. CONCLUSIONES

El estudio del suelo parcialmente saturado requiere del tratamiento de nuevas variables de esfuerzo, como, por ejemplo, la succión, que pueden afectar considerablemente su comportamiento resistente y deformacional.

El asentamiento en el suelo cohesivo-friccional de la formación Toledo en condición no saturada presenta una variación de los asentamientos entre un 10 % y 20 % en comparación con la condición saturada, a medida que aumenta la succión en el suelo producto de una disminución del grado de saturación.

REFERENCIAS

- [1] J. G. Tristá, «Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba», tesis de doctorado, Facultad de Construcciones, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, 2015.
- [2] M. Barrera, & P. Garnica, «Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres», *Publicación n.º 198*, Sanfandila, Querétaro, Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte, 2002, pp. 1-155.
- [3] D. G. Fredlund, & H. Rahardjo, *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, University of Saskatchewan, A Wiley-Interscience, 1993.
- [4] D. G. Fredlund, «Relevance of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering», *Conf. in Havana.*, 2002.
- [5] J. G. Tristá, W. Cobelo, & G. Quevedo, «Bearing capacity of footings in unsaturated soils employing analytic methods», *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 35, n.º 2, pp. 417-430, 2017. Disponible en: <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/issue/view/458>
- [6] V. Ballesteros, C. Sainea, & L. A. Cáceres, «Análisis de deflexiones y asentamientos en excavaciones profundas a cielo abierto en suelos blandos de Bogotá», *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 36, n.º 2, pp. 437-454, 2018. Disponible en: <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/issue/view/484>

- [7] C. Bönsch, & C. Lempp, *Shear strength affected by suction tension in unsaturated fine grained soils. Experimental unsaturated soil mechanics*. Springer, 2007.
- [8] J. Chae, B. Kim, S. Park, & S. Kato, «Effect of Suction on Unconfined Compressive Strength in Partly Saturated Soils», *Journal of Civil Engineering*, vol. 14, pp. 281-290, 2010.
- [9] A. O. A. Alanis, «Deformación volumétrica en suelos no saturados», tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, 2012. Disponible en: <http://hdl.handle.net/123456789/2317>.
- [10] J. R. Standing, «The development of unsaturated soil mechanics at Imperial College, London», en *Unsaturated Soils: Theory and Practice 2011*, 2011, pp. 119-138.
- [11] S. Sreedeeep, & D. N. Singh, «Methodology for determination of osmotic suction of soils», *Geotech. Geol. Eng.*, pp. 1469-1479, 2006. Doi: 10.1007/s10706-005-1882-7
- [12] D. G. Fredlund, & N. Morgenstern, «Constitutive relations for volume change in unsaturated soils», *Can. Geotech. J.*, vol. 13, n.o 3, pp. 261-276, 1976.
- [13] NC, «Diseño geotécnico de cimentaciones superficiales», Of. Nac. Norm., pp. 1-11, 2018.
- [14] NC-20, «Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos», Of. Nac. Norm., pp. 1-16, 1999.
- [15] NC-19, «Geotecnia. Determinación del peso específico de los suelos», Of. Nac. Norm., pp. 1-11, 1999.
- [16] NC-58, «Geotecnia. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos», Of. Nac. Norm., pp. 1-12, 2000.
- [17] NC, «Geotecnia. Método de ensayo para la determinación de las características de compactación del suelo en el laboratorio. (ASTM D 698:1991(1998), D 1557:1991, (1998) MOD)», Of. Nac. Norm., 2006.
- [18] NC-325, «Geotecnia. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo (aparato de caja de corte pequeño)», Of. Nac. Norm., pp. 1-41, 2004.
- [19] ASTM: D 5298-10, «Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper», en *The Annual Book of ASTM Standards*, vol. 11, American Society for Testing and Materials, 2010, pp. 1-6.
- [20] M. B. Das, *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Sacramento: California State University, Thomson Learning, 2008, pp. 1-600.
- [21] F. M. O. Mohamed, S. K. Vanapalli, & M. Saatcioglu, «Bearing capacity and settlement behaviour of footings in an unsaturated sand», en *14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011.