



**XIV SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTRUCTURAS,
GEOTECNIA Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.
ESTRUCTURAS 2025**

XIV COLOQUIO DE GEOTECNIA Y CIMENTACIONES

Diseño geotécnico de cimentaciones superficiales en suelos no saturados. Influencia de carga horizontal y momento

***Geotechnical design of surface foundations in unsaturated soils.
Influence of horizontal load and moment***

Msc. Ing. Meily de la Cruz Díaz¹, Msc. Ing. Claudia María Rodríguez Rodríguez²

- 1- Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Cuba. mdelacruz@uclv.cu
- 2- Trabajador por cuenta propia. Cuba. rclaudiamaria64@gmail.com

Resumen:

En los últimos años, se evidencia un notable aumento en el interés por el estudio de los suelos no saturados. Esto se debe, en gran parte, a las particularidades de su comportamiento geotécnico y al avance de técnicas de laboratorio que facilitan su caracterización físico-mecánica. El diseño geotécnico de las cimentaciones superficiales, utilizando las propiedades de estos suelos no saturados, se ha convertido en un área importante de investigación. En este contexto, el estado de las cargas que actúan es fundamental para el resultado. No solo se debe considerar la carga vertical, que proviene de efectos permanentes y temporales para calcular el área de la base, sino que también es crucial tener en cuenta las cargas horizontales y los momentos provocados por efectos de cargas especiales de viento o sismos. Por ello, el propósito de este trabajo es estimar cómo influyen las cargas horizontales y los momentos en el diseño geotécnico de las cimentaciones superficiales en suelos no saturados. Para lo cual se aplica el Método de los Estados Límites, tal como se propone en la normativa cubana para suelos saturados, adaptando las especificaciones para suelos no saturados, siguiendo las consideraciones de Vanapalli en la determinación de la capacidad de carga. Además, se evalúa el impacto del estado límite de estabilidad o deformación



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
**DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO**

frente a las cargas horizontales y momentos, para determinar cuál de estos estados de carga tiene mayor influencia en el cálculo del área de la base de las cimentaciones superficiales.

Abstract:

In recent years, there has been a notable increase in interest in the study of unsaturated soils. This is largely due to the specific characteristics of their geotechnical behavior and the advancement of laboratory techniques that facilitate their physical and mechanical characterization. The geotechnical design of surface foundations, utilizing the properties of these unsaturated soils, has become an important area of research. In this context, the state of the loads acting on them is fundamental to the result. Not only must the vertical load, which results from permanent and temporary effects, be considered when calculating the base area, but horizontal loads and moments caused by special wind loads or earthquakes are also crucial. Therefore, the purpose of this work is to estimate how horizontal loads and moments influence the geotechnical design of surface foundations in unsaturated soils. To this end, the Limit States Method is applied, as proposed in Cuban regulations for saturated soils, adapting the specifications for unsaturated soils, following Vanapalli considerations in determining bearing capacity. In addition, the impact of the limit state of stability or deformation under horizontal loads and moments is evaluated to determine which of these loading states has the greatest influence on the calculation of the base area of surface foundations.

Palabras Clave: Carga horizontal; Cimentaciones superficiales, Momentos, Suelos no saturados.

Keywords: Horizontal load; Surface foundations; Moments; Unsaturated soils.

1. Introducción

En la actualidad ha aumentado la necesidad de profundizar el conocimiento sobre los suelos no saturados, especialmente desde un enfoque experimental. Esto se hace posible gracias a nuevas tecnologías que permiten estudiar parámetros característicos de estos



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO

suelos lo cual garantiza una mejor comprensión de cómo se comportan estos suelos en términos de tensiones y deformaciones. (García Tristá J. , 2015) En Cuba, podemos determinar propiedades claves como la succión y el grado de saturación de los suelos no saturados utilizando la técnica indirecta del papel de filtro. Los resultados obtenidos son fundamentales para crear la curva característica del suelo, que muestra la relación entre el contenido de agua o grado de saturación y la succión del suelo. (de la Cruz Díaz, 2023) Estos parámetros tienen un impacto directo en las propiedades físico-mecánicas del suelo. Por ejemplo, al aumentar la succión, se incrementan aspectos como la cohesión y el ángulo de fricción interna, lo que a su vez influye directamente en el diseño geotécnico de cualquier tipo de cimentación que se apoye en suelos no saturados.

De acuerdo con la (NC-1321, 2019), la cimentación actúa como un elemento o conexión estructural que transfiere las cargas provenientes de la superestructura hacia el suelo. El diseño de una cimentación depende tanto de las características de la estructura como de las propiedades del suelo que la sostiene. El diseño geotécnico se basa en buscar una base de cimentación cuya área en planta sea capaz de soportar el vuelco y el deslizamiento provocado por los momentos y fuerzas desestabilizantes, generar una superficie de falla lo más grande posible para así proporcionar una capacidad de carga mayor en la base de la cimentación y además realizar un chequeo de la tensión límite de linealidad para calcular los asentamientos que se producen, ya sea por métodos lineales o no lineales. (Alvarez Ibarra & González Cueto-Vila, 2019) Es fundamental mencionar que el estado de las cargas que actúan sobre la cimentación influye directamente en su diseño geotécnico. Aunque la carga vertical, ya sea permanente o temporal, es un elemento clave en los resultados, no se debe pasar por alto la influencia de la carga horizontal generada por el viento o los sismos. Los momentos que se generan a partir de estas fuerzas también son significativos, ya que pueden modificar notablemente los resultados en el área de la base de las cimentaciones. Por lo que se plantea como objetivo estimar la influencia de las cargas horizontales y los momentos en el diseño geotécnico de las cimentaciones superficiales en suelos no saturados.



El Método de los Estados Límites se utiliza en el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales. En el estado límite de estabilidad, se evalúa el vuelco, el deslizamiento y la capacidad de carga. En el caso de los suelos que no están saturados, se realizan ajustes en las fórmulas; específicamente, para calcular la capacidad de carga, se emplea la fórmula de Brinch Hansen, adaptada con los ajustes propuestos por Vanapalli. Por otro lado, en el estado límite de deformación, se analiza la linealidad del suelo. Aquí, se determinan las deformaciones utilizando métodos que pueden ser tanto lineales como no lineales.

2. Metodología

El Método de los Estados Límites aplicado al cálculo de las cimentaciones superficiales se fundamenta en la obtención de un diseño donde las cargas y las tensiones a las que está sometido el suelo en las bases de los cimientos, así como las deformaciones y desplazamientos que ellas se originan en dichas bases estén cerca de los límites permisibles y nunca lo sobrepasan. Para ello las bases de los cimientos deben diseñarse a partir de los resultados de las investigaciones ingeniero-geológicas, hidrológicas y condiciones climatológicas de la zona de construcción, por otra parte, se debe tener presente la experiencia que se posea en condiciones ingeniero geológicas análogas, así como las características de la edificación, su estructura, las cargas que actúan sobre los cimientos y las condiciones locales de la zona de construcción. Asimismo, las características tenso-deformacional de la base de cimentación, que en función del tipo de suelo y el estado tensional actuante, determinarán el método de cálculo de las deformaciones a emplear, ya sea lineal o no lineal. (NC-1321, 2019)

2.1 Estado límite de estabilidad

Para el diseño por el primer estado límite deben satisfacerse las siguientes condiciones:

Vuelco: Se debe chequear que la combinación sea segura al posible vuelco garantizando que:

$$\Sigma \text{ Momentos}_{\text{estabilizantes}} \geq 1.5 \Sigma \text{ Momentos}_{\text{desestabilizantes}} \quad (1)$$

Deslizamiento: El terreno deberá ser capaz de equilibrar la componente horizontal de la resultante de los esfuerzos transmitidos al terreno oblicuamente sobre la superficie de



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO

contacto del cimiento y el terreno en 1.5 veces. El equilibrio se consigue por el rozamiento entre el cimiento y el terreno.

$$H^* \leq N^* \tan \varphi^* + 0.75b'l'c^* \quad (2)$$

$$\text{Siendo: } H^* = H' \gamma f \quad (3)$$

$$N^* = N' \gamma f + 20bld \quad (4)$$

$$\varphi^* = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \varphi}{\gamma_g \tan \varphi} \right) \quad (5)$$

$$c^* = \frac{c}{\gamma_{gc}} \quad (6)$$

$$l' = l - 2e_l^* = l - 2 \left(\frac{M'_l \pm H^* \cdot Hc}{N'^* + 20bld} \right) \quad (7)$$

$$b' = b - 2e_b^* = b - 2 \left(\frac{M'_b \pm H^* \cdot Hc}{N'^* + 20bld} \right) \quad (8)$$

Dónde: **H*** es la carga horizontal de cálculo; **H** es la carga horizontal en la unión del cimiento con la estructura; **N*** es la carga vertical resultante de todas las solicitaciones a nivel de cimentación; **N** es la carga vertical en la unión del cimiento con la estructura; **φ*** es el ángulo de fricción interna de cálculo del suelo; **φ** es el ángulo de fricción interna del suelo; **γ_gtanφ** coeficiente de cálculo de la tangente del ángulo de fricción interna del suelo; **b** es el lado menor de la base de la cimentación; **b'** es la porción que ejerce presión en la dirección de **b**; **l** es lado mayor de la base de la cimentación; **l'** es la porción que ejerce presión en la dirección de **l**; **c*** es la cohesión de cálculo del suelo; **c** es la cohesión del suelo; **γ_{gc}** es el coeficiente de cálculo de la cohesión; **γf** es el coeficiente de carga; **d** es la profundidad de cimentación; **e_l*** es la excentricidad con relación al plano paralelo del lado **l**; **e_b*** es la excentricidad con relación al plano paralelo del lado **b**; **M'_l** es el momento contenido en un plano paralelo al lado **l**; **M'_b** es el momento contenido en un plano paralelo al lado **b** y **Hc** profundidad de cálculo del cimiento hasta el estrato resistente.

Capacidad de carga: Debe cumplirse que la presión actuante sobre el terreno debido a las cargas impuestas por la estructura sea menor que la capacidad de carga del suelo donde se desplantó la misma.



$$N^* \leq Qbt^* \quad (9)$$

$$\text{Siendo: } Qbt^* = b'l' \left(\frac{qbr^* - q'^*}{\gamma_s} + q'^* \right) \quad (10)$$

Dónde: N^* es la carga vertical resultante de todas las solicitaciones a nivel de cimentación; Qbt^* es la carga bruta de trabajo resistente a la estabilidad de la base de la cimentación; b' es la porción que ejerce presión en la dirección de b ; l' es la porción que ejerce presión en la dirección de l ; qbr^* es la presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de la cimentación; q'^* es la presión efectiva de cálculo a nivel de cimentación alrededor del cimientto y γ_s es el coeficiente de seguridad adicional.

De las condiciones de diseño para el primer estado límite, en la mayoría de las situaciones resulta prevalecer el criterio de capacidad de carga, donde las expresiones difieren según el estado que presente el suelo.

2.1.1 Estado límite de estabilidad para suelos saturados φ y $C - \varphi$

Para el análisis de los suelos saturados, las expresiones de capacidad de carga empleadas serán las planteadas en la (NC-1321, 2019) a partir del empleo del método planteado por Brinch Hansen.

$$qbr^* = 0.5 \gamma_2^* B' N_\gamma s_\gamma i_\gamma d_\gamma g_\gamma + c^* N_c s_c i_c d_c g_c + (\gamma_1^* d + qsc^*) N_q s_q i_q d_q g_q \quad (11)$$

Dónde: γ_1^* es el 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; γ_2^* es el peso específico de cálculo por debajo del nivel de cimentación hasta una profundidad $1.5B'$; L' es el lado mayor entre l' y b' ; B' es el lado menor entre l' y b' ; N_γ , N_c , N_q son los factores de la capacidad de carga que están en función de φ^* ; s_γ , s_c , s_q son los factores de corrección debido al efecto de la forma del cimientto; i_γ , i_c , i_q son los factores de inclinación de la carga actuante; d_γ , d_c , d_q son los factores que valoran el efecto de la profundidad del cimientto dentro del estrato resistente D; g_γ , g_c , g_q son los factores de inclinación del terreno; d es la profundidad de cimentación y qsc^* es la sobrecarga circundante de cálculo alrededor del cimientto en la superficie del terreno.



2.1.2 Estado de estabilidad para suelos no saturados φ y $C - \varphi$

Para el cálculo de la capacidad de carga en cimentaciones superficiales tomando en consideración la condición de saturación parcial del suelo, tiene una marcada influencia las características; de este tipo de suelos como son la succión, la tensión y la sobrecarga.

Para suelos $C - \varphi$ (Vanapalli)

Se plantea la expresión 12 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. (Mohamed, Vanapalli, & Saatcioglu, 2011) y (Oh & Vanapalli, 2011)

$$q_u = \left[c_{sat}' + (u_a - u_w)_b (\tan \varphi_{sat}' - S_r^\Psi \tan \varphi_{sat}') + (u_a - u_w)_{AVR} S_r^\Psi \tan \varphi_{sat}' \right] N_c \zeta_c F_c + \gamma D_f N_q \zeta_q F_q + 0.5 \gamma B N_\gamma \zeta_\gamma F_\gamma \quad (12)$$

Dónde: c_{sat}' es la cohesión efectiva; γ es el peso específico húmedo; D_f es la profundidad del cimiento; B es el ancho del cimiento; $(u_a - u_w)_b$ es el valor de la entrada de aire de la curva de retención de agua del suelo; $(u_a - u_w)_{AVR}$ es la media del valor de entrada de aire; φ_{sat}' es el ángulo de fricción efectiva; S_r es el grado de saturación; Ψ es el parámetro de ajuste del modelo; $\zeta_c, \zeta_q, \zeta_\gamma$ son los factores de forma; F_c, F_q, F_γ son los factores de profundidad; N_γ, N_c, N_q son los factores de capacidad de carga.

Se realiza un ajuste a la expresión propuesta por Brinch- Hansen, que es la empleada en la (NC-1321, 2019), con los parámetros del suelo parcialmente saturado a los que hace referencia (Vanapalli & Oh, 2010) presentándose en la siguiente expresión:

$$q_u = \left[c' + (u_a - u_w)_b (\tan \varphi_{sat} - S_r^\Psi \tan \varphi_{sat}) + (u_a - u_w)_{AVR} S_r^\Psi \tan \varphi_{sat} \right] N_c S_c i_c d_c g_c + \gamma D_f N_q S_q i_q d_q g_q + 0.5 \gamma B N_\gamma S_\gamma i_\gamma d_\gamma g_\gamma \quad (13)$$

$$\psi = 1 + 0,34 (Ip) - 0,0031 (Ip^2) \quad (14)$$

$$\varphi_{unsat} = \varphi_{sat} + \Psi_d \quad (15)$$

Dónde: c' es la cohesión efectiva; γ es el peso específico húmedo; D_f es la profundidad del cimiento; B es el ancho del cimiento; $(u_a - u_w)_b$ es el valor de la entrada de aire de la curva de retención de agua del suelo; $(u_a - u_w)_{AVR}$ es la succión del intervalo a analizar;



ϕ_{sat} es el ángulo de fricción efectiva; S_r es el grado de saturación; Ψ_d es el parámetro de ajuste del modelo que depende del índice de plasticidad del suelo; s_p, s_c, s_q son los factores de forma; i_p, i_c, i_q son los factores de inclinación de la carga; N_p, N_c, N_q son los factores de capacidad de carga; d_p, d_c, d_q son los factores que valoran el efecto de la profundidad del cimiento dentro del estrato resistente D; g_p, g_c, g_q son los factores de inclinación del terreno . (García Tristá, Cristía, & Sotolongo, 2014)

Vanapalli lleva a cabo un modelo de equilibrio realizando pruebas en un suelo no saturado cohesivo puro para cinco valores diferentes de succión matricial, (Vanapalli & Mohamed, 2007), (Tavakkoli & Vanapelli, 2011) y (Oh & Vanapalli, 2011) resultando:

$$C_{u(unsat)} = \frac{q_{u(unsat)}}{2} \quad (16)$$

$$C_{u(unsat)} = C_{u(sat)} \left[1 + \frac{u_a - u_w (S_r)^v}{\frac{P_a}{100^\mu}} \right] \quad (17)$$

Dónde: $C_{u(unsat)}$ y $C_{u(sat)}$ son la resistencia a compresión bajo la condición no saturada y saturada, respectivamente; P_a es la presión atmosférica siendo igual a 101,3kPa; S_r es el grado de saturación y v, μ son parámetros de ajustes.

$$v = 2$$

$$\mu = 9 \text{ Para } 8,0 \leq IP(\%) \leq 15,5 \quad \mu = 2.10880e^{0.0903(IP)} \text{ Para } 15,5 < IP(\%) < 60$$

2.2 Estado límite de deformación (tensión límite de linealidad) para suelos saturados

El cálculo de las deformaciones o desplazamientos de las bases de cimentaciones depende del comportamiento tenso deformacional del medio sobre el cual se apoyan las mismas, alcanzando estos un comportamiento tenso deformacional lineal o no lineal. Desde el punto de vista práctico saber hasta donde el suelo se puede considerar con comportamiento tenso deformacional lineal, permite establecer la frontera para saber que método de cálculo emplear en la determinación de las deformaciones, para lo cual se utiliza la tensión límite de linealidad R' ; frontera entre el comportamiento tenso deformacional lineal del suelo y el comportamiento elasto - plástico del mismo.



$$p \leq R' = \frac{\gamma_{C1} \gamma_{C2}}{K} (M'_{\gamma} K_Z b \gamma_2^* + M'_q q^* + M'_c c^*) \quad (18)$$

Dónde: γ_{C1} y γ_{C2} son coeficiente que dependen de las condiciones de trabajo del suelo y tipo de estructura; K es el coeficiente de fiabilidad; K_Z es el coeficiente que toma en cuenta el ancho b de la cimentación; M'_{γ} , M'_q , M'_c son los coeficientes adimensionales que dependen del ángulo de fricción interno ϕ^* del terreno que yace bajo la cimentación, obtenidos con la corrección por excentricidad; γ_2^* es el peso específico de cálculo por debajo del nivel de cimentación, hasta una profundidad $1.5 B'$; q^* presión efectiva a nivel de cimentación alrededor del cimientto (sobrecarga); c es el valor de la cohesión del suelo. Los métodos de cálculo de asentamientos se basan principalmente en el análisis del comportamiento deformacional del suelo a través de variables como la relación de vacíos (e), el espesor de los estratos que soporta el cimientto, entre otros.

2.2.1 Estado límite de deformación (tensión límite de linealidad) para suelos no saturados

En los suelos no saturados se presentan modificaciones respecto a los suelos saturados, en este caso la expresión de linealidad se afectan los términos que corresponden al ángulo de fricción interna del suelo, modificando el término ϕ según la expresión planteada por Vanapalli y Fredlund: donde se refleja que la succión modifica este parámetro resistente como se muestra en la expresión 15, el peso específico se determina en función de la curva del proctor ya sea estándar o modificado, obteniendo para cada grado de saturación con la humedad correspondiente el valor de peso específico, la cohesión es modificada por la succión, parámetro que genera un incremento de dicho valor lo que influye directamente en la resistencia a cortante del suelo.

$$R' = \frac{\gamma_{C1} \gamma_{C2}}{K} (M'_{\gamma} K_Z b \gamma_2^* + M'_q q^* + M'_c (c'_{sat} + (u_a - u_w) \tan \phi^b)) \quad (19)$$

$$R' = \frac{\gamma_{C1} \gamma_{C2}}{K} (M'_{\gamma} K_Z b \gamma_2^* + M'_q q^* + M'_c (c'_{sat} + (u_a - u_w)_b (\tan \phi_{sat} - S_r^w \tan \phi_{sat}^*) + (u_a - u_w)_{AVR} S_r^w \tan \phi_{sat}^*)) \quad (21)$$

$$\text{Según Fredlund } \phi^b = \arctan (S_r \tan \phi_{sat}) \quad (22)$$



Dónde: γ_{C1} y γ_{C2} son los coeficientes que dependen de las condiciones de trabajo del suelo y tipo de estructura; γ_2^* es el peso específico húmedo; K es el coeficiente de fiabilidad; K_z es el coeficiente que toma en cuenta el ancho b de la cimentación; M'_γ , M'_q , M'_c son los coeficientes adimensionales que dependen del ángulo de fricción interno ϕ^* (afectado por la succión) del terreno que yace bajo la cimentación, obtenidos con la corrección por excentricidad; C'_{sat} es la cohesión efectiva y minorada según la condición del estado límite de deformación; $(u_a - u_w)$ es la succión matricial; $(u_a - u_w)_b$ es el valor de la entrada de aire de la curva de retención de agua del suelo; $(u_a - u_w)_{AVR}$ es la media del valor de entrada de aire; ϕ'_{sat} es el ángulo de fricción efectiva, que representa la máxima inclinación de la envolvente de falla cuando las tensiones son efectivas y ϕ^b es el ángulo de fricción que indica la tasa de aumento de la resistencia al corte, relativo a la succión matricial, cumpliéndose siempre que $\phi^b < \phi'_{sat}$; S_r es el grado de saturación y Ψ es el parámetro de ajuste del modelo.

2.3 Propiedades del suelo objeto de estudio

Para llevar a cabo el análisis de tensiones y deformaciones en suelos no saturados, es crucial apoyarnos en pruebas de laboratorio que nos ayuden a identificar sus características físico-mecánicas. Entre estas pruebas se incluyen la granulometría, los límites de consistencia, el peso específico, y la compactación utilizando la energía del Proctor estándar. También se consideran el ensayo de consolidación clásico y el de corte directo; todos estos métodos son esenciales para obtener los parámetros del suelo bajo condiciones de saturación. Adicionalmente, se utilizan los resultados del ensayo de succión mediante la técnica indirecta del papel de filtro, que se basa en un estudio experimental. Este proceso nos permite obtener la curva de retención de agua del suelo (S_r vs S_u), un aspecto clave en el análisis de suelos no saturados. En la tabla 1, se presentan las propiedades físico-mecánicas del suelo, obtenidas a partir de todas las pruebas mencionadas, que son utilizadas en el diseño geotécnico de los casos de estudio en análisis.



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO

Tabla 1. Propiedades físico mecánicas empleadas en el diseño geotécnico.

Suelo saturado	IP(%)	Ψ_d°	Estado límite de estabilidad			Estado límite de deformación		
			c*(kPa)	φ^{*o}	$\gamma h^*(\text{kN/m}^3)$	c*(kPa)	φ^{*o}	$\gamma h^*(\text{kN/m}^3)$
	19.30	1.10	48.94	11.36	19.24	52.57	12.32	19.61
Suelo no saturado	Su (kPa)	Sr (%)	c*(kPa)	φ^{*o}	$\gamma h^*(\text{kN/m}^3)$	c*(kPa)	φ^{*o}	$\gamma h^*(\text{kN/m}^3)$
	4.36	96.82	50.18	12.23	19.14	53.9	13.26	19.51
	28.44	89.24	55.08		18.81	59.16		19.22
	104.52	79.15	66.66		18.38	71.6		18.74
IP: Índice de plasticidad Ψ_d ; Parámetro de ajuste del modelo que depende del índice de plasticidad del suelo. c : Cohesión . φ : Ángulo de fricción interna. γh : Peso específico húmedo. Su: Succión. Sr: Grado de saturación del suelo								

Fuente: (de la Cruz Díaz, 2023)

3. Resultados y discusión

Con el propósito de analizar cómo las cargas horizontales y los momentos impactan el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales en suelos no saturados, se han estudiado seis casos diferentes. En la tabla 2, se muestran los distintos estados de carga que se han evaluado.

Tabla 2. Estados de cargas empleados en los casos de estudio.

Estado de cargas	Caso 1			Caso 2		
	N(kN)	H (kN)	M(kNm)	N(kN)	H (kN)	M(kNm)
Carga permanente	2200	-	-	2200	-	-
Carga temporal	200	-	-	200	-	-
Carga de viento	-	-	-	-	-	200
Estado de cargas	Caso 3			Caso 4		
	N(kN)	H (kN)	M(kNm)	N(kN)	H (kN)	M(kNm)
Carga permanente	2200	-	-	2200	-	-
Carga temporal	200	-	-	200	-	-
Carga de viento	-	200	-	-	-	700
Estado de cargas	Caso 5			Caso 6		
	N(kN)	H (kN)	M(kNm)	N(kN)	H (kN)	M(kNm)
Carga permanente	2200	-	-	2200	-	-
Carga temporal	200	-	-	200	-	-
Carga de viento	-	200	700	-	700	200

Fuente: elaboración propia



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO

Se han examinado los casos de estudio mencionados previamente, donde se alternan los estados de cargas en condiciones saturadas y no saturadas, de acuerdo con las combinaciones de carga establecidas en la (NC-450, 2006). En el primer caso, en el que solo se considera la carga permanente y temporal debido a la carga vertical, se determinó que la combinación crítica en el diseño fue de 1.4 G. Por otro lado, en los siguientes casos, donde se presentan diferentes situaciones como la carga vertical y horizontal, así como la carga vertical junto con momento, o la influencia de todos los estados de carga se destacó la combinación crítica de 1.2G + 0.5Q + 1.4W como la determinante en el diseño. A continuación, se muestran los resultados del diseño geotécnico para cada uno de los casos de estudio analizados.

Tabla 3. Diseño por Método de Estados Límites. Caso 1

Caso 1							
Saturado		No saturado					
		Su=4.36kPa		Su=28.44kPa		Su=104.52kPa	
1er EL		1er EL		1er EL		1er EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
Vuelco	0.5	Vuelco	0.5	Vuelco	0.5	Vuelco	0.5
Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5
Cap. Carga	2.4	Cap. Carga	2.25	Cap.Carga	2.1	Cap.Carga	1.8
ex(m)	0	ex(m)	0	ex(m)	0	ex(m)	0
qbr*(kPa)	683.257	qbr*(kPa)	760.409	qbr*(kPa)	892.804	qbr*(kPa)	1207
N*(kN)	3252.8	N*(kN)	3112	N*(kN)	3212	N*(kN)	3177
Qbt*(kN)	3307.33	Qbt*(kN)	3232	Qbt*(kN)	3302	Qbt*(kN)	3274
2do EL		2do EL		2do EL		2do EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
	2.65		2.5		2.3		2
P(kPa)	371.759	P(kPa)	414	P(kPa)	483.686	P(kPa)	630
R'(kPa)	381.708	R'(kPa)	417	R'(kPa)	486.932	R'(kPa)	654.481

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 1, se observa claramente que el criterio de capacidad de carga juega un papel importante en el análisis del estado límite de estabilidad. Sin embargo, es crucial mencionar que este criterio no es el determinante en el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales cuando se evalúa la influencia de la carga vertical. En este



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO

caso, se logra una base más amplia utilizando el criterio de deformación. Además, es notable que en este análisis no se presenta excentricidad, ya que no se toma en cuenta el efecto de la carga horizontal o el momento. También es relevante señalar que, para todas las succiones examinadas, el comportamiento del suelo se mantiene lineal.

Tabla 4. Diseño por Método de Estados Límites. Caso 2

Caso 2							
Saturado		No saturado					
		Su=4.36kPa		Su=28.44kPa		Su=104.52kPa	
1er EL		1er EL		1er EL		1er EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
Vuelco	0.5	Vuelco	0.5	Vuelco	0.5	Vuelco	0.5
Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5
Cap. Carga	2.4	Cap. Carga	2.25	Cap.Carga	2.1	Cap.Carga	1.8
ex(m)	0.096	ex(m)	0.097	ex(m)	0.097	ex(m)	0.099
qbr*(kPa)	670.659	qbr*(kPa)	744.886	qbr*(kPa)	873.056	qbr*(kPa)	1175
N*(kN)	2912.8	N*(kN)	2892	N*(kN)	2872	N*(kN)	2837
Qbt*(kN)	2986.77	Qbt*(kN)	2894	Qbt*(kN)	2929	Qbt*(kN)	2839
2do EL		2do EL		2do EL		2do EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
	2.65		2.5		2.3		2
P(kPa)	371.759	P(kPa)	414	P(kPa)	483.686	P(kPa)	630
R'(kPa)	381.708	R'(kPa)	417	R'(kPa)	486.932	R'(kPa)	654.481

Fuente: elaboración propia

Al analizar el impacto de considerar momento en el caso 2, se puede observar que cuando el momento representa el 10% de la carga vertical aplicada, no se producen cambios significativos en la determinación de las áreas de la base para ninguno de los valores de succión considerados. En todos los casos, la excentricidad se mantiene por debajo de 0.1m. Es relevante destacar que hay una reducción de entre el 10 y el 14% en la carga bruta de trabajo resistente a la estabilidad de la base de la cimentación al incluir el efecto del momento, esto se atribuye a la influencia de la excentricidad en el cálculo de los lados efectivos de la cimentación.



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO

Tabla 5. Diseño por Método de Estados Límites. Caso 3

Caso 3							
Saturado		No saturado					
		Su=4.36kPa		Su=28.44kPa		Su=104.52kPa	
1er EL		1er EL		1er EL		1er EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
Vuelco	0.5	Vuelco	0.5	Vuelco	0.5	Vuelco	0.5
Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5
Cap. Carga	2.75	Cap. Carga	2.65	Cap.Carga	2.45	Cap.Carga	2.15
ex(m)	0.142	ex(m)	0.142	ex(m)	0.144	ex(m)	0.146
qbr*(kPa)	521.274	qbr*(kPa)	578.164	qbr*(kPa)	670.415	qbr*(kPa)	891.133
N*(kN)	2966.88	N*(kN)	2951	N*(kN)	2920	N*(kN)	2879
Qbt*(kN)	2979.52	Qbt*(kN)	3050	Qbt*(kN)	2985	Qbt*(kN)	2985
2do EL		2do EL		2do EL		2do EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
	2.65		2.5		2.3		2
P(kPa)	371.759	P(kPa)	414	P(kPa)	483.686	P(kPa)	630
R'(kPa)	381.708	R'(kPa)	417	R'(kPa)	486.932	R'(kPa)	654.481

Fuente: elaboración propia

En el caso 3, se analiza una carga horizontal que equivale al 10% de la carga vertical que actúa. Al comparar los datos de la tabla 2, que se refiere al caso 1 donde solo hay carga vertical, se puede notar que incluir la carga horizontal en el diseño geotécnico incrementa el área de la base de las cimentaciones. Esto se debe a la influencia del factor de inclinación de la carga actuante y al aumento en los valores de excentricidad. Es fundamental señalar que los cambios ocurren en el estado límite de estabilidad. Esto se debe a que la combinación de cargas en el estado límite de deformación, no toma en cuenta el impacto de las cargas de viento o sísmicas, que son las que generan carga horizontal o momento. Además, se observa que, al considerar la carga horizontal, el criterio determinante para el diseño pasa a ser la estabilidad, en lugar de la deformación como en los casos previos. Por lo tanto, para calcular las deformaciones en el suelo, sería necesario utilizar un método no lineal.



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO

Tabla 6. Diseño por Método de Estados Límites. Caso 4

Caso 4							
Saturado		No saturado					
		Su=4.36kPa		Su=28.44kPa		Su=104.52kPa	
1er EL		1er EL		1er EL		1er EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
Vuelco	0.95	Vuelco	0.9	Vuelco	0.9	Vuelco	0.9
Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5
Cap. Carga	2.7	Cap. Carga	2.6	Cap.Carga	2.45	Cap.Carga	2.15
ex(m)	0.331	ex(m)	0.333	ex(m)	0.336	ex(m)	0.34
qbr*(kPa)	645.502	qbr*(kPa)	715.421	qbr*(kPa)	835.684	qbr*(kPa)	1117
N*(kN)	2958.7	N*(kN)	2943	N*(kN)	2920	N*(kN)	2879
Qbt*(kN)	2985.75	Qbt*(kN)	3022	Qbt*(kN)	3055	Qbt*(kN)	2953
2do EL		2do EL		2do EL		2do EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
	2.65		2.5		2.3		2
P(kPa)	371.759	P(kPa)	414	P(kPa)	483.686	P(kPa)	630
R'(kPa)	381.708	R'(kPa)	417	R'(kPa)	486.932	R'(kPa)	654.481

Fuente: elaboración propia

En el caso 4, se analiza un valor de momento que equivale al 30% de la carga vertical que actúa, superando en más de tres veces el valor de la carga horizontal considerada en el caso 3. El propósito de esto es evaluar hasta qué punto el aumento del momento puede generar áreas similares en la base de las cimentaciones superficiales, debido al efecto de una carga horizontal que representa el 10% de la carga vertical actuante. Es importante señalar que los valores de la carga bruta de trabajo resistente a la estabilidad de la base de la cimentación son más altos que los obtenidos al considerar el efecto de la carga horizontal.

Tabla 7. Diseño por Método de Estados Límites. Caso 5

Caso 5							
Saturado		No saturado					
		Su=4.36kPa		Su=28.44kPa		Su=104.52kPa	
1er EL		1er EL		1er EL		1er EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
Vuelco	1.35	Vuelco	1.25	Vuelco	1.25	Vuelco	1.25



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO

Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5	Deslizamiento	0.5
Cap. Carga	3.2	Cap. Carga	3.1	Cap.Carga	2.9	Cap.Carga	2.6
ex(m)	0.459	ex(m)	0.462	ex(m)	0.468	ex(m)	0.476
qbr*(kPa)	503.288	qbr*(kPa)	556.193	qbr*(kPa)	642	qbr*(kPa)	846.579
N*(kN)	3047.2	N*(kN)	3028	N*(kN)	2992	N*(kN)	2943
Qbt*(kN)	3096.6	Qbt*(kN)	3158	Qbt*(kN)	3074	Qbt*(kN)	3044
2do EL		2do EL		2do EL		2do EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
	2.65		2.5		2.3		2
P(kPa)	371.759	P(kPa)	414	P(kPa)	483.686	P(kPa)	630
R'(kPa)	381.708	R'(kPa)	417	R'(kPa)	486.932	R'(kPa)	654.481

Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Diseño por Método de Estados Límites. Caso 6

Caso 6							
Saturado		No saturado					
		Su=4.36kPa		Su=28.44kPa		Su=104.52kPa	
1er EL		1er EL		1er EL		1er EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
Vuelco	1.65	Vuelco	1.55	Vuelco	1.55	Vuelco	1.55
Deslizamiento	4.35	Deslizamiento	3.1	Deslizamiento	3	Deslizamiento	2.85
Cap. Carga	4.35	Cap. Carga	4	Cap.Carga	3.8	Cap.Carga	3.4
ex(m)	0.687	ex(m)	0.543	ex(m)	0.551	ex(m)	0.567
qbr*(kPa)	269.097	qbr*(kPa)	335.337	qbr*(kPa)	380.817	qbr*(kPa)	477.186
N*(kN)	2547.67	N*(kN)	3220	N*(kN)	3173	N*(kN)	3087
Qbt*(kN)	2965.48	Qbt*(kN)	3312	Qbt*(kN)	3301	Qbt*(kN)	3099
2do EL		2do EL		2do EL		2do EL	
	b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)		b=l(m)
	2.65		2.5		2.3		2
P(kPa)	371.759	P(kPa)	414	P(kPa)	483.686	P(kPa)	630
R'(kPa)	381.708	R'(kPa)	417	R'(kPa)	486.932	R'(kPa)	654.481

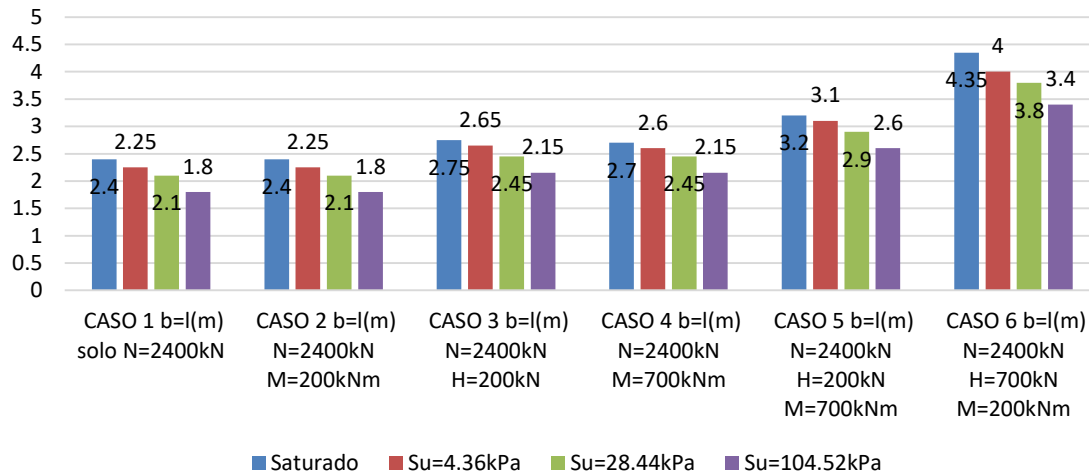
Fuente: elaboración propia

Al analizar los casos 5 y 6, donde se combinan las acciones de carga vertical, horizontal y el momento, se puede observar algo interesante. Cuando se toma en cuenta un valor de carga horizontal que equivale al 30% de la carga vertical, el área de la base resulta ser mayor. Esto respalda la idea de que la carga horizontal ejerce una influencia más significativa en el diseño geotécnico de las cimentaciones superficiales. Además, este



enfoque provoca una notable reducción en la carga bruta de trabajo resistente a la estabilidad de la base de la cimentación.

Análisis de las áreas de la base $b=l$ (1er EL)



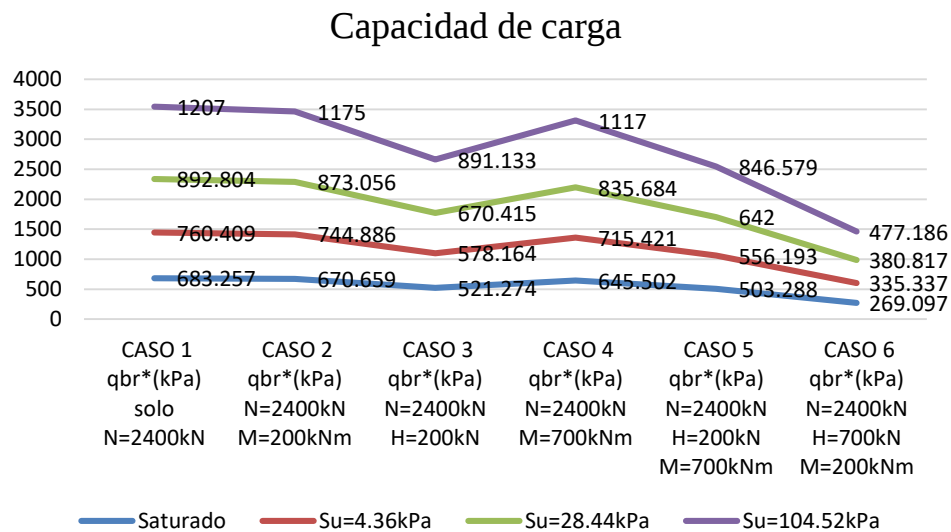
Fuente: elaboración propia

Figura1. Comparación de las áreas de la base para el primer estado límite.

En la figura 1 se presenta un resumen de las áreas de la base del diseño basado en el criterio de estabilidad para los casos de estudio analizados. Es relevante señalar que un aumento del 10% en el momento respecto a la carga vertical en el caso 2 no provoca cambios en el área de la base. Sin embargo, cuando se aplica ese mismo aumento del 10% en la carga horizontal (caso 3), se observa un incremento del 13 al 17% en el área de la base en comparación con el caso 1, que solo considera la carga vertical. Esto pone de manifiesto cómo la carga horizontal actúa como un factor clave en el diseño geotécnico de las cimentaciones superficiales. Por otro lado, en los casos 3 y 4 se puede notar que triplicar el momento en relación con la carga horizontal genera diseños que son bastante similares, lo que refleja lo determinante de la carga horizontal en el diseño geotécnico de las cimentaciones. En los casos 5 y 6, donde se combinan todos los estados de carga, la carga horizontal sigue siendo prevalente sobre el momento en la determinación de un área mayor para la base de las cimentaciones superficiales.



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO



Fuente: elaboración propia

Figura 2. Evaluación de la influencia de la carga horizontal y momento en la capacidad de carga.

En la figura 2, se lleva a cabo un análisis del comportamiento de la capacidad de carga, evaluando cómo varían los diferentes estados de carga. Se observa que los máximos valores de carga bruta de trabajo que resisten la estabilidad de la base de la cimentación se logran cuando se considera únicamente el efecto de la carga vertical, dado precisamente por la influencia que tiene el factor de inclinación de la carga y la excentricidad en la determinación de la capacidad de carga cuando actúa carga horizontal. Asimismo, se evidencia que cuando solo actúan el momento y la carga vertical, los valores de capacidad de carga del suelo no presentan disminuciones significativas en comparación con el efecto de solo la carga vertical. Esto sucede porque el valor del momento representa solo el 10% de la carga vertical, lo que produce excentricidades menores a 0.1 m, sin un impacto considerable en el resultado final. Por último, es importante señalar que el caso 6 muestra los valores más bajos de carga bruta de trabajo resistente a la estabilidad de la base de la cimentación. Esto se debe a que, en este caso, se aplica una carga horizontal que equivale al 30% de la carga vertical, junto con un momento del 10%. Esta combinación genera excentricidades de aproximadamente 0.7 m y valores pequeños en el factor de inclinación de la carga, lo



que resulta en una reducción de los resultados de capacidad de carga a la mitad en comparación con el caso 5, donde el momento es del 30% de la carga vertical y la carga horizontal del 10%.

4. Conclusiones

En el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales sobre suelos saturados y no saturados, empleando el Método de los Estados Límites con los correspondientes ajustes para cada uno, considerando el efecto de solo las cargas verticales, se evidencia que predomina el diseño por el estado límite de deformación. Asimismo, se obtienen áreas de la base más pequeñas al resto de los casos analizados y mayores valores de carga bruta de trabajo resistente a la estabilidad de la base de la cimentación, Esto se debe a que, en este análisis, no hay que preocuparse por las excentricidades en la aplicación de la carga.

Al considerar la carga horizontal en el diseño de las cimentaciones superficiales, el estado límite que determina el diseño; es estabilidad, porque no existen variaciones en las áreas obtenidas en el estado límite de deformación, pues las cargas horizontales son generadas por el efecto del viento o sismo, cuyos estados de carga no se consideran en la combinación de carga para el análisis de este estado límite. Además, es importante destacar que la carga horizontal tiene un papel significativo en el proceso de diseño. Su consideración puede llevar a la aparición de excentricidades y a una reducción en el factor de inclinación de la carga. Como resultado, también se puede ver afectada la carga bruta de trabajo que resiste la estabilidad de la base de la cimentación. Esto, a su vez, implica que se necesita una mayor área de la base para poder soportar las cargas que están actuando.

La acción de momentos en la cimentación durante el diseño geotécnico genera la aparición de excentricidades, lo que lleva a una ligera reducción de la carga bruta que resiste la estabilidad de la base de la cimentación. Es importante destacar que, en los casos estudiados para lograr el mismo diseño geotécnico, fue necesario considerar un



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS NO SATURADOS.
INFLUENCIA DE CARGA HORIZONTAL Y MOMENTO

valor que superara tres veces la carga horizontal. Esto resalta el impacto que tiene la carga horizontal en el diseño de áreas mayores para la base de las cimentaciones.

5. Referencias bibliográficas

1. Alvarez Ibarra, C., & González Cueto-Vila, A. V. (2019). *Análisis del diseño geotécnico de cimentaciones superficiales por Estados Límites, con el empleo de Hojas de Cálculo*.
2. de la Cruz Díaz, M. (2023). *Asentamientos en suelos parcialmente saturados empleando métodos analíticos y de modelación en Plaxis 3D* (Tesis de Maestría; Universidad Central Marta Abreu de Las Villas).
3. García Tristá, J. (2015). *Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba*. Tesis Doctoral. Universidad Marta Abreu de Las Villas.
4. García Tristá, J., Cristía, W. C., & Sotolongo, G. Q. (2014). Capacidad de carga en suelos parcialmente saturados.
5. Mohamed, F. M., Vanapalli, S. K., & Saatcioglu, M. (2011). Bearing capacity and settlement behaviour of footings in an unsaturated sand.
6. NC-1321. (2019). *Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales*. Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
7. NC-450. (2006). *Edificaciones. Factores de Cargas o Ponderación. Combinaciones*. Oficina Nacional de Normalización.
8. Oh, W. T., & Vanapalli, S. (2011). Bearing capacity of low plastic unsaturated soils using effective and total stress approaches. *14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
9. Tavakkoli, N., & Vanapalli, S. (2011). Rational approach for the design of retaining structures using the mechanics of unsaturated soils. *Proc., 2011 Pan-American CGS Geotechnical Conf.*
10. Vanapalli, S. K., & Mohamed, F. M. (2007). Bearing capacity of model footings in unsaturated soils. En *Experimental unsaturated soil mechanics* (págs. 483-493).
11. Vanapalli, S., & Oh, W. (2010). *Mechanics of unsaturated soils for the design of foundation structures*.