

# Estudio experimental y teórico del efecto de la desecación en la capacidad portante de cimentaciones superficiales

## Experimental and theoretical study of the effect of desiccation in the load capacity of surface foundations

**CATALINA LOZADA LÓPEZ**

Profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

[catalina.lozada@escuelaing.edu.co](mailto:catalina.lozada@escuelaing.edu.co)

Recibido: 12/06/2019 Aceptado: 20/06/2019

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

Durante los periodos de sequía, las condiciones climáticas en la interfase aire-suelo generan un proceso de flujo de vapor de agua ascendente, en el cual el suelo pierde humedad y, por tanto, la succión aumenta. La relación entre la succión y el contenido de humedad se establece a través de la curva de retención de agua, la cual es única para cada suelo y resulta fundamental para el estudio del comportamiento mecánico de los suelos no saturados.

Las teorías recientes de la mecánica de suelos no saturados incluyen la succión en el cálculo de la resistencia al corte, la cual se incrementa con el aumento de la succión. Por lo tanto, el incremento de la resistencia al corte con la pérdida de humedad del suelo produce un aumento de la capacidad portante de las cimentaciones superficiales, determinada en forma experimental y analítica por varios autores.

En este artículo se estudia el efecto de las variables climáticas en el proceso de desecación y en el consecuente aumento de la capacidad portante teórica de una cimentación superficial.

**Palabras claves:** desecación, succión, mecánica de suelos no saturados, capacidad portante.

### Abstract

During dry periods, the climatic conditions in the soil-air interface produce an ascendant flux of water vapor, causing the loss of water content of the soil. As the soil loses water content, suction increases; the Soil Water Characteristic Curve that is unique for each soil and is fundamental to study the behavior of unsaturated soils establishes the relation between suction and water content. The recent theories of the unsaturated soil mechanics include suction in the calculus of soil shear strength that increases with suction. Therefore, the increase of the bearing capacity with the loss of soil water content produces an increase of the bearing capacity of the shallow foundations that have been determined experimentally and analytically by various authors. This paper studies the effect of the environmental variables in the process of desiccation and the consequent increase of theoretical bearing capacity of a shallow foundation.

**Keywords:** desiccation, suction, unsaturated soil mechanics, bearing capacity.

## INTRODUCCIÓN

Las condiciones climáticas en la superficie del suelo condicionan los procesos de transferencia de calor y de vapor de agua en su interior. Específicamente, en condiciones secas, el flujo de agua es ascendente y el suelo pierde humedad. Esta pérdida de humedad depende de la cobertura vegetal en la superficie, la interacción con las variables climáticas y la posición del nivel freático.

Los cambios de humedad producen cambios de volumen, principalmente en las arcillas, lo que puede ocasionar asentamientos y afectaciones a estructuras circundantes. Al perder humedad el suelo, la succión matricial aumenta y se produce también un cambio en la resistencia al corte de éste.

Para entender el comportamiento de la deformación y de la resistencia del suelo, especialmente durante los periodos secos, es necesario estudiar el fenómeno de la evaporación. El entendimiento de este proceso permite predecir el cambio en la succión con el tiempo, la cual es una variable de estado responsable de los cambios de resistencia del suelo [1][3].

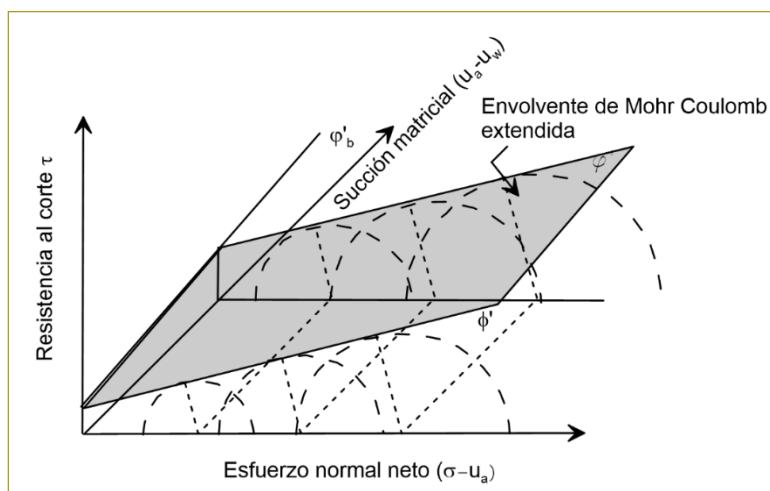
En el presente artículo se muestran los resultados experimentales sobre evaporación en arcillas, y posteriormente se presenta el efecto de la succión generada por la desecación en la capacidad portante de cimentaciones superficiales.

## EFFECTO DE LA DESECACIÓN EN LA RESISTENCIA DEL SUELO

El criterio de falla de Mohr-Coulomb extendido permite incluir en el cálculo de la resistencia al corte el efecto de la succión en los suelos parcialmente saturados [4]. En este criterio se agrega un eje adicional, en el que se incluye la succión matricial; los puntos que se encuentran en el espacio esfuerzo normal, succión y resistencia última pasan por una envolvente de resistencia, la cual puede establecerse en términos de esfuerzos totales o efectivos [5].

En la siguiente figura se muestra la envolvente de resistencia de Mohr-Coulomb extendida en términos de esfuerzos efectivos, donde la pendiente de la curva en el espacio succión y resistencia al corte se indica como  $\varphi_b^?$  (figura 1).

La ecuación que permite determinar la resistencia al corte del suelo en términos de esfuerzos efectivos, incluyendo la succión del suelo, se da por la ecuación propuesta por [2]:



**Figura 1.** Envolvente de resistencia. Criterio de Mohr-Coulomb extendido. Adaptado de [6].

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi_b^? \quad (1)$$

Donde:

$\varphi^?$ : ángulo de fricción interna.

$c'$ : cohesión efectiva.

$\varphi_b^?$ : ángulo de cambio de resistencia al corte con respecto a la succión mátrica.

$u_a$ : presión del aire.

$(u_a - u_w)$ : succión matricial.

El criterio de Mohr-Coulomb extendido para la condición saturada da como resultado la ecuación tradicional del criterio de falla de Mohr-Coulomb, donde la resistencia última es:

$$\tau_{ff} = c' + \sigma_f \tan \varphi' \quad (2)$$

## EFFECTO DE LA DESECACIÓN EN LA CAPACIDAD PORTANTE DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES

La capacidad portante teórica de cimentaciones superficiales en suelos no saturados ha sido estudiada recientemente por autores como [7], [8]. La ecuación propuesta por [9] es una aproximación planteada en términos de esfuerzos efectivos. Para el análisis de resistencia a corto plazo, la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$q_u = (S_u + (u_a - u_w)_f \tan \varphi_b^?) N_c \quad (3)$$

Donde  $S_u$  es la resistencia al corte no drenado,  $(u_a - u_w)_f$  es la succión final tomada de la curva de retención de humedad SWCC, y  $N_c = 5,14$  es el factor de capacidad portante.

Otra ecuación que busca una aproximación para calcular la capacidad portante en suelos no saturados para materiales puramente cohesivos es [1]:

$$q_u = \left[ \frac{q_{u(\text{unsat})}}{2} \right] \left[ 1 + 0,2 \left( \frac{B}{L} \right) \right] N_c \quad (4)$$

Donde  $q_{u(\text{unsat})}$  es la resistencia máxima obtenida con ensayo de compresión inconfiada,  $B$  es el ancho y  $L$  es el largo de la zapata.

Las anteriores ecuaciones las han validado experimentalmente los autores mencionados, sobre todo utilizando suelos arenosos; en la actualidad, no existen estudios en suelos puramente cohesivos donde se puedan validar o formular las ecuaciones correspondientes.

### ESTUDIO DEL PROCESO DE DESECACIÓN DE UNA MUESTRA DE SUELO USANDO UNA CÁMARA DE SIMULACIÓN CLIMÁTICA

Para determinar la influencia de las variables climáticas en la variación de la succión del suelo, se hicieron ensayos de desecación usando una cámara de simulación climática [10]. Esta cámara permite simular condiciones específicas de humedad relativa, temperatura, velocidad del viento y radiación solar de manera simultánea. Con los resultados de succión obtenidos para cada suelo, posteriormente se realizaron cálculos teóricos del incremento de la capacidad portante utilizando la ecuación (3).

#### Propiedades hidráulicas del suelo

El material empleado en esta investigación fue arcilla Speswhite, la mineralogía de este suelo corresponde a un caolín y se obtiene en el sur de Londres. Los valores de límite líquido, límite plástico y gravedad específica son 55 %, 32,3 %, y 2,65, respectivamente [11]. Para estudiar el efecto de las condiciones ambientales en la evaporación de agua en el suelo, es necesario caracterizar las propiedades de retención de agua del material.

Esta caracterización se obtiene realizando la curva de retención de agua SWCC, utilizando un potenciómetro de punto de rocío WP4. Para la elaboración del ensayo, el suelo se preparó con un contenido de humedad correspondiente a 1.5 veces el límite líquido. Posteriormente la muestra fue secada al aire libre y mantenida en condiciones herméticas durante 24 horas para garantizar la homogenización del contenido de humedad para luego tomar la medida de succión. Este procedimiento se repitió para diferentes contenidos de humedad. Se determinó el cambio de volumen de la muestra para cada contenido de humedad y se calculó el grado de saturación. La curva de retención de humedad de este suelo se muestra a continuación (figura 2).

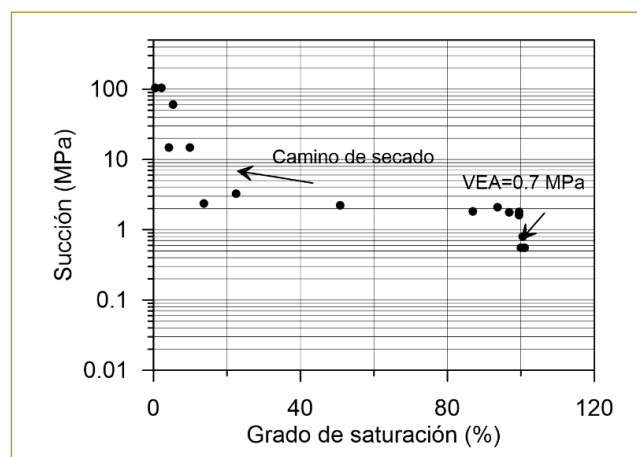


Figura 2. Curva de retención de la arcilla Speswhite.

La ecuación que permite ajustar la curva de retención de humedad del caolín Speswhite, de acuerdo con las formulaciones de Van Genuchten (1980) y Fredlund y Xing (1994), es:

$$w = w_r + \frac{w_s - w_r}{\left\{ \ln \left[ e + (\psi / a)^n \right] \right\}^m} \quad (5)$$

Donde  $w$  es el contenido de humedad gravimétrico,  $w_s$  es el contenido de humedad gravimétrico para el cual el aire comienza a entrar en el suelo, tomado como 0,5,  $w_r$  es el contenido de humedad gravimétrico residual tomado como 0,04,  $e$  es el número de Euler,  $\psi$  es la succión total [kPa] y los parámetros de ajuste son  $a = 1,40$ ,  $n = 3,1$ , y  $m = 1,0$ . El valor de entrada de

aire VEA, el cual indica el nivel de succión para el que el aire comienza a entrar en el suelo, es  $VEA=0,7$  kPa.

### Modelación física de las variables ambientales durante el proceso de secado

Se realizaron tres ensayos de evaporación para muestras de suelo con un espesor de 1 mm ( $T1$ ,  $T2$  y  $T3$ ) y un ensayo para una muestra de agua ( $T1_w$ ). Los ensayos se hicieron en un contenedor cuadrado de vidrio dentro de la cámara de simulación climática. El procedimiento experimental consistió en las siguientes etapas:

1. Estabilización de las condiciones ambientales específicas en la cámara climática para cada ensayo durante 30 minutos.
2. Preparación de la muestra de suelo con un contenido de humedad correspondiente a 1,5 veces el límite líquido.
3. Cálculo de la tasa de evaporación potencial para la muestra con agua y tasa de evaporación real para la muestra con suelo. Se ubicó una balanza electrónica en la base del contenedor para medir el peso de la muestra durante el proceso de secado. A lo largo del ensayo se midieron la temperatura del aire y la humedad relativa.

La temperatura del aire se midió a una altura de 100 mm de la superficie del suelo y la humedad relativa del aire se midió a 4 mm desde la superficie del suelo. Estas mediciones se realizaron en el centro del contenedor. La radiación solar se impuso con longitudes de onda pertenecientes al espectro de luz infrarroja utilizando lámparas infrarrojas y la temperatura del agua se registró con una cámara infrarroja. Más adelante se muestran las

especificaciones generales de cada ensayo y las variables ambientales registradas (tabla 1).

### RESULTADOS DE LA EVAPORACIÓN DEL AGUA. EVAPORACIÓN POTENCIAL

Dado el acoplamiento de los procesos de transferencia de calor y de flujo de agua en el suelo, producto de las variables ambientales impuestas durante el ensayo de evaporación potencial, se obtiene una tasa de evaporación del agua (figura 3). La tasa de evaporación potencial (EP) se calcula como la primera derivada de la curva de agua evaporada en función del tiempo. En este ensayo la tasa de evaporación potencial corresponde a un valor constante de 14,7 mm/día para las condiciones ambientales mostradas en la tabla siguiente (tabla 1).

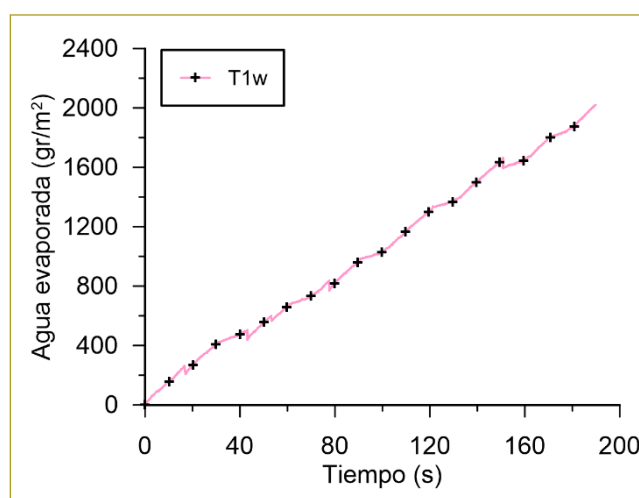


Figura 3. Ensayo de evaporación potencial,  $T1_w$ . Adaptado de [10].

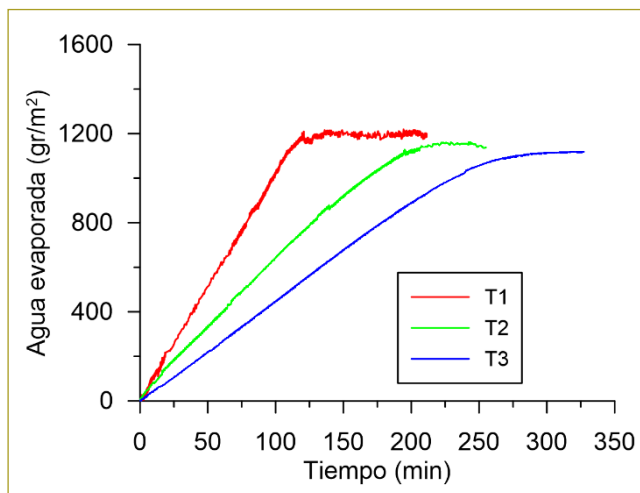
Tabla 1  
Especificaciones de los ensayos

Ensayo	Duración	Radiación	Velocidad del viento	Humedad relativa	Temperatura del agua	Temperatura del aire
	min	$W/m^2$	m/s	%	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$
$T1_w$ agua	180,0	1040	1,74	34,1	27,3	40,9
$T1$ suelo	211,3	1040	1,74	23,0	37,4	42,0
$T2$ suelo	255,0	0	1,44	37,6	26,6	28,0
$T3$ suelo	327,2	0	1,36	47,2	26,1	27,0

## RESULTADOS DE LA EVAPORACIÓN EN MUESTRAS DE ARCILLA. EVAPORACIÓN REAL

La evaporación real del suelo es un proceso mucho más complejo que la evaporación potencial, el cual depende de las condiciones ambientales y de la disponibilidad de agua en la superficie.

El ensayo T1 se realizó con la mayor temperatura y la menor humedad relativa, debido a la imposición de radiación dentro de la cámara por medio de lámparas infrarrojas. El ensayo T3 presenta la mayor humedad relativa y la menor temperatura a causa de la ausencia de radiación solar y la menor velocidad del viento. A renglón seguido se muestra el valor del agua evaporada en el tiempo para los ensayos hechos en arcilla. En estos ensayos la tasa de evaporación es constante al inicio del ensayo y posteriormente disminuye con el tiempo, a medida que el agua se evapora desde la superficie del suelo (figura 4).

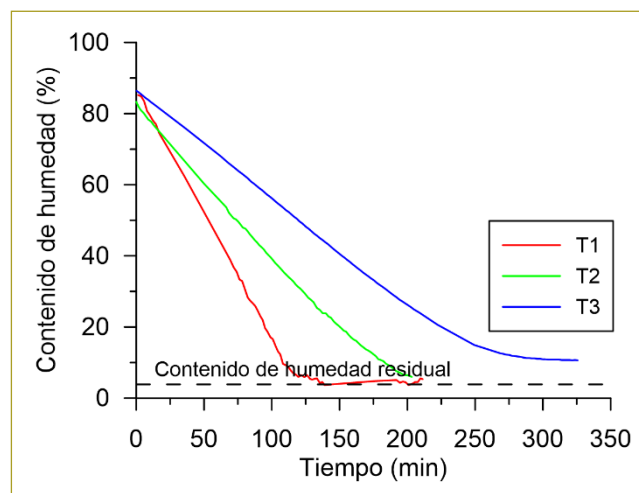


**Figura 4.** Ensayos de evaporación real. Ensayos T1, T2 y T3. Adaptado de [10].

El contenido de humedad de las muestras de suelo se determinó con el peso de sólidos inicial y el registro del agua evaporada en el tiempo (figura 5). Esto indica una disminución en el contenido de humedad hasta alcanzar un valor de humedad del suelo constante (cercano al valor del contenido de agua residual de la SWCC), lo que señala el final del proceso de evaporación.

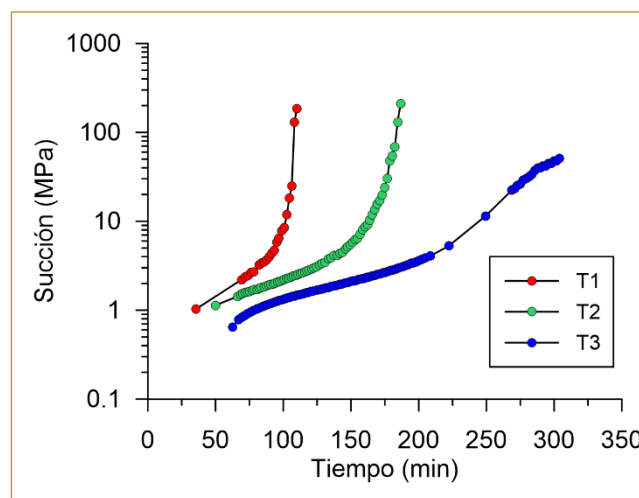
Utilizando la ecuación (5), la cual relaciona los valores de humedad gravimétrica con un valor de succión, se determinó el valor de la succión para cada ensayo. Más adelante se muestra que la succión aumenta drásticamente cuando alcanza el valor de entrada de aire

VEA=0,7 kPa, correspondiente a un contenido de humedad de  $w = 50 \%$  (figura 6).



**Figura 5.** Contenido de humedad. Ensayos T1, T2 y T3. Adaptado de [10].

Los valores de succión del ensayo T1 aumentan mucho más rápido que en los ensayos T2 y T3, debido a las condiciones climáticas extremas. El ensayo T3 tiene el menor incremento de valor de succión con el tiempo debido a las condiciones ambientales aplicadas, principalmente la ausencia de la radiación solar.



**Figura 6.** Evolución de la succión del suelo en el tiempo. Ensayos T1, T2 y T3. Adaptado de [10].

Similar al proceso de evaporación potencial (EP), la evaporación real (ER) se calcula como la primera derivada del agua evaporada en función del tiempo. De acuerdo con los resultados experimentales, los cuales

siguen un comportamiento evidenciado también en la bibliografía existente [12], [13], la tasa de evaporación real es constante si la succión es menor que el valor de entrada de aire (VEA). En esta condición, la ER se determinó como 14.64 mm/día, 9,53 mm/día y 6,44 mm/día para los ensayos T1, T2 y T3. La tasa de evaporación real en el ensayo T1 es similar al ensayo T1<sub>u</sub> debido a las condiciones climáticas similares en la cámara.

### EFFECTO DE LA SUCCIÓN EN LA CAPACIDAD PORTANTE. EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA EL SUELO DE ESTUDIO

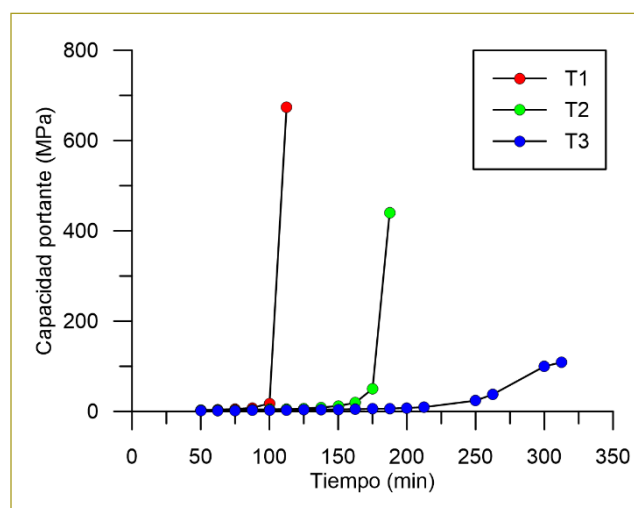
Para simular el efecto de la succión en la capacidad portante de una cimentación superficial, se hicieron cálculos teóricos de capacidad portante para las muestras de suelo T1, T2 y T3, sometidas al proceso de desecación mencionado anteriormente. Los cálculos se hicieron utilizando la ecuación (3) y se tomó un ángulo de fricción  $\varphi_b$ , el cual se calculó para la arcilla Speswhite a partir de ensayos de corte directo con diferentes contenidos de humedad [14], dando como resultado  $\varphi_b = 22,1^\circ$  para  $s < 450$  kPa y  $\varphi_b = 8,3^\circ$  para  $s > 450$  kPa. Según este resultado y con  $S_u = 25,2$  kPa para una condición saturada, se obtiene la resistencia última del suelo considerando el efecto de la succión. A continuación se presentan la succión final para cada ensayo y el correspondiente valor de resistencia al corte no drenado (tabla 2).

**Tabla 2**  
Resistencia al corte no drenado teórica para cada ensayo

Ensayo	Succión final	$S_u$
	kPa	kPa
T1 <sub>suelo</sub>	3000	462,8
T2 <sub>suelo</sub>	800	141,9
T3 <sub>suelo</sub>	20	33,3

Más adelante se muestra la variación de la capacidad portante del suelo con el tiempo para una cimentación superficial cuadrada,  $N_c = 5,14$ , utilizando la formulación teórica propuesta en la ecuación (3). Así mismo, se evidencia un gran incremento de la capacidad portante en el suelo del ensayo T1 para un tiempo de 100 min, y luego de esto se produce para el ensayo T2 a los 175 minutos y finalmente para el ensayo T3 a los 250 minutos. Lo anterior se debe a la velocidad de desecación a la cual fueron sometidos los ensayos, donde a mayor

tasa de desecación el tiempo en el cual aumenta considerablemente la succión es menor (figura 7).



**Figura 7.** Aumento de la capacidad portante con la succión. Arcilla Speswhite.

### CONCLUSIONES

La cámara de simulación climática es una herramienta para la modelación física a escala reducida, la cual permite simular fenómenos como la evaporación potencial y real. De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente artículo, se observa que la tasa de evaporación potencial es controlada por el conjunto de las condiciones climáticas establecidas, como la temperatura del aire, la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa. Con respecto a la evaporación real, ésta se controla mediante las variaciones ambientales y por medio de la succión del suelo, la cual es la principal restricción física durante el proceso de evaporación.

Las condiciones ambientales en la atmósfera que simula un proceso de desecación aumentan considerablemente la resistencia del suelo. Esto se debe al aumento de la succión matricial que ocurre al disminuir el grado de saturación. El efecto de la succión se puede incluir en el modelo de Mohr-Coulomb extendido para el caso de los suelos no saturados. Al aplicar este modelo en las teorías clásicas de capacidad portante para una carga en condiciones no drenadas, se puede establecer el aumento de la capacidad portante debido al incremento de la succión. Para los ensayos realizados en este trabajo, el aumento teórico de la resistencia es muy grande y el tiempo en el cual se alcanzan estos valores depende de

la tasa de desecación, alcanzándose en tiempos menores a mayor tasa de desecación.

## REFERENCIAS

- [1] Vanapalli, S. & Oh, W. (2019). Mechanics of unsaturated soils for the design of foundation structures, ... *Conf. Eng. Mech. Struct. ...*, pp. 363–377.
- [2] Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. & Clifton, W. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (3), p. 2.
- [3] Oloo, S., Fredlund, D. & Gan, J.K.-M. (1997). Bearing capacity of unpaved roads, *Can. Geotech. J.* 34, (1981), pp. 398–407.
- [4] Fredlund, D.G. (1979). Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Can. Geotech. J.*, 16 (1), pp. 121-139.
- [5] Fredlund, D., Morgenstern, N. & Widger, R. (1978). The shear strength of unsaturated soils, *Can. Geotech. Rev. Can.*, 321, pp. 313–321.
- [6] Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*.
- [7] Oh, W. T. & Vanapalli, S. K. (2008). *Modelling the Stress versus Settlement Behavior of Model Footings in Saturated and Unsaturated Sandy Soils*, pp. 1-6.
- [8] Vanapalli, S. K. & Mohamed, F. M.O. (2013). Bearing capacity and settlement of footings in unsaturated sands, *Int. J. Geomate*, 5 (1), pp. 595-604.
- [9] Vanapalli, S. & Mohamed, F. (2007). Bearing capacity of model footings in unsaturated soils, *Exp. Unsaturated Soil Mech.* pp. 1-11.
- [10] Lozada, C., Caicedo, B. & Thorel, L. (2018). Physical modelling of atmospheric conditions during drying. *Proceedings of the 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, 1.
- [11] Thorel, L., Ferber, V., Caicedo, B. & K.I.M. (2011). Physical modelling of the wetting-induced collapse of an embankment base, *Géotechnique*, 61 (5), pp. 409-420.
- [12] Wilson, G.W. (1990). *Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems*.
- [13] Wilson, G.W., Fredlund, D.G. & Barbour, S.L. (1994). Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation, *Can. Geotech. J.*, 31 (2), pp. 151-161.
- [14] Lozada, C., Caicedo, B. & Thorel, L. (2015). Effects of cracks and desiccation on the bearing capacity of soil deposits, *Géotechnique Lett.* 5, (5), pp. 112-117.