

**REVISIÓN DE
LITERATURA:
CAPACIDAD
PORTANTE DE
CIMENTACIONES
SUPERFICIALES EN
SUELOS
PARCIALMENTE
SATURADOS**

PRESENTADO A:

ING. CATALINA LOZADA LOPEZ

PRESENTADO POR:

JOHAN JAVIER SIERRA PEÑA

CARNET:

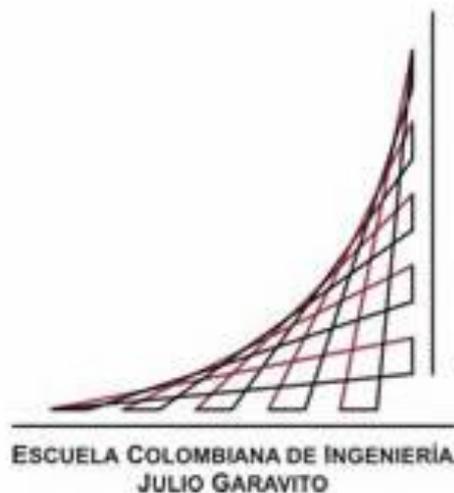
2098827

**PROYECTO DIRIGIDO SEMILLERO DE
GEOTECNIA :**

ÉNFASIS EN GEOTECNIA

FECHA:

2020 - I



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS	4
3. SUCCIÓN EN EL SUELO	5
4. MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN	6
5. CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA DEL SUELO	7
6. ESFUERZOS EFECTIVOS EN SUELOS NO SATURADOS	9
7. RESISTENCIA AL CORTE	11
8. CAPACIDAD DE CARGA.....	13
9. CONCLUSIONES	19
10. REFERENCIAS.....	20

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 a) Curva característica para suelos con diferentes texturas (Pérez G, 2008). b) elementos de la curva de retención incluyendo el fenómeno de histéresis (Alfaro, 2008)	8
Figura 2 Curva característica de retención ((Lopez, 2016)	8
Figura 3 Envoltente de resistencia para suelos no saturados (Alfaro, 2008)...	13
Figura 4 Modos de falla por capacidad de carga del suelo a) falla general por corte b) falla local por corte c) falla de corte por punzonamiento (Braja , 2012)	15
Figura 5 Capacidad de carga idealizada por Prandtl (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012)	15
Figura 6 Perfil de succión tipo (Thanh & Russell, 2015).....	16

Figura 7 Mecanismo de falla en un suelo no saturado (Oh & Vanapally , 2013)

..... 19

1. INTRODUCCIÓN

La mecánica de suelos no saturados es un área poco estudiada en comparación con los estudios relacionados con los suelos saturados, en gran parte del planeta encontramos los suelos no saturados, los cuales cuentan con el fenómeno que se denomina succión, el cual le permite aumentar la fuerza de contacto entre las partículas cambiando así la resistencia. El estudio de los suelos no saturados implica tener en cuenta además del fenómeno de succión, el fenómeno de la histéresis que está relacionado con los fenómenos de humedecimiento y secado que serán propios para cada tipo de suelo. Al usar la mecánica de suelos tradicional en los diseños de cimentaciones se obtienen diseños sobredimensionados que serán más costosos e ineficientes, pero incorporar las variables que se nombraron antes presenta problemas que no se han solucionado por completo.

En la actualidad el estudio de los suelos no saturados está muy ligado con el uso de herramientas computacionales que incorpora el análisis de los elementos finitos, lo que permiten evaluar con un gran nivel de detalle los resultados obtenidos, también se han realizado muchas investigaciones con técnicas de modelado físico avanzadas como la centrífuga geotécnica.

2. OBJETIVOS

Profundizar en el conocimiento de la mecánica de suelos no saturados y su aplicación en la capacidad portante de cimentaciones superficiales.

3. SUCCIÓN EN EL SUELO

Se entiende por succión al fenómeno físico químico dado en el comportamiento del suelo, en donde se producen esfuerzos internos en la estructura del material, producidos por el fenómeno de capilaridad y por la concentración de sales en el agua de poros del suelo (Buenfil, 2007). El efecto de la succión en un suelo no saturado es equivalente al de una presión exterior aplicada, la cual consta de dos componentes que se definen como la succión matricial (ψ_m) y la succión osmótica (ψ_o), la primera consta de la capacidad de retener el agua debido a la matriz del suelo, es decir, el tipo de partículas y su arreglo estructural, mientras que la segunda, es la capacidad de retención que se produce por las sales disueltas en el agua del suelo (Huanca, 2018) . La sumatoria de estas dos componentes se conoce como succión total o succión del suelo, como se describe en la siguiente ecuación (1).

$$\psi = \psi_m + \psi_o \quad (1)$$

La succión se relaciona directamente con la tendencia de absorber agua, ya sea en mayor o menor medida para un mismo suceso dependiendo de la humedad y el grado de saturación, al involucrar el valor de la succión en el diseño de las estructuras que tendrán relación con el suelo como lo son la cimentaciones, se tendrán obras más económicas y funcionales.

4. MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN

Se cuenta con diferentes formas para medir la succión en el suelo y para su selección se debe tener en cuenta, la succión a medir, su magnitud, la cantidad de recursos con los que se cuente y el tiempo.

La técnica de translación por ejes, se emplea en el laboratorio ya sea para muestras inalteradas o remoldeadas, esta técnica se realiza introduciendo la muestra dentro de una cámara hermética de presión, a la cual se le adiciona una sonda que tiene una punta de cerámica de Alto Valor de Entrada de Aire (AVEA) que se encuentra saturada, una vez introducida la sonda se conecta con un sistema de medición de presión a través de un conducto lleno con agua desaireada. Una vez conectada la sonda, se registra una presión negativa debido a la succión del suelo, la tendencia de incremento de esta presión negativa se contrarresta con una mayor presión de la cámara hasta alcanzar un equilibrio. Se registrara la succión matricial como la diferencia entre la presión de la cámara y presión registrada en el equilibrio. Esta técnica además de ser precisa y cubrir un amplio rango de valores de succión los cuales varían entre 0 y 1000 kPa , es una de las técnicas más costosas.

Otra técnica muy usada y la cual se encuentra establecida en las normas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), es el método de papel filtro, el cual se usa para determinar la succión en muestras inalteradas. El papel filtro se usa como un sensor pasivo, que se basa en obtener el equilibrio de un papel filtro con el potencial de un papel filtro hasta lograr que el potencial mátrico en ambos se equilibre, es un método sencillo y económico, siempre que los cambios sean lentos (Borda & Galvis, 2019).

Para medir la succión osmótica se puede estimar de manera indirecta a través de la conductividad eléctrica del agua por los poros del suelo, el agua pura por si sola tiene baja conductividad en comparación con la que se encuentra en los poros, esto es debido a las sales que se encuentran.

5. CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA DEL SUELO

Para hacer la caracterización de los suelos no saturados es importante tener en cuenta la relación que hay entre la succión (total, matricial u osmótica) y la humedad (grado de saturación, humedad volumétrica o gravimétrica). Esta representación gráfica se conoce como “curva de tención de agua en el suelo” (Croney & Coleman, 1960).

La curva de retención se relaciona con el tipo de suelo la cual dependerá de su densidad. La forma de la curva se asocia con la composición granulométrica y mineralógica del suelo, es decir, la geometría de sus poros, la magnitud y composición de la parte fina (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012). Lo que quiere decir que para diferentes tipos de suelos como lo son las arcillas, estas tienden a desaturarse en forma gradual, mientras que en suelos granulares, la pérdida de agua ocurre de manera muy rápida (Pérez G, 2008) figura 1a. Para su caracterización se puede hacer a partir de procedimientos de humedecimiento o secado.

En la figura 1b se muestra curva de retención, donde se puede observar el fenómeno de histéresis (curvas no coincidentes por procedimientos de humedecimiento y secado) (Alfaro, 2008).

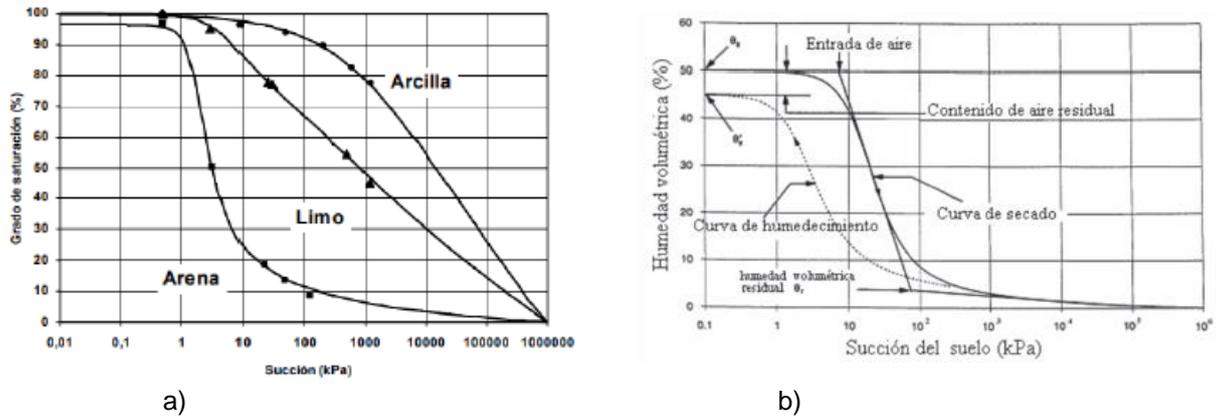


Figura 1 a) Curva característica para suelos con diferentes texturas (Pérez G, 2008). b) elementos de la curva de retención incluyendo el fenómeno de histéresis (Alfaro, 2008)

En la curva de retención de agua del suelo mostrada en la figura 2. Se presentan tres zonas identificables que son: la zona de efecto borde, zona de transición y zona de saturación residual, además se cuenta con dos puntos característicos que demarcan el límite entre cada una, siendo estos el valor de entrada de aire y el grado de saturación residual (Lopez, 2016).

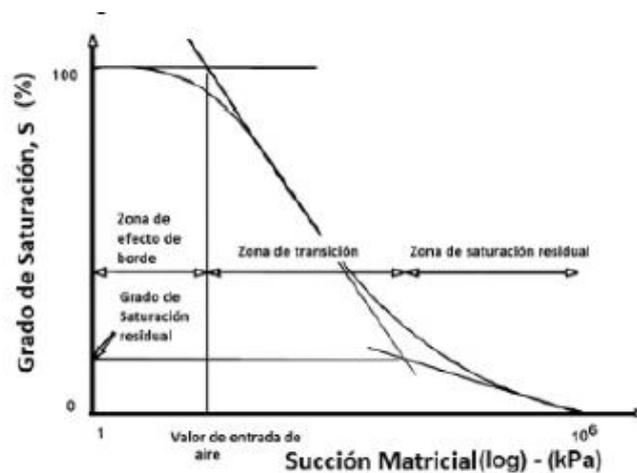


Figura 2 Curva característica de retención (Lopez, 2016)

En la figura 2 en la primera parte el efecto borde, donde la gráfica es horizontal indicando que el suelo se encuentra saturado, el valor de entrada de aire es la succión requerida para que ingrese aire en los poros más grandes y se inicie el proceso de desaturación, en este punto se presenta la zona de transición en la que se muestra una interface aire-agua, en donde el agua permanece de manera continua, y esta a su vez comienza a disminuir el contenido de los poros hasta llegar al grado de saturación residual y finalmente inicia la zona desaturación residual. El grado de saturación residual es en el cual la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados en mayor parte por aire (Lopez, 2016).

6. ESFUERZOS EFECTIVOS EN SUELOS NO SATURADOS

El estudio de los esfuerzos efectivos en los suelos saturados, marco el comienzo para el estudio de la mecánica de suelos (Terzaghi, 1936), entender las variables de esfuerzos efectivos en estos suelos señalan el comienzo de un nuevo campo de estudio para la mecánica de suelos no saturados. Existen distintas variables utilizadas al momento de formular el estudio de los suelo no saturados entre las cuales se encuentran, esfuerzo deformación, temperatura, tiempo de consolidación, al igual se deben tener en cuenta variables independientes que ayudan a describir el flujo de agua y el flujo de aire (incluido el vapor) (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012).

El esfuerzo efectivo se encarga del comportamiento de la estructura del suelo, $(\sigma - u_w)$ es una variable de estado de esfuerzo con la que se puede relacionar el suelo saturado la cual es aplicable en arenas, limos o arcillas siendo

independiente de las propiedades del suelo, también controla el cambio de volumen y la resistencia al corte en los suelos saturados. El esfuerzo efectivo puede ser aplicado en cualquier dirección formando un tensor de esfuerzos (matriz 3X3) como se muestra en la siguiente matriz (2).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - u_w & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_w & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_w \end{bmatrix} \quad (2)$$

Los esfuerzos ejercidos en una masa de suelo, se pueden aplicar a través de los esfuerzos principales totales que actúan sobre este $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, cuando los vacíos se llenan de agua bajo la presión, u_w , los esfuerzos principales totales se dividen en u_w , que actúa en la parte líquida y sólida en todas sus direcciones con igual fuerza (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012).

Para poder entender los suelos parcialmente saturados, son necesarias dos variables independientes las cuales pueden ser dos combinaciones de las siguientes ecuaciones $(\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij})$, $(\sigma_{ij} - u_w \delta_{ij})$ y $(u_a - u_w) \delta_{ij}$ propuestas por (Fredlund D. , Stress state variables for unsaturated soils, 1978), σ_{ij} es el tensor de esfuerzos totales, u_a es la presión de aire y u_w la presión del agua. Esto se explica con las ecuaciones de equilibrio de un elemento diferencial multifase de suelo y diferentes ensayos en condiciones edométricas e isotrópicas. Cuando se habla de suelos saturados se usa una sola variable $(\sigma_{ij} - u_w \delta_{ij})$ donde $u_a = u_w$ da como resultado la presión efectiva de Terzaghi (Barrera, Garnica , & Martínez, 2004).

La primera propuesta para entender el esfuerzo efectivo de los suelos no saturados fue realizada por Bishop (1959):

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi(u_a - u_w) \quad (3)$$

En la cual χ es un parámetro entre cero y uno. Con esta ecuación se pretendía tener un enfoque más general, en donde al tener $u_a = u_w$ se obtendría la ecuación de esfuerzos efectivos de Terzaghi, sin poder lograrlo debido a que el valor de χ no es constante, sino que este depende del grado de saturación, el efecto de la histéresis y el tipo de suelo.

7. RESISTENCIA AL CORTE

La seguridad de las estructuras está relacionada de manera directa con la capacidad del suelo sobre el cual están soportadas, por esta razón es importante calcular la capacidad de resistencia del suelo la cual permitirá calcular cambios futuros que se puedan presentar debido a infiltraciones, cambios en los esfuerzos, dilataciones entre otras.

La ecuación que define la resistencia al corte en suelos no saturados relaciona variables de estado de esfuerzos y propiedades del suelo, en donde las variables de estado de esfuerzo permiten describir los cambios en el estado de esfuerzo en los suelos no saturados, los cambios en el volumen y la resistencia al corte, debido a que una sola variable no explica de manera general el comportamiento. (Fredlund D., 1978) propuso una ecuación de resistencia al corte en la que relaciona dos variables, al igual que se hizo para el estudio del esfuerzo

específico en suelos no saturados las cuales son $(\sigma - u_a)$ y $(u_a - u_w)$. La ecuación es una extensión de la ecuación de resistencia de Mohr-Coulomb (4):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4)$$

Donde:

τ : Resistencia al corte del suelo no saturado.

c' : Cohesión efectiva a succión cero (del suelo saturado)

ϕ' : Ángulo de fricción interna efectivo (del suelo saturado)

ϕ^b : Ángulo que define la tasa de incremento de resistencia al corte con respecto a la succión del suelo.

$(\sigma - u_a)$: Esfuerzo normal neto sobre el plano de falla, en la falla.

$(u_a - u_w)$: Succión matricial del suelo en el plano de falla.

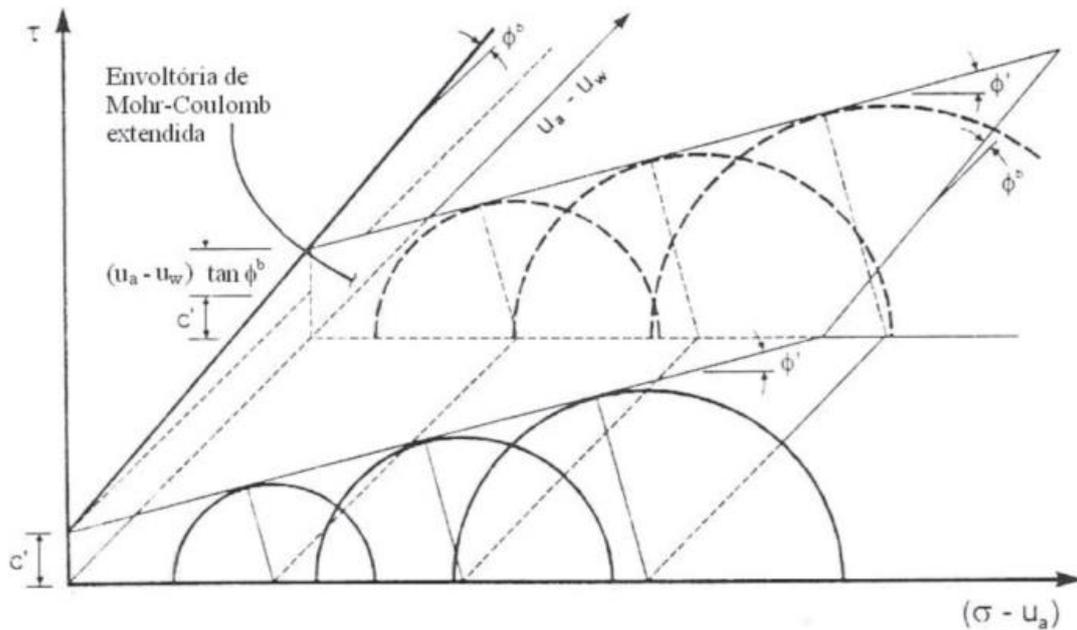


Figura 3 Envolvente de resistencia para suelos no saturados (Alfaro, 2008)

8. CAPACIDAD DE CARGA

La expresión de capacidad de carga fue usada por Terzaghi por primera vez en 1943, partiendo de algunas hipótesis como que el ancho será mayor a la profundidad de cimentación, no se tendrá en cuenta la resistencia del suelo por encima de la cimentación, y se considerara el caso más general el cual es un suelo con cohesión y fricción. La ecuación de capacidad portante se puede expresar como la sumas de tres componentes: el primero tienen en cuenta el bloque de presión pasiva de tierra y el peso del suelo, el segundo se relaciona con la cohesión del suelo y el tercero tiene en cuenta el efecto de la carga del suelo sobre la zapata (5) (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012).

$$q_f = \frac{1}{2} \rho g B N_\gamma + c N_c + \rho g D_f N_q \quad (5)$$

Donde:

c = cohesión

ρ = Densidad del suelo

g = gravedad

D = Profundidad de la cimentación del suelo

B = anchura del pie

N_c, N_γ, N_q = factores de capacidad de carga

Aquí se exponen tres posibles casos cuando la capacidad de carga es superada por los esfuerzos aplicados al suelo. En la figura 4a se muestra la falla general por corte, esta se da de manera progresiva, al incrementar la carga se incrementa el asentamiento de la cimentación cuando la carga sea igual a la resistencia se presenta la falla la cual se propagará hasta la superficie. En la figura 4b se muestra la falla local por corte, presenta el mismo tipo de falla general, aquí lo que cambia es el tipo de suelo sobre el cual se está cimentado debido a que este contiene consolidaciones previas que le permiten soportar más por esta razón a superficie de falla es discontinua y en la figura 4c se muestra la falla de corte por punzonamiento, esta se da en suelos muy sueltos aquí la superficie de falla no se extiende hasta la superficie (Braja , 2012).

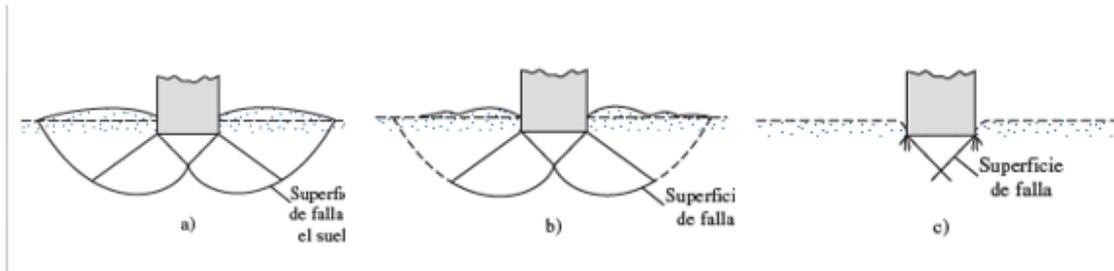


Figura 4 Modos de falla por capacidad de carga del suelo a) falla general por corte b) falla local por corte c) falla de corte por punzonamiento (Braja , 2012)

El estudio de la capacidad de carga en los suelos no saturados se puede abordar como una extensión de la mecánica de los suelos saturados, para esto se tomara un enfoque que consta de dos componentes siendo uno la cohesión efectiva y otro la componte asociada con la succión matricial con estos componentes y teniendo en cuenta la teoría de suelos saturados se podrá formular la capacidad de los suelos no saturados. Prandtl (1921) estudió el caso de una zapata en donde incremento la carga Q hasta que esta penetrara el suelo en donde llamo q_f a la máxima capacidad de carga, aquí se presenta una zona de presión activa que se da debajo de la zapata y una zona de presión pasiva donde el suelo empuja de manera lateral y hacia arriba. La superficie de falla está definida por una espiral logarítmica como se muestra en la figura 5.

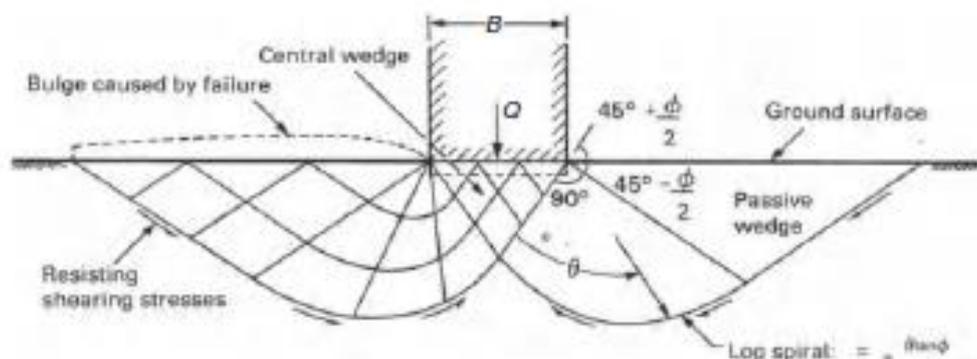


Figura 5 Capacidad de carga idealizada por Prandtl (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012)

(Thanh & Russell, 2015) Estudian la capacidad de carga de las zapatas usando la teoría de línea de deslizamiento (*slip line theory*). Las zapatas superficiales se encuentran en la mayoría de los casos por encima del nivel freático en donde el suelo está saturado de manera variable esto debido al perfil de succión el cual cambia con la infiltración y la evaporación. En este punto, se presenta el fenómeno que hemos denominado succión, aquí aumenta la fuerza de contacto entre las partículas y por ende la rigidez y la resistencia del suelo. El perfil de succión varía con la profundidad como se muestra en figura 6. Este muestra que a profundidades poco profundas la succión puede ser mayor debido a la interacción con el medio ambiente donde se puede producir evaporación y a profundidades mayor este valor decae hasta llegar al nivel freático.

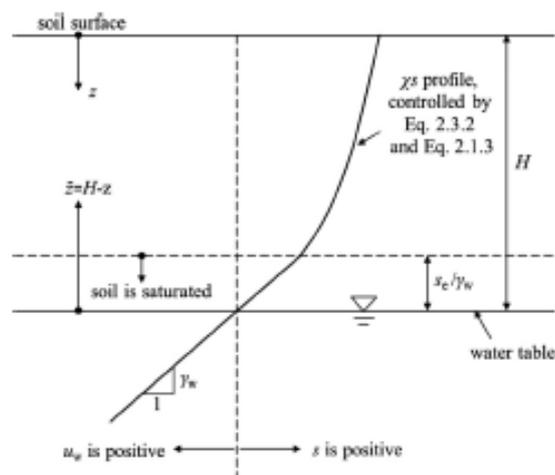


Figura 6 Perfil de succión tipo (Thanh & Russell, 2015)

Otro enfoque que puede ser usado para el estudio de los suelos no saturados es el enfoque de esfuerzo efectivo (*effective stress approach, ESA*) el cual fue que siguió Terzaghi o el enfoque de esfuerzos totales (*total stress approach, TSA*) estudiado por Skempton. El poder determinar cuál de estos enfoques tomar

dependerá del tipo de suelo y su condición de drenaje en la etapa de carga. Estos enfoques para los suelos no saturados denominan enfoque de esfuerzo efectivo modificado y enfoque de esfuerzo total modificado (*modified effective stress approach*, *MESA* y *modified total stress approach*, *MTSA* respectivamente).

Oloo 1994 propone la ecuación (6) basándose en las siguientes condiciones a) el aire en los poros y el agua estarán en condición de drenaje durante la etapa de carga. b) se espera un modo de falla general para suelos con densidad relativa alta. Estas condiciones permiten el uso del método *MESA*.

$$q_{ult(unsat)} = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] N_c \xi_c + q_0 N_q \xi_q + 0,5 B \gamma N_\gamma \xi_\gamma \quad (6)$$

Donde:

c' = Cohesión efectiva

ϕ^b = Angulo de fricción interno debido a la succión

$(u_a - u_w)$ = Succión matricial

γ = Peso unitario del suelo

q_0 = Sobre carga

B = Ancho

N_c, N_γ, N_q = Factores de capacidad de carga

ξ_c, ξ_γ, ξ_q = Factores de forma

Posterior a la formulación de la ecuación (6) otros autores como Vanapalli y Mohamed la mejoraron teniendo en cuenta la variación no lineal de la resistencia al corte con respecto a la succión. (Vahadifard & Robinson , 2016) Se basan en la investigación de Oloo y Vanapalli y Mohamed proponen un método para estimar la capacidad máxima de carga con la siguiente ecuación (7).

$$q_{ult(unsat)} = [c' + (u_a - u_w)_b(1 - S_{e,AVR}) \tan \phi' + \{(u_a - u_w)S_e\}_{AVR} \tan \phi'] N_c \xi_c + q_0 N_q \xi_q + 0,5 B \gamma N_\gamma \xi_\gamma \quad (7)$$

Donde:

$(u_a - u_w)_b$ = Valor de entrada de aire

$(u_a - u_w)_{AVR}$ = Succión parcial promedio

S_e = Grado efectivo de saturación = $\frac{S - S_r}{1 - S_r}$

s_r = Saturación residual

$S_{e,AVR}$ = Promedio efectivo de grado de saturación

Para mirar el enfoque *MTSA* (Oh & Vanapally , 2013) sugieren que la capacidad de carga de una zapata superficial sobre un suelo no saturado se puede estimar usando un bloque de suelo como se muestra en la figura 7 y con la ecuación (8).

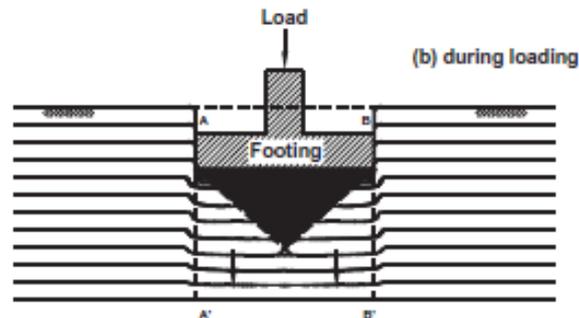


Figura 7 Mecanismo de falla en un suelo no saturado (Oh & Vanapally , 2013)

$$q_{ult(unsat)} = \frac{\tau}{2} \left[1 + 0,2 \left(\frac{B}{L} \right) \right] N_{c(unsat)} \quad (8)$$

Donde:

τ = Resistencia al corte

B = Ancho

L = Largo

$N_{c(unsat)}$ = Factor para suelos no saturados

9. CONCLUSIONES

El presente documento cumple con el propósito de profundizar en el conocimiento de la mecánica de los suelos no saturados, tocando temas como lo es la succión y algunos métodos para poder medirlo hasta tocar temas como lo es la capacidad de carga.

La mecánica de suelos no saturados no cuenta con un desarrollo tan adelantado como si lo tienen los suelos saturados esto debido a la gran complejidad que se encuentra en asociar tantas variables en un solo modelo. Sin embargo, son grandes avances los que se han encontrado con las ayudas de herramienta más modernas como las técnicas avanzadas para la medición de la succión y las técnicas avanzadas de alta medición de variables en los laboratorios.

Conocer el perfil de succión del suelo a partir de la humedad permite entender el cambio en los estados de esfuerzos del suelo y por lo tanto el cambio en la resistencia del mismo.

Comprender la mecánica de suelos no saturados, permitirá a los ingenieros geotecnistas dar mejores soluciones ingenieriles a los desafíos en la ingeniería brindando diseños óptimos, un caso particular es el diseño de cimentaciones superficiales para el cual la capacidad portante aumenta con el incremento del nivel de succión.

10. REFERENCIAS

- Alfaro, M. (2008). *Geotecnia En Suelos No Saturados* . Colombia.
- Barrera, M., Garnica , P., & Martínez, F. (2004). *Influencia de la Succión En Los Cambios Volumétricos de un Suelo Compactado* . Sanfandila.
- Borda, S., & Galvis, C. (2019). *Medición de la succión o Potencial Hídrico en Diferentes Muestras de Suelos no Saturados con wp4c*. Bogotá.
- Braja , M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Mexico : Cengage Learning .
- Buenfil, C. (2007). *Caracterización experimental del comportamiento hidrométrico de una arcilla compactada*. Barcelona.

- Croney, D., & Coleman, J. (1960). *Pore Pressure and Suction in Soil*. London.
- Fredlund, D. (1978). *Stress state variables for unsaturated soils*.
- Fredlund, D. (1978). *Stress state variables for unsaturated soils*.
- Fredlund, D., Rahardjo, H., & Fredlund, M. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. New jersey: Wiley.
- Huanca, S. (2018). *Mecánica de suelos no saturados en el diseño y construcción de cimentaciones superficiales*. Armenia, Quindío.
- INVIAS. (s.f.). *Determinación de la succión de un suelo*.
- Lopez, L. Y. (2016). *Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba. Aplicaciones al cálculo de las deformaciones de las bases de las cimentaciones*. Cuba.
- Oh , W., & Vanapally , S. (2013). *Interpretation of the bearing capacity of unsaturated fine-grained soil using the modified effective and the modified total stress approaches*.
- Pérez G, N. (2008). *Determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión*. Sanfadila.
- Terzaghi, K. (1936). *The shear strength of saturated soils*. Cambridge.
- Thanh , V., & Russell, A. (2015). *Bearing capacity of strip footings on unsaturated soils by the slip line theory*. Sydney .
- Vahadifard , F., & Robinson , J. (2016). *Unified method for estimating the ultimate bearing capacity of shallow foundations in variably saturated soils under steady flow* .