

Modelación numérica de la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos fisurados. Comparación con resultados experimentales

Andrés Camilo Torres Mahecha – Catalina Lozada López

Resumen

El presente estudio analiza la capacidad portante de un suelo en condición saturada y parcialmente saturada en presencia de fisuras generadas por el fenómeno de desecación, por medio de modelos numéricos empleando el programa de elementos finitos Plaxis 2D. Se implementa el modelo constitutivo Cam Clay Modificado y el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, utilizando el modelo Van Genuchten para el comportamiento del agua en el suelo.

Por otra parte, se determina la capacidad portante de manera analítica empleando la ecuación propuesta por Vanapalli y Mohamed (2007). A partir del trabajo de Lozada (2015), se tomaron los resultados de los modelos físicos a escala reducida elaborados por esta autora y se compararon con los que se obtuvieron en las modelaciones numéricas presentados en esta investigación.

Como resultado con el modelo Mohr – Coulomb si se logró la tendencia esperada, es decir, el aumento de la capacidad portante con las fisuras de desecación, si bien cabe resaltar que dicha tendencia fue sobrestimada. No sucedió lo mismo con el modelo Cam Clay modificado, por cuanto no se evidenció el aumento de la capacidad portante debido a que este no presenta un acoplamiento total de la succión con el modelo constitutivo.

Lo anterior permite concluir que con el modelo Mohr – Coulomb se puede obtener un acoplamiento adecuado de la succión y la profundidad de la fisura. En cuanto al modelo analítico, sí se obtuvo la tendencia esperada, de una manera más cercana a lo previsto en la investigación de Lozada (2015).

Palabras claves: capacidad portante, fisuras de desecación, modelación numérica y física, cimentaciones superficiales.

Introducción

La capacidad portante de las cimentaciones superficiales es un tema de gran importancia, debido a que es un factor determinante en la seguridad y estabilidad de cualquier estructura construida sobre el terreno. En particular, el efecto de las fisuras de desecación en la capacidad portante de las cimentaciones superficiales sobre suelos parcialmente saturados, fenómeno que ha sido objeto de numerosos estudios.

En consecuencia, la desecación genera cambios en el contenido de humedad de los suelos arcillosos produciendo cambios volumétricos los cuales generan fisuras en los suelos Ochoa Meza, (2012). Según Kodikara. et al. (2000), estas fisuras se presentan durante el proceso de desecación cuando la resistencia a la tensión del suelo es superada por la resistencia a la tensión debida a la succión matricial.

Se han observado grandes fisuras en países como México y Estados Unidos. En México se tienen reportes de fisuras en el municipio de Nextipac, con una fisura principal de 1073 m de longitud y ancho máximo de 3.5 m. Igualmente, en el estado de Arizona de los Estados Unidos, se han observado fisuras similares, con anchos de hasta 1 m, profundidades máximas de 3 m y longitudes de hasta 300 m Lozada, (2016a). Estas fisuras aparecen después de periodos de lluvias intensas Suárez-Plascencia et al. (2005).

De igual manera, en el norte y occidente de la Sabana de Bogotá se han registrado fisuras de gran magnitud las cuales, fueron estudiadas por Vesga et al. (2003). Lozada (2016a) y Vesga et al. (2003) concluyeron teóricamente que las columnas formadas por las fisuras fallan por su propio peso produciendo grandes asentamientos. Esta primera falla genera esfuerzos cortantes entre las columnas generando una falla secuencial por corte entre las columnas del suelo.

Para comprobar estos mecanismos Lozada et al. (2015), investigaron experimentalmente el comportamiento de suelos con fisuras. Esta investigación se desarrolló a través de la modelación física en centrífuga geotécnica. Se estudió la influencia de las fisuras en la capacidad portante de cimentaciones superficiales con un nivel freático impuesto.

Es importante destacar, que el fenómeno de desecación puede presentarse por factores ambientales-climáticos, que consiste en la pérdida de humedad de los suelos más superficiales expuesta al ambiente. Los aspectos ambientales que más influyen en la pérdida de humedad del suelo son la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la acción del viento de acuerdo con Corte y Higashi, (1964); Delage et al., (2005); Kodikara. et al., (2000); Wilson, (1990). Asimismo, se puede desarrollar debido a acciones antrópicas que se realizan sobre determinado entorno, como: la extracción de agua para las industrias y el crecimiento de la población Lobo-Guerrero (1992). También ocurre por otras acciones naturales. En los fenómenos de desecación anteriormente nombrados, la pérdida de humedad del suelo se produce por el abatimiento del nivel freático Vesga et al., (2003).

Autores como Rayhani et al, (2008) afirmaron que dichas variaciones de las propiedades del suelo están relacionadas con el cambio físico al que este se ve sometido, ya que, existe una alteración en la proporción de elementos como agua y aire que ocupan los espacios vacíos de la estructura del suelo. Esto, cuando la humedad del suelo aumenta o decrece.

Para el caso puntual del fenómeno de desecación en donde existe una disminución en la humedad, las variaciones en propiedades del suelo se generan por la salida de agua y entrada de aire dentro de los espacios vacíos de la estructura del suelo. Provocando así una serie de esfuerzos de tracción y deformaciones en el interior de la masa de suelo; los cuales, en algunos casos logran generar agrietamiento en la parte más superficial del mismo.

Los aportes Lozada et al. (2015) y Vesga et al. (2003), sirvieron de base en el presente estudio que tuvo como finalidad estudiar el efecto de las fisuras de desecación en la capacidad portante de cimentaciones superficiales para un suelo saturado y parcialmente saturado utilizando modelación numérica con elementos finitos.

Para lograr este objetivo, primeramente, se definió la configuración geométrica de la arcilla de la Sabana de Bogotá que será implementada en los modelos numéricos. Luego se estableció la estructura de modelación para definir las Etapas, Fases y cantidad de modelos a desarrollar para estudiar el efecto de las fisuras de desecación. Seguidamente, se determinó el efecto de las fisuras por desecación en la capacidad portante de una cimentación superficial sobre un suelo saturado y un suelo no saturado. Y, por último, se realizó una comparación de los resultados de los modelos numéricos con los resultados obtenidos por Lozada et al. (2015) a partir de la modelación en centrífuga geotécnica.

Desde el punto de vista metodológico en la investigación se describió la revisión de los trabajos previos más relevantes en los que se estudió la incidencia de las fisuras de desecación en la capacidad portante de la arcilla blanda de la Sabana de Bogotá, con el fin de identificar las principales características de las fisuras, las propiedades del suelo y el perfil geotécnico típico de esta arcilla. A continuación, se presentan en la Figura 1 las etapas de la metodología.

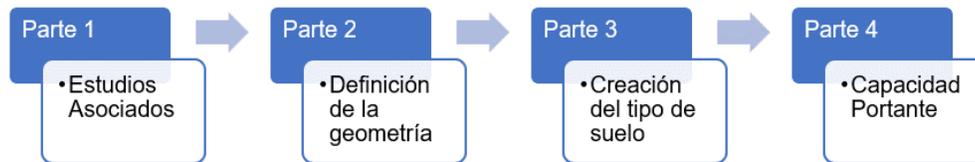


Figura 1. Metodología: Etapas Principales (elaboración propia).

En la parte 1, en los estudios asociados se determinaron las características del perfil estratigráfico del suelo y las características principales de las fisuras, en donde se toma el trabajo de Lozada (2016b) como referencia. El autor realizó modelos a escala reducida en centrífuga geotécnica y simuló fisuras por desecación de la arcilla de la sabana de Bogotá y su incidencia en la capacidad portante en cimentaciones superficiales.

El perfil estratigráfico de los modelos numéricos guarda similitud con las dimensiones de los modelos a escala reducida, respetando las leyes de escala. Estos modelos se componen de una capa de arcilla sobre consolidada, que sobre yace en una capa de arcilla normalmente consolidada NC, y un nivel freático con una altura de 9.25 m medidos desde la base del modelo Lozada et al., (2015). Se puede observar en la Tabla 1

Tabla 1. Dimensiones de los modelos. Adaptado de: Lozada, (2016).

Modelo	Profundidad de la fisura (m)	Altura del suelo SC. (m)	Altura del suelo NC. (m)	Nivel freático (m)
C2	0	8.50	6.65	9.25
C1	3	8.15	8.15	9.25
C4	5	8.80	7.65	9.25
C6	6.5	8.85	8.1	9.25
C3	8	8.90	8.2	9.25

En la parte 2, se realizó la definición de la geometría, es decir se define el perfil estratigráfico, el nivel freático y las condiciones de frontera (desplazamientos y flujo de agua), con el fin de tener correspondencia con los prototipos de la Tabla 1, para poder comparar los resultados de los modelos a escala realizados por Lozada (2016), con los resultados de los modelos numéricos que se desarrollaron en el presente trabajo. Se escogieron 5 configuraciones geométricas “tipo” que se asemejan a el perfil típico de la arcilla de la Sabana de Bogotá. En la Figura 2, se puede apreciar la configuración del perfil estratigráfico.

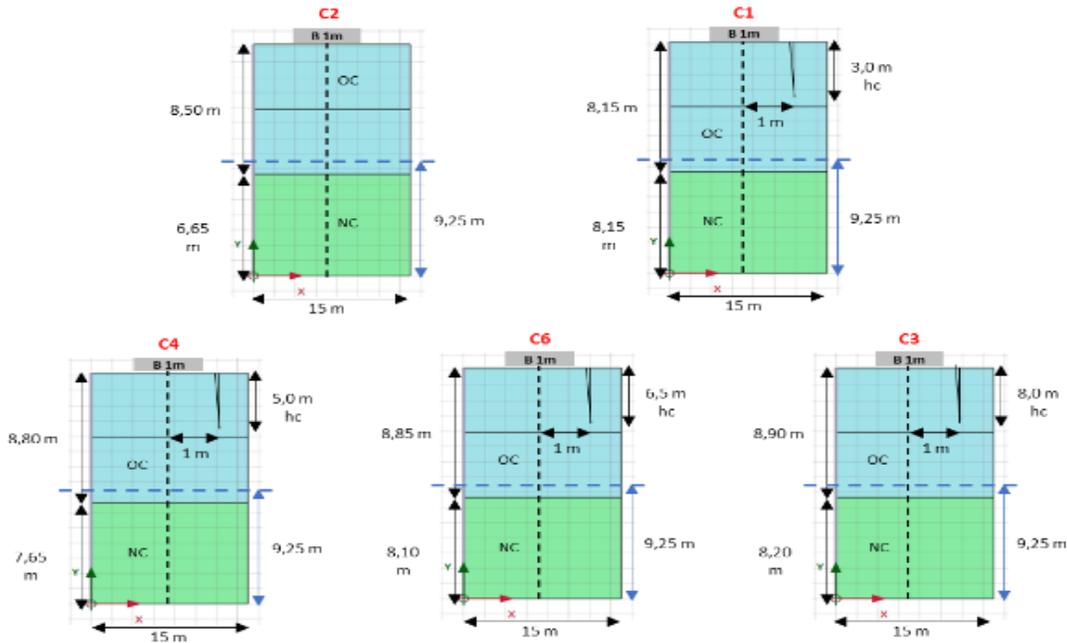


Figura 2. Configuración de la geometría para los modelos (elaboración propia).

Teniendo semejanza entre el perfil estratigráfico de los modelos numéricos y los modelos físicos a escala reducida es necesario definir el tipo de análisis. Esto es dado a que la geometría de la cimentación empleada en los modelos físicos a escala reducida fue circular. Ver Figura 3.

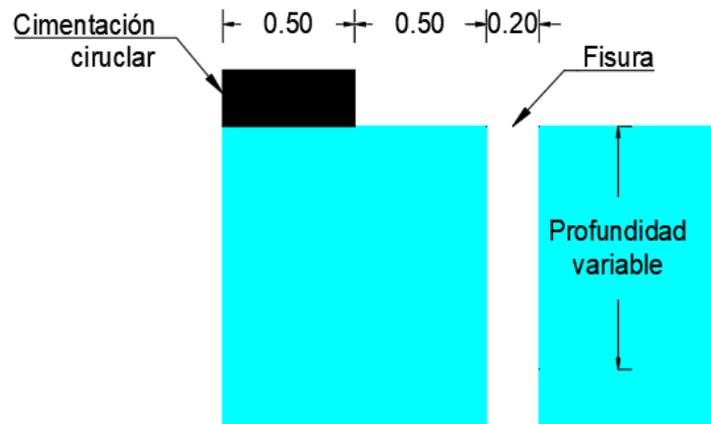


Figura 3. Ubicación de la fisura con respecto a la cimentación (elaboración propia).

En la parte 3, creación del tipo de suelo se asignan los parámetros para cada tipo de suelo, de acuerdo con los modelos constitutivos seleccionados. Para el modelo Cam Clay Modificado los parámetros de entrada son: índice compresión, pendiente de la curva de carga - descarga, el factor de forma y la relación de Poisson. Para el modelo Mohr-Coulomb los parámetros de entrada son: la resistencia al corte y el Módulo de Young.

En esta instancia, los modelos A y los modelos B, los cuales tienen como objeto obtener los parámetros adecuados del modelo constitutivo y propiedades índice respectivamente. Dichas etapas se presentan a continuación: a) Parámetros del modelo constitutivo: Modelos 1, 2 y 3 y b) Propiedades base del suelo: Modelos 4 al 62.

a) Parámetros del modelo constitutivo, los primeros 3 modelos realizados en esta etapa tienen como objetivo principal definir los parámetros del modelo constitutivo Cam Clay Modificado. Para esto se realizaron diferentes modelos numéricos en los cuales se utilizaron diferentes parámetros del modelo, según la propuesta de diversos autores.

b) Propiedades base del suelo: Modelos 4 al 62. Para determinar algunas de las propiedades índice del suelo como lo es el peso saturado, peso seco y la relación de vacíos se generaron 58 modelos numéricos (modelos del 4 al 62), los cuales consistieron en ajustar la humedad inicial del suelo, con el fin de obtener similitud entre la humedad final del modelo físico y la humedad del modelo numérico al final de la consolidación.

En la parte 4, capacidad portante, o etapa de carga se realiza de conformidad con los parámetros del modelo constitutivo y las propiedades básicas definidas en los modelos nombrados anteriormente. Para este caso, se emplean dos modelos constitutivos del programa Plaxis 2D; Modelo Cam Clay Modificado y Modelo Mohr Coulomb.

Con el modelo constitutivo Cam Clay Modificado se realizaron una serie de modelaciones numéricas divididas según la condición de geometría y condición de saturación, en la Tabla 2 se presenta el número de modelo, la condición de saturación y la presencia o no de la fisura.

Tabla 2. Etapas de modelación con el modelo Cam Clay Modificado.

Modelo numérico	Condición de saturación	Fisura
63 a 67	Saturada	Sin presencia
68 a 72	Saturada	Con presencia
73 a 77	Parcialmente Saturada	Sin presencia
78 a 82	Parcialmente saturada	Con presencia

Con el Modelo Mohr-Coulomb, se determinaron los siguientes 10 modelos numéricos los cuales, del modelo 83 al modelo 87 se realiza con fisura en su geometría y en condición saturada, y del modelo 88 al modelo 92 con presencia de fisuras y en una condición parcialmente saturada. Los parámetros empleados en este modelo se tomaron a partir de los modelos físicos a escala reducida.

Resultados

En la definición de la geometría, es necesario emplear para los modelos numéricos un análisis con simetría axial. Para la discretización del medio se toman elementos de 15 nodos, ya que es recomendable para el análisis de simetría axial y generan cálculos de mayor precisión en comparación con elementos de 6 nodos. En la Figura 4 se ilustran los elementos seleccionados, Plaxis 2D Reference Manual, (2020).

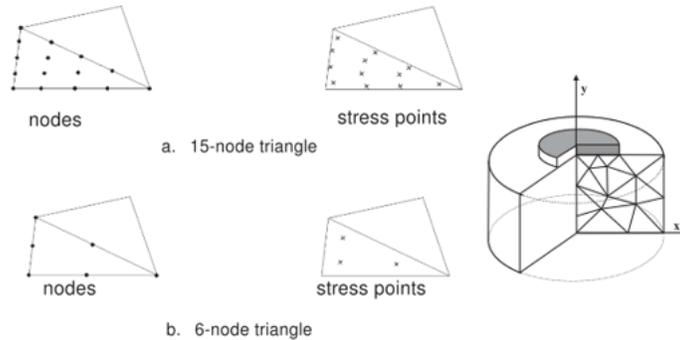


Figura 4. Configuración de nodos y Tipo de simetría. Tomado de Plaxis 2D. Reference Manual (2022).

Con respecto a las condiciones de desplazamiento se impone restricción perpendicular en los bordes laterales, el borde inferior se fija en forma total, con respecto al borde superior se deja sin ninguna restricción (ver figura 5A). Con relación a las condiciones de flujo, dado que en los modelos físicos a escala reducida se tiene un nivel freático constante, en los modelos numéricos se configura las condiciones de frontera para mantener el nivel freático constante, por lo cual es necesario impedir el flujo a través de los límites del modelo numérico asignado una condición cerrada (ver la Figura 5B).

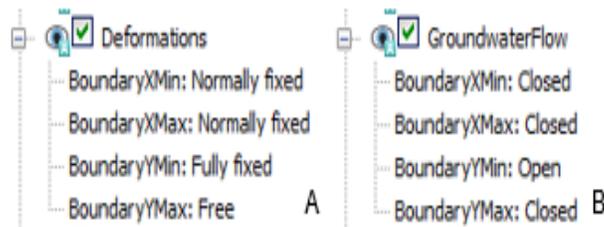


Figura 5. Condiciones de frontera: A) Desplazamiento B) Flujo de agua (elaboración propia).

Una vez definida la geometría, el tipo de análisis y las condiciones de frontera se procedió a realizar la discretización del medio, como se ilustra en la Figura 6.

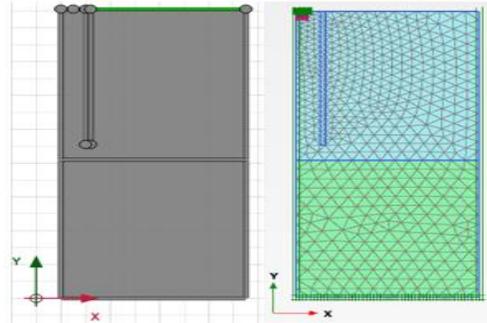


Figura 6. Geometría del modelo C3 y discretización del medio (elaboración propia).

En cuanto a la parte 3, creación de los suelos, se determinaron los parámetros del modelo constitutivo Cam Clay Modificado y en determinar las propiedades del suelo: la relación de vacíos, peso unitario seco y peso unitario saturado.

Por otra parte, en la selección de los parámetros del modelo Cam Clay Modificado CCM, se realizó con base en una revisión bibliográfica. Para la arcilla normalmente consolidada se tuvieron en cuenta los autores listados en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros Cam Clay Modificado para la Arcilla NC.

Modelo numérico	Autor	Parámetros CCM - Slurry			
		v	λ	k	M
1	Cao et al (2003)	0.30	0.260	0.020	0.900
2	Viggiani (1992)	0.30	0.151	0.034	0.800
3	Cao et al (2002)	0.30	0.260	0.050	0.900

Para la arcilla sobreconsolidada se adoptan los parámetros empleados por Stallebrass (1990), Los parámetros se listan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros CCM Arcilla S.C.

Autor	Parámetros CCM - Arcilla S.C.			
	v	λ	k	M
Stallebrass 1990	0.30	0.073	0.005	0.89

En el proceso de selección de parámetros del modelo Cam Clay Modificado, se toma un nodo en la superficie (nodo A) de la geometría de los modelos para medir el asentamiento del perfil estratigráfico al final de la etapa de consolidación, la localización de este nodo de control se ilustra en la Figura 7.

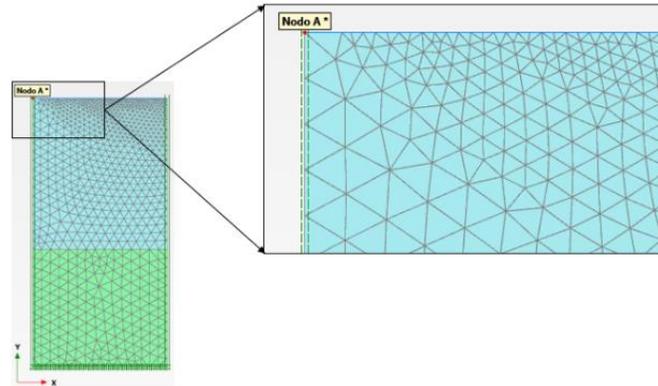


Figura 7. Punto de control de asentamiento (elaboración propia).

La etapa de consolidación se generó por peso propio, esta etapa se realizó como una etapa constructiva y durante el tiempo de duración se mantuvo constante el nivel freático. El tiempo total de la etapa de consolidación corresponde al modelo físico a escala reducida el cual, es de 555.2 días (escala prototipo). Esta etapa de consolidación se realizó inmediatamente después de generar los estados de esfuerzos inicial del perfil estratigráfico del suelo.

Con los parámetros determinados del modelo constitutivo se procede a obtener las propiedades base del suelo: relación de vacíos y peso unitario, por lo que, de los modelos físicos a escala reducida presentados en la investigación de Lozada. (2016), se tiene la humedad al final del proceso de consolidación. En esta etapa la consolidación de los modelos numéricos, se realizaron sin existencia de fisura, dado que la columna generada por la fisura falla antes de terminar el proceso de consolidación y no logra continuar a la etapa de capacidad portante.

En la Tabla 5 se resumen las propiedades iniciales y finales de cada modelo físico a escala reducida, como de los modelos numéricos y la diferencia obtenida en el asentamiento total. Dado que se busca que la humedad final después del proceso de consolidación de los modelos numéricos tenga una magnitud similar a la humedad final de los modelos físicos, la humedad inicial se varió, iniciando con el valor de humedad inicial reportado por Lozada, (2016) y se varió hasta un valor de humedad inicial, tal que, se obtuviera la humedad esperada al final del proceso de consolidación. También en la Tabla 5 se listan los valores iniciales de humedad de los modelos numéricos con los que obtiene la humedad final similar a la de los modelos físicos.

Al final de la etapa de consolidación de los modelos numéricos realizados se obtiene la humedad final y el asentamiento total, magnitudes que se presentan en la Figura 8. Por otro lado, se determinó la capacidad portante empleando el programa Plaxis 2D, con el modelo constitutivo Cam Clay Modificado, y el modelo Mohr Coulomb, de igual manera se obtiene la capacidad portante de manera analítica propuesta por Vanapalli y Mohamed (2007) y utilizada por Lozada et al. (2018).

Tabla 5. Comparación de parámetros entre el modelo físico y el modelo numérico. Arcilla normalmente consolidada.

Modelo		Propiedades iniciales			Propiedades finales			Asentamiento total (m)
		w%	e	γ_{sat} KN/m ³	w%	e	γ_{sat} kN/m ³	
C2	Físico	26.13	0.69	28.95	44.00	1.18	17.50	0.33
	Numérico	47.00	1.25	17.02	44.44	1.18	17.25	0.24
C1	Físico	40.65	1.08	17.78	44.70	1.18	17.70	0.28
	Numérico	47.00	1.25	17.02	44.92	1.20	17.21	0.23
C4	Físico	35.57	0.94	24.65	42.40	1.12	17.30	0.27
	Numérico	45.00	1.19	17.19	42.56	1.13	17.42	0.25
C6	Físico	40.28	1.07	23.18	42.00	1.11	17.56	0.34
	Numérico	44.00	1.17	17.28	41.77	1.11	17.50	0.23
C3	Físico	40.89	1.08	23.00	42.80	1.13	17.50	0.24
	Numérico	45.00	1.19	17.19	42.65	1.13	17.42	0.25

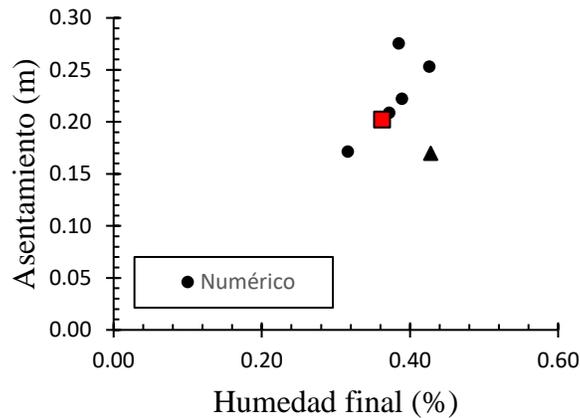


Figura 8. Modelo C3. Etapa de calibración. E0-F2 (elaboración propia).

Empleando los parámetros del modelo constitutivo Cam Clay Modificado, de los 3 primeros modelos, y las propiedades base del suelo presentados en la tabla 6 de los siguientes 58 modelos numéricos. se procede a determinar la capacidad portante. Para esto se analiza primero un perfil de suelo el cual no presenta fisuras, posteriormente se determina la capacidad portante para un perfil de suelo que tiene fisuras con diferentes profundidades.

Para la condición saturada se realiza los modelos numéricos desde el 62 hasta el 67 y para la condición parcialmente saturada se realiza los modelos numéricos 73 hasta el modelo 77. Para estos últimos modelos se ingresan los parámetros del modelo Van Genuchten, los cuales se presentan a continuación:

- Contenido de humedad residual (θ_r): 0.026.
- Contenido de humedad saturada (θ_s): 1.0.
- Inverso del valor de entrada de aire (α): 0.004.
- Parámetro de ajuste empírico (n): 6.0.

Antes de determinar la capacidad portante en cada modelo se tiene una etapa de precarga para generar un perfil sobreconsolidado. Esta etapa de precarga se realiza con una línea de carga (kN/m^2) uniformemente distribuida. La Figura 9a presenta un perfil de relación de sobreconsolidación al momento de realizar la precarga, luego de retirar la precarga se obtiene el perfil de suelo sobreconsolidado (ver Figura 9b).

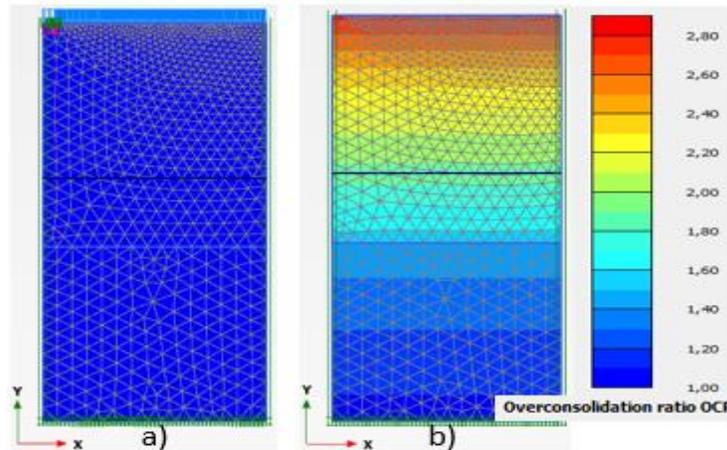


Figura 9. Perfil de relación de sobreconsolidación. a) Perfil normalmente consolidado, b) Perfil sobre consolidado (elaboración propia).

En la Figura 10 se muestra la curva desplazamiento vs esfuerzo vertical obtenida de la línea de desplazamiento descrita con anterioridad para cada condición de saturación. Es importante notar que la capacidad portante en condición parcialmente saturada es mayor en comparación a condición saturada.

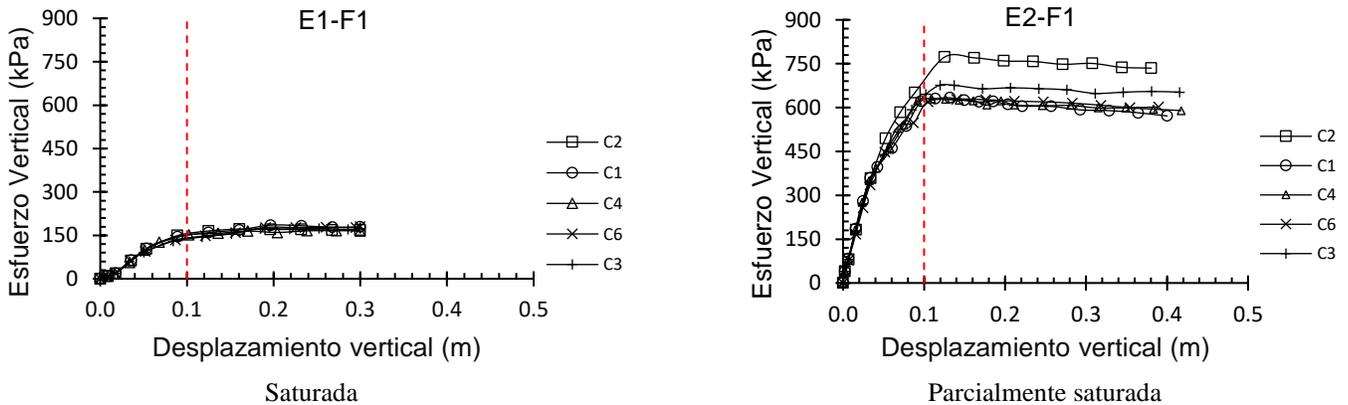


Figura 10 Capacidad portante, Modelo Cam Clay Modificado (perfil de suelo sin fisuras) (elaboración propia).

Después de tener el perfil de suelo sobreconsolidado, generar la fisura y finalizar la etapa de carga se obtienen los resultados de la Figura 11 donde se muestra el desplazamiento versus el esfuerzo vertical para cada condición de saturación.

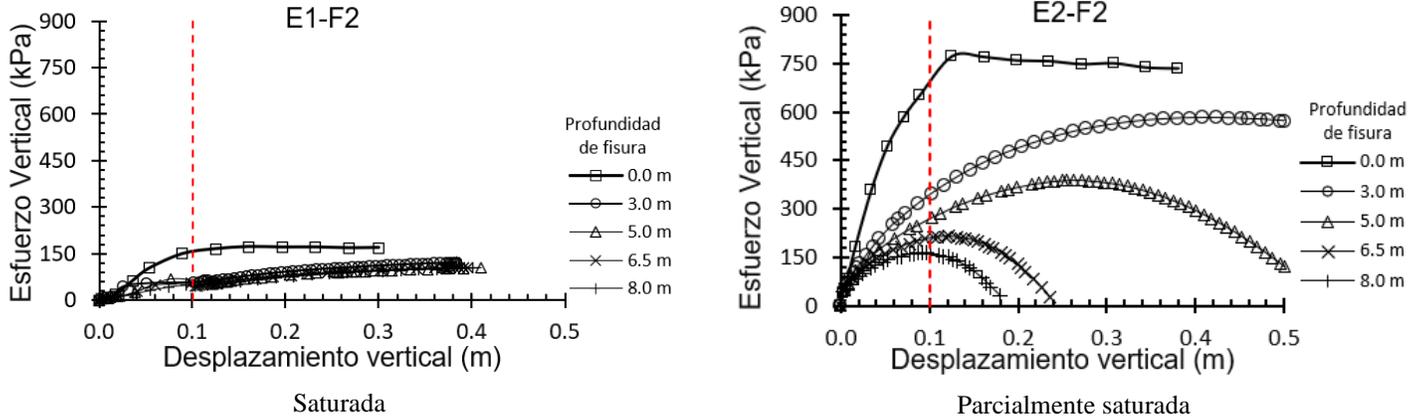


Figura 11. Capacidad portante, Modelo Cam Clay Modificado (con fisuras) (elaboración propia).

En los resultados obtenidos con los modelos numéricos (Figura 11) se observa una reducción de la capacidad portante para todos los modelos con presencia de fisuras. En el modelo Mohr Coulomb se requiere la resistencia al corte no drenada S_u (kN/m^2), y el Módulo de Young E (kN/m^2) parámetros los cuales se tomaron a partir de los modelos físicos. Para tener en cuenta el efecto de la succión en la resistencia al corte no drenada S_{uunsat} , se emplea la Ecuación 1 la cual fue propuesta por Vanapalli y Mohamed (2006). Esta ecuación está en función de la resistencia al corte no drenada S_u , la succión $(U_a - U_w) *$ y el ángulo de fricción ϕ^b

Ecuación 1. Resistencia al corte no drenada no saturada (Vanapalli y Mohamed 2006).

$$S_{uunsat} = S_u + (U_a - U_w) * \tan\phi^b$$

La resistencia al corte no drenada S_u , se obtiene con la Ecuación 2 propuesta por Garnier, (2001) la cual está en función de la resistencia por punta (q_{tip}) del ensayo CPT. La resistencia por punta se toma del modelo a escala reducida saturado (modelo cubierto) realizado por Lozada et al. (2018).

Ecuación 2. Resistencia al corte saturada no drenada (Garnier, (2001).

$$S_{uCTP} = q_{tip}/18.5$$

Para la succión $U_a - U_w$ y ϕ^b , se tiene en cuenta el perfil de resistencia al corte y succión presentado por Lozada (2016). Este perfil se divide en tres zonas principales y de cada zona se obtiene un valor de succión y un valor de ϕ^b representativo, para así obtener mayor similitud entre el perfil de suelo de los modelos numéricos con los modelos físicos a escala reducida, estas zonas se muestran en la Figura 12.

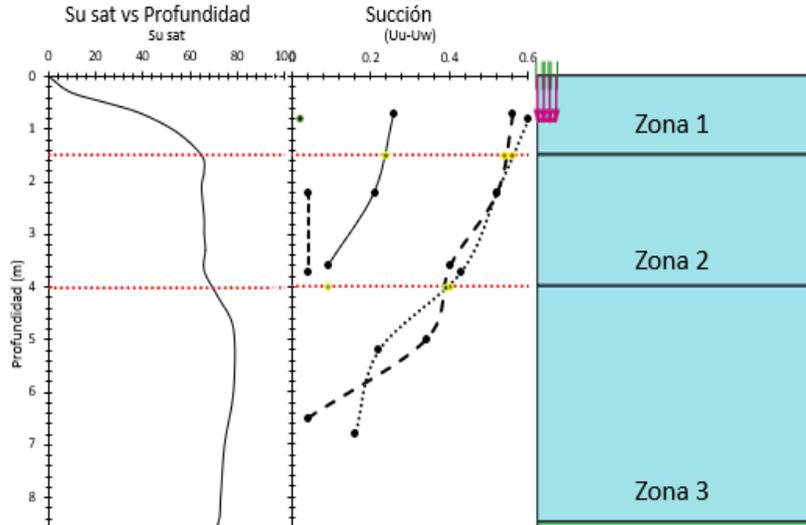


Figura 12. Perfil de cohesión y succión. Adaptado de Lozada, 2016.

El módulo de Young E (kN/m^2) se calculó empleando la Ecuación 3 de la teoría de elasticidad (Won Taek Oh y Vanapalli, 2008). En esta ecuación el módulo de Young está en función del valor del asentamiento ($\Delta\delta$) y del esfuerzo vertical (Δq_p). Estos valores se tomaron de las curvas de desplazamiento vs esfuerzo vertical presentados por Lozada (2016) en su investigación.

Ecuación 3, Módulo de Young. (Won Taek Oh y Vanapalli, 2008).

$$E = \frac{1.5 * B_p}{(\Delta\delta/\Delta q_p)}$$

Para determinar el módulo de Young, a manera de ejemplo se presenta la Figura 13 que corresponde al modelo físico de escala reducida C6.

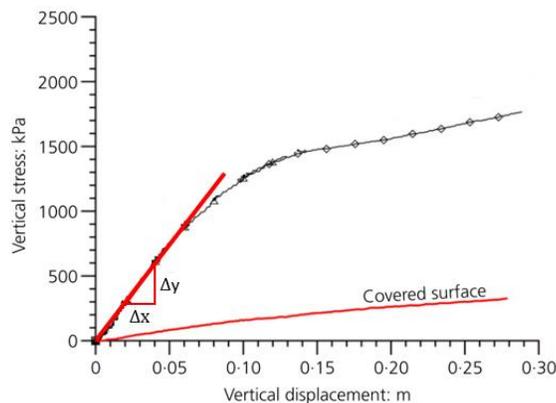


Figura 13. Curva de desplazamiento vs Esfuerzo vertical. Adaptado de Lozada, 2016.

Para el modelo analítico se emplea la Ecuación 4, propuesta por Vanapalli y Mohamed (2007) y empleada por Lozada et al. (2018), esta ecuación se basa en la ampliación de la teoría de la capacidad portante propuesta por Terzaghi, contemplando las condiciones parcialmente saturadas

agregando un término para incluir el efecto de la succión matricial S. Vanapalli y Mohamed, (2007).

La capacidad portante de la Ecuación 4 es función de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de penetración de cono, de la succión, de ϕ^b , y del factor adimensional de capacidad de carga N_c .

Ecuación 4. Capacidad portante, extendida a condiciones parcialmente saturadas (S. Vanapalli y Mohamed, 2007).

$$q_u = (S_{u\ CPT} + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b) N_c$$

Con los datos mencionados anteriormente e implementando la Ecuación 4, se obtienen los resultados resumidos en la Figura 14.

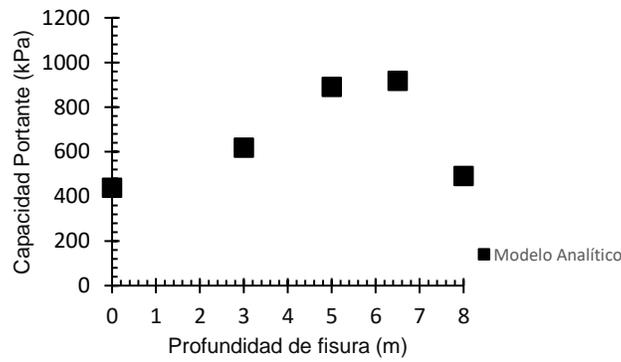


Figura 14. Capacidad portante método analítico (elaboración propia).

Finalmente, en los resultados presentados en la Figura 15 muestran la capacidad portante para un perfil de suelo sin existencia de fisuras en condición saturada y parcialmente saturada empleando el modelo constitutivo Cam Clay Modificado, y el modelo Mohr-Coulomb. De igual manera se calculó la capacidad portante de manera analítica empleando el método propuesto por Vanapalli y Mohamed (2007).

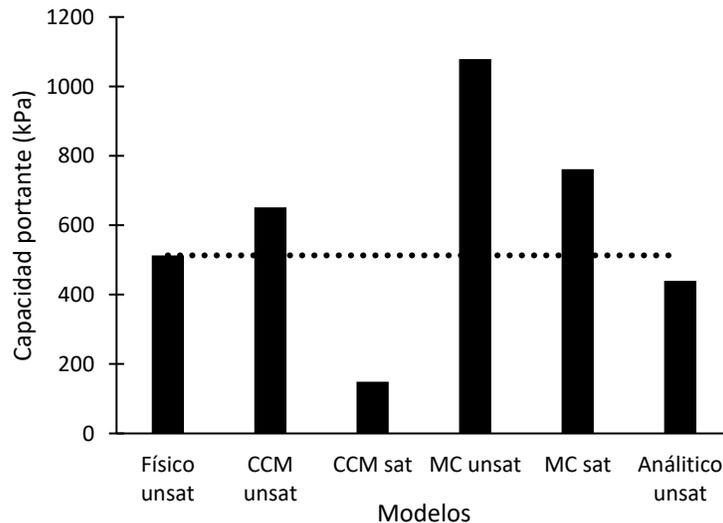


Figura 15. Capacidad portante, modelos sin fisura (elaboración propia).

Para una condición saturada se determina la capacidad portante con existencia de fisuras en el perfil de suelo, los resultados se ilustran en la Figura 16. Se puede observar que la mayor capacidad portante se obtiene en los modelos sin presencia de fisuras, y no se evidencia efecto alguno de las fisuras en la capacidad portante ni variación apreciable en función de la profundidad de la fisura. Con el modelo Constitutivo Mohr Coulomb se obtiene la mayor capacidad portante con respecto al modelo Cam Clay Modificado.

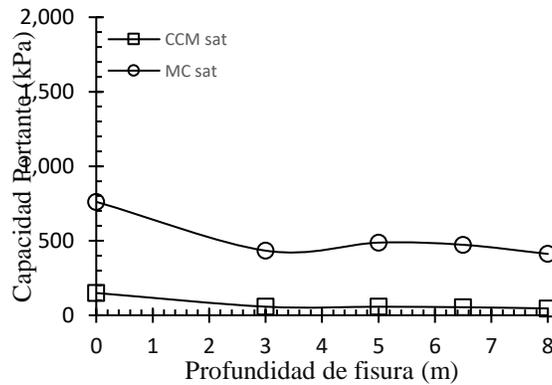


Figura 16. Capacidad portante, modelos con fisura condición saturada (Vanapalli y Mohamed, 2007) (elaboración propia).

Finalmente, para comparar los resultados de los modelos numéricos con los datos de capacidad portante publicados en la investigación realizada por Lozada et al. (2015) se presenta la Figura 17 los resultados obtenidos mediante modelación numérica empleando los modelos constitutivos Cam Clay Modificado (CCM), Mohr-Coulomb (MC) y los resultados obtenidos mediante el método analítico propuesto por Vanapalli y Mohamed (2007).

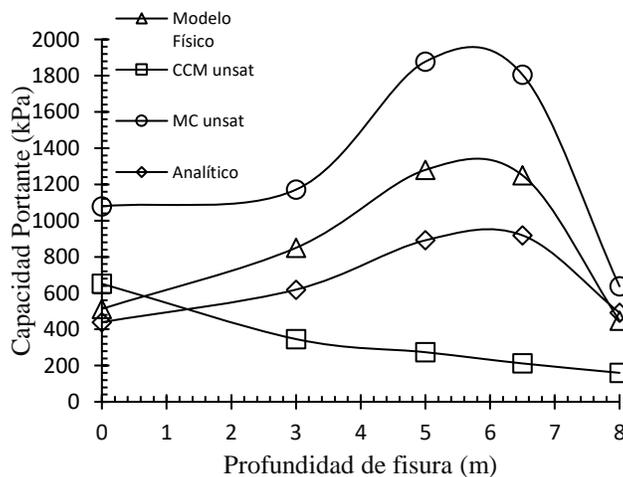


Figura 17. Capacidad portante, modelos con fisura condición parcialmente saturada (elaboración propia).

Se puede observar que la tendencia esperada se obtuvo con el modelo constitutivo Mohr-Coulomb y con el método analítico propuesto por Vanapalli y Mohamed (2007), en comparación la tendencia

con el modelo Cam Clay Modificado fue diferente a la esperada. Esto se debe a que en el modelo MC y el método analítico se tuvo en cuenta la variación de la succión por efecto de la desecación en la profundidad de las fisuras, en cambio con el modelo CCM esta variación de la succión no se presentó en los modelos numéricos, dado que Plaxis no acopla el efecto de la evaporación y la profundidad de las fisuras con la succión, por lo cual no se tiene variación de la succión en los modelos numéricos con el modelo constitutivo Cam Clay Modificado.

Adicionalmente de evaluar la influencia de las fisuras en la capacidad portante, Lozada et al. (2015), en su investigación describe tres mecanismos de falla que pueden explicar los resultados obtenidos en la capacidad portante. Estos mecanismos de falla son: Falla A, que corresponde a una falla de una cimentación superficial; Falla B: que corresponde a una falla por corte de columna; Falla C: la cual corresponde a una falla por suelo blando. Estos mecanismos de falla se ilustran en la Figura 18.

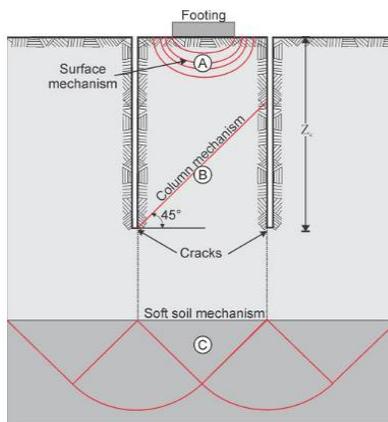


Figura 18. Mecanismos de falla. Tomado de Lozada et al., (2015).

Para validar los estos mecanismos de falla se realiza un análisis de los desplazamientos totales generados en todos los modelos numéricos. Con el modelo Cam Clay Modificado se observa que los desplazamientos totales se concentran en función de la condición de saturación en la que sea analizada, por lo cual se tiene una concentración de desplazamientos en la parte superior de la columna (ver Figura 19a), siendo un indicador de falla tipo A de acuerdo con lo propuesto por Lozada en la Figura 18, y para una condición parcialmente saturada el tipo de falla puede ser tipo B, ya que la concentración de desplazamientos se concentran hacia la parte inferior de la columna (ver Figura 19b), este comportamiento es igual en los demás modelos con diferentes profundidades de fisura.

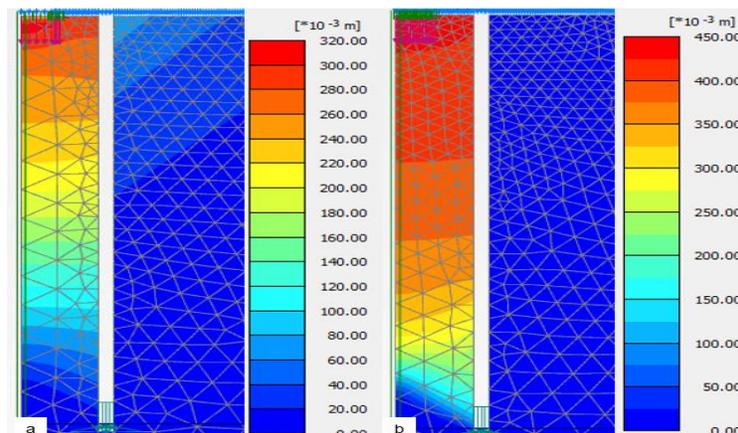


Figura 19. Desplazamientos totales, modelo CCM. a) Condición saturada. b) Condición parcialmente saturada. Modelo con profundidad de fisura 8.0 m (elaboración propia).

Conclusiones

En los resultados se evidenció el aumento de la capacidad portante de cimentaciones superficiales para un suelo parcialmente saturado por las fisuras de desecación, debido a la succión, como se cómo se demostró en la investigación realizada por Lozada et al., (2015).

- Para los modelos sin fisura el modelo constitutivo Cam Clay modificado, tiene una mayor sensibilidad al tener en cuenta el parámetro de la succión en comparación con el modelo Mohr Coulomb. La succión aumenta la capacidad portante en un 515% para el modelo Cam Clay Modificado, y para el modelo Mohr Coulomb este aumento es del 30%.
- La capacidad portante obtenida con el modelo Mohr Coulomb es sobreestimada. Esto se puede deber a que los parámetros fueron tomados indirectamente de los modelos físicos a escala reducida. En la investigación realizada por Lozada et al. (2015) menciona que estos valores pueden ser sobreestimados bien sea por condiciones de frontera o por que se tomaron después del ensayo de capacidad portante.
- La capacidad portante más conservadora fue obtenida con el método analítico propuesto por Vanapalli y Mohamed (2007). Este método tiene una menor diferencia con respecto a los ensayos a escala reducida.
- La tendencia de la capacidad portante versus la profundidad de la fisura con el modelo Mohr Coulomb y el método analítico es la esperada con respecto a la tendencia presentada en los modelos físicos a escala reducida. Esto se debe a que se tuvo en cuenta la variación de la succión con la profundidad de las fisuras en los diferentes modelos.
- No se presenta la tendencia esperada con el modelo constitutivo Cam Clay Modificado, ya que este no presenta un acoplamiento total de la succión y la evaporación con la profundidad de la fisura, por lo cual se tiene una succión constante independiente de la profundidad de la fisura.
- El mecanismo de falla por cimentación superficial (falla tipo A), propuesta por Lozada et al. (2015), ocurre para el modelo Cam Clay Modificado en un análisis de condición saturada, de igual manera se presenta con el modelo Mohr-Coulomb, pero con este último se obtiene tanto en la condición saturada como en condición parcialmente saturada. La falla por columna (falla tipo B), ocurre con el modelo Cam Clay Modificado en una condición parcialmente saturada.

Referencias

- Corte, & Higashi. (1964). Experimental research on desiccation cracks in soils. In *CRREL Research Report* (p. 72). <http://trid.trb.org/view.aspx?id=136592>
- Delage, P., Riffard, M., Lu, Y. F., & Cui, Y. J. (2005). Field simulation of in situ water content and temperature changes due to ground-atmospheric interactions. *Géotechnique*, 55(7), 557–567. <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.7.557>
- Garnier, J. (2001). *Modèles physiques en géotechnique. I-Evolution des techniques expérimentales et des domaines d'application*.
- Kodikara, J., Barbour, S. L., & Fredlund, D. G. (1998). An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(6),

- 1112–1114. <https://doi.org/10.1139/cgj-35-6-1112>
- Lobo-Guerrero, A. (1992). Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. *VII Jornadas Geotecnicas de La Ingenieria de Colombia*, 1–20. http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/16_Geologia_hidrogeologia_Sabana_Bogota.pdf
- Lozada, C. (2016a). *Study of the soil atmosphere interaction and bearing capacity of a soil under desiccation*
- Lozada, C. (2016b). *Study of the soil atmosphere interaction and bearing capacity of a soil under desiccation*.
- Lozada, C., Caicedo, B., & Thorel, L. (2015). Effects of cracks and desiccation on the bearing capacity of soil deposits. *Géotechnique Letters*, 5(3), 112–117. <https://doi.org/10.1680/jgele.15.00021>
- Lozada, C., Thorel, L., & Caicedo, B. (2018). Bearing capacity of circular footings resting on unsaturated desiccated soils. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 19(3), 154–166. <https://doi.org/10.1680/jphmg.17.00060>
- Ochoa Meza, V. E. (2012). Suelos Parcialmente Saturados, De La Investigación a La Cátedra Universitaria. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 31, 23–38. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251/43362>
- Oh, W. T., & Vanapalli, S. K. (2008). *Modelling the Stress versus Settlement Behavior of Model Footings in Saturated and Unsaturated Sandy Soils*. i, 1–6.
- Plaxis 2D Reference Manual. (2020).
- Rayhani, M. H. T., Yanful, E. K., & Fakher, A. (2008). Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils. *Engineering Geology*, 97(1–2), 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.11.003>
- Stallebrass, S. E. (1990). Modelling the effect of recent stress history on the deformation of overconsolidated soils. *City University London*, 34(4), 51–79.
- Suárez-plascencia, C., Escalona-alcázar, F. D. J., & Díaz-torres, J. D. J. (2005). Desarrollo de grietas en el fraccionamiento Prados de Nextipac , Municipio de Zapopan , Jalisco. *GEOS*, 25(2), 352–362.
- Vanapalli, S. K., & Mohamed, F. M. O. (2013). Bearing capacity and settlement of footings in unsaturated sands. *Int. J. GEOMATE*, 5(1), 595–604. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2003.12.002>
- Vesga, L., Caicedo, B., & Mesa, L. (2003). *Deep Cracking in " Sabana de Bogotá " Clay Agrietamiento Profundo en la Arcilla " Sabana de Bogotá " Deep Cracking in " Sabana de Bogotá " Clay Agrietamiento Profundo en la Arcilla " Sabana de Bogotá ."* Junio, 7.
- Wilson, G. W. (1990). *Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems*. 489.