

# Modelización numérica del mecanismo de falla por subpresión de lumbreras en suelos

Juan Valenzuela

UNAM/ Posgrado de Ingeniería / Maestría en geotecnia / [jvalenzuelam@iingen.unam.mx](mailto:jvalenzuelam@iingen.unam.mx)

Edgar Montiel

Geocontrol Chile, S.A./ [geotecnia.emg@gmail.com](mailto:geotecnia.emg@gmail.com)

Miguel Mánica

Instituto de Ingeniería, UNAM / [mmanicam@iingen.unam.mx](mailto:mmanicam@iingen.unam.mx)

Alexandra Ossa

Instituto de Ingeniería, UNAM / [aossal@iingen.unam.mx](mailto:aossal@iingen.unam.mx)

---

Generalmente, la evaluación de la falla no drenada por subpresión en lumbreras construidas en suelos se lleva a cabo mediante la determinación de un factor de seguridad utilizando expresiones analíticas. Sin embargo, existen escasos lineamientos en la literatura para la simulación numérica de este mecanismo. En este trabajo se exploran tres metodologías para la evaluación numérica de la falla por subpresión, que consideran diferentes procedimientos para la generación del desequilibrio que deriva en la condición de falla. Los resultados se comparan con el factor de seguridad obtenido a partir de una expresión analítica. Se señala la metodología más adecuada para representar el mecanismo de falla por subpresión, y se realizan observaciones sobre la posible necesidad de una revisión adicional a la estabilidad de la lumbrera a causa de la disminución de la altura del lodo bentonítico.

---

**lumbreras / suelos blandos / falla por subpresión / modelización numérica / resistencia no drenada**

## 1. Introducción

El diseño de una lumbrera involucra la selección de alguna técnica de construcción acorde con los requerimientos del proyecto y con las condiciones geotécnicas del sitio. Para una solución determinada, es necesaria la evaluación del comportamiento de la lumbrera proyectada y del terreno circundante, garantizando siempre una respuesta dentro de los límites de falla y de servicio establecidos por los reglamentos aplicables.

Entre las etapas de construcción de una lumbrera, las etapas de excavación y sostenimiento son aquellas que involucran mayores modificaciones al estado de equilibrio del terreno, y en donde la ocurrencia de una falla es crítica para el proyecto (Puller 2003). La probabilidad de ocurrencia de un determinado mecanismo de falla depende del nivel de avance de la excavación. La fase entre la finalización de la excavación y la construcción de la losa de fondo es el momento más crítico para la ocurrencia de una falla de fondo por subpresión o por cortante, las cuales tienen un enorme impacto en el avance de la obra debido a la dificultad de los trabajos de reacondicionamiento involucrados en caso de ocurrencia (Montiel et al. 2018).

Particularmente, en el caso de la falla de fondo por subpresión, la estabilidad se evalúa habitualmente a partir de expresiones analíticas derivadas del método de equilibrio límite. Sin embargo, existen escasos lineamientos en la literatura para la simulación numérica del mecanismo de falla por subpresión (Valenzuela Meza et al. 2019). Dichos lineamientos son necesarios para validar, con algún procedimiento alternativo, los cálculos de estabilidad realizados utilizando las expresiones analíticas convencionales. También, son particularmente relevantes en los casos en los que, debido a la complejidad de la geometría o del comportamiento de los materiales involucrados, se encuentran fuera del rango de aplicabilidad de las expresiones analíticas.

En este trabajo se exploran diferentes metodologías para la evaluación numérica de la falla no drenada por subpresión, en lumbreras construidas en suelos blandos, mediante el método de elementos finitos. Las distintas metodologías consideran diferentes procedimientos para la generación del desequilibrio que deriva en la condición de falla. Es importante mencionar que estos procedimientos no intentan reproducir situaciones reales que pudieran presentarse durante la construcción, sino que intentan inducir numéricamente la condición de falla por subpresión, con el fin de poder determinar

qué tan lejos de la inestabilidad se encuentra el sistema mediante el cálculo de un factor de seguridad. Los resultados se comparan con el factor de seguridad obtenido a partir de una expresión analítica, empleada habitualmente en la práctica profesional (CFE and II-UNAM 2017). Se señala también la metodología evaluada más adecuada para representar el particular mecanismo de falla por subpresión.

## 2. Descripción y evaluación convencional de la falla por subpresión

El desarrollo de la falla por subpresión en lumbreras exige condiciones estratigráficas específicas. Particularmente, requiere la construcción de la lumbrera en un suelo de baja permeabilidad (y usualmente de baja resistencia), en donde el fondo de la excavación se encuentre relativamente cerca de un estrato permeable (o acuífero), sometido a una presión de poro considerable (Figura 1). Al realizar la excavación, la presión del agua en el estrato permeable tiende a empujar el suelo comprendido entre éste y el fondo de la excavación, antes de que se pueda establecer una condición de flujo estacionaria debido a la baja permeabilidad del suelo. Esto tiende a inducir un mecanismo de falla cilíndrico, como el que se muestra en la Figura 1. Si la resistencia no drenada del suelo a lo largo de la superficie de falla no puede contrarrestar el efecto de la presión de agua del acuífero, el cilindro (o tapón) de suelo tenderá a levantarse y se producirá la falla por subpresión.

El factor de seguridad para la falla por subpresión puede determinarse estableciendo el equilibrio de fuerzas en la parte superior del estrato permeable, resultando en la siguiente expresión, presente en el manual de obras civiles (CFE and II-UNAM 2017):

$$FS = \frac{\gamma_s h_s + \eta C_u J}{u} \quad (1)$$

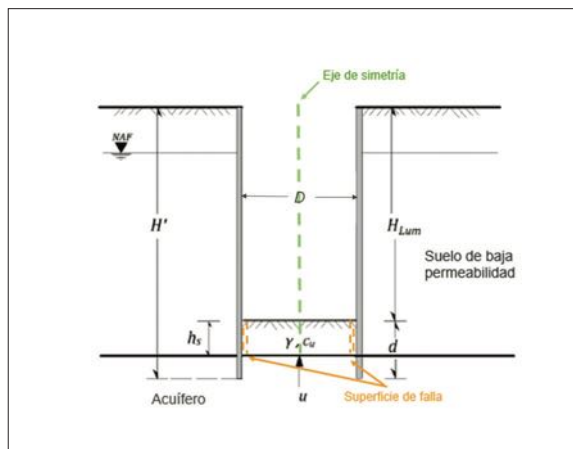


Figura 1. Esquema del mecanismo de falla de fondo por subpresión (CFE and II-UNAM 2017).

donde  $FS$  es el factor de seguridad,  $\gamma_s$  y  $h_s$  son el peso volumétrico y la altura del suelo entre el fondo de la excavación y el estrato permeable respectivamente,  $\eta$  es el factor de adherencia lumbrera-suelo,  $C_u$  es la resistencia media al corte no drenado a lo largo de la superficie de falla,  $J$  es un factor de forma de la sección transversal de la lumbrera (igual a  $4d/D$  para lumbreras circulares), y  $u$  es la presión de poro en el lecho inferior de la capa impermeable. En el manual de obras civiles el factor de adherencia se define como:

$$\eta = 0.4 \sqrt{\frac{\sigma'_z}{C_u}} \quad (2)$$

donde  $\sigma'_z$  es la presión vertical efectiva debida al peso del suelo a la profundidad media del sistema de retención ( $H_{Lum} + d/2$ ). Si  $h_s < d$  entonces  $d$  se reemplaza por  $h_s$ .

Para reducir la posibilidad de una falla por subpresión, se han desarrollado técnicas de construcción especializadas, como la técnica de Cravioto o lumbrera flotante (Moreno-Fernández 1991), donde la excavación se mantiene siempre inundada con lodo bentonítico (ver Auvinet Guichard et al. 2010 para una descripción detallada de la técnica). En este caso, el peso del lodo puede incluirse como un término adicional en el numerador de la Eq. (1), contribuyendo a la estabilidad del sistema (Vargas et al. 2019):

$$FS = \frac{\gamma_l h_l + \gamma_s h_s + \eta S_u J}{u} \quad (3)$$

donde  $\gamma_l$  y  $h_l$  son el peso volumétrico y la altura del lodo bentonítico, respectivamente.

### 3. Modelización numérica

#### 3.1 Caso de estudio y características del modelo numérico

El caso de estudio corresponde a una lumbrera diseñada con el método de lumbrera flotada. Ésta posee una sección circular de 21.4 m de diámetro y una profundidad de 23.1 m. Su muro pantalla tiene 1.5 m de espesor y 26.3 m de profundidad, es decir, se extiende 3.2 m por debajo de la base de la lumbrera excavada. Como lo requiere el procedimiento constructivo empleado, la excavación se mantiene inundada con un lodo bentonítico con peso volumétrico de  $10.5 \text{ kN/m}^3$  y una altura igual a la profundidad de la lumbrera.

Las condiciones geotécnicas del sitio corresponden a una estratigrafía típica del Valle de México, en donde secuencias de arcillas blandas de gran espesor, baja permeabilidad y con intercalaciones de lentes de arena fina, son interrumpidas por un estrato de arena y limo de

considerable espesor (2.1 m en este caso) y con un cierto grado de cementación (capa dura). Este estrato, de alta permeabilidad, actúa como un acuífero que brinda las condiciones para una posible falla por subpresión. La estratigrafía considerada puede observarse en la Figura 2. Se asume una condición hidrostática con una profundidad del nivel freático de 0.5 metros.

Para el análisis del caso de estudio, se construyó un modelo bidimensional (2D), axisimétrico, de elemento finito. La geometría, malla empleada y principales condiciones de contorno se muestran en la Figura 2a. El estado inicial de los esfuerzos se determinó en función del peso volumétrico de los materiales y el coeficiente de presión de las tierras en reposo  $K_0$ . Este último se estimó a partir de la fórmula de Mayne y Kulhawy (1982):

$$K_0 = (1 - \sin\Phi) \text{OCR}^{\sin\Phi} \quad (4)$$

donde  $\Phi$  es el ángulo de fricción del suelo y OCR es la relación de sobreconsolidación.

La simulación corresponde a un análisis a corto plazo, donde los materiales arcillosos se caracterizaron en términos de su resistencia no drenada. Esto se implementó mediante el uso del criterio de falla de Mohr-Coulomb, asumiendo  $\Phi = 0^\circ$  y  $c = C_u$ , donde  $c$  es la cohesión y  $C_u$  es la resistencia al corte no drenado. En otras palabras, los materiales arcillosos fueron caracterizados con un criterio de falla tipo Tresca. Los materiales arenosos, los cuales presentan cierta cementación, se caracterizaron en términos de  $\Phi$  y  $c$  mediante el criterio de Mohr-Coulomb. En ambos casos se asume un comportamiento elastoplástico perfecto. Los parámetros empleados se muestran en la Figura 2c.

La simulación del proceso constructivo se llevó a cabo en etapas, inicialmente incluyendo en el suelo el muro pantalla como un elemento viga, y posteriormente excavando la lumbrera en diferentes fases. En cada una de ellas, la presencia del lodo bentonítico se incluyó aplicando una presión normal a las paredes y la base de la excavación, de acuerdo con la profundidad alcanzada en cada fase (Figura 2b).

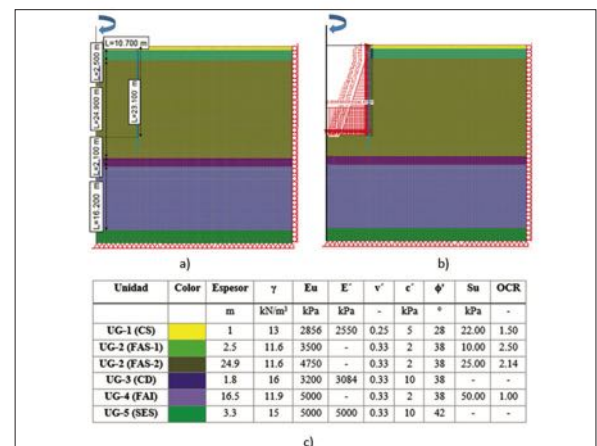


Figura 2. Modelo de elemento finito del caso de estudio. a) condición inicial, b) al finalizar la excavación y c) parámetros empleados.

### 3.2 Simulación numérica de la falla por subpresión

Al final de la última fase de excavación, el problema de contorno es aún estable, y la simulación fue capaz de encontrar una condición de equilibrio. Por lo tanto, para estimar un factor de seguridad numéricamente, se contemplan tres procedimientos de modelización para inducir la falla por subpresión: (1) el método de reducción de parámetros, (2) la presurización del estrato permeable y (3) la reducción de la altura del lodo bentonítico. La aplicación de estos procedimientos se describe a continuación. Los resultados obtenidos se comparan con el factor de seguridad determinado en la ecuación (3), que fue de 1.21.

#### 3.2.1 Método de reducción de parámetros

El primer procedimiento corresponde al método de reducción de parámetros (Griffiths and Lane 1999). En él, los parámetros de resistencia se reducen iterativamente, mediante un factor de reducción de resistencia global, hasta alcanzar la condición de falla (generalmente indicada por la no convergencia del código). El inverso del factor de reducción se interpreta como un factor de seguridad, es decir, representa el cociente entre los parámetros reales y los necesarios para inducir la falla. Este método es el más extendido en análisis de estabilidad de problemas geotécnicos mediante el método de elementos finitos y generalmente se encuentra implementado en los principales programas de cálculo (Itasca Consulting Group Inc 2016).

El mecanismo de falla obtenido mediante este procedimiento, sin contemplar el efecto del peso del muro, se muestra en la Figura 3 en términos de los desplazamientos totales incrementales de la última iteración. Es evidente que el mecanismo obtenido no corresponde a la falla por subpresión, sino que se asemeja más a un mecanismo de falla de fondo por cortante. El factor de seguridad obtenido para esta condición es de 27.13, muy superior al obtenido con la expresión analítica.

La gran diferencia encontrada entre los factores de seguridad puede explicarse a partir de las componentes que contribuyen a la estabilidad de la falla por subpresión (Eq. 3). En los casos en que la resistencia del suelo es el factor principal que contribuye a la estabilidad y, en estos casos, el método de reducción de parámetros brinda resultados adecuados. Sin embargo,

en el caso de la falla por subpresión, también existe un aporte considerable del peso del suelo debajo de la excavación; y, en el caso de la lumbrera flotada, del lodo bentonítico. Por lo tanto, el método de reducción de parámetros sólo afecta a una de las componentes del numerador en la Eq. (3). Esto hace que se requiera una reducción muy grande de la resistencia no drenada para inducir la condición de falla, lo que deriva en un factor de seguridad demasiado alto que no se relaciona con la falla por subpresión.

#### 3.2.2 Presurización del estrato permeable.

Para representar adecuadamente la falla por subpresión, mediante el método de reducción de parámetros, sería necesario aplicar el factor de reducción a todas las componentes que aportan a la estabilidad del sistema; i.e. reducir también, simultáneamente a la reducción de la resistencia, el peso del suelo y el peso del lodo bentonítico. Lo anterior es complicado de aplicar en programas convencionales de cálculo y podría derivar en inconsistencias, en especial si la relación constitutiva empleada considera una dependencia con el estado de esfuerzos. Por otro lado, es más práctico afectar las componentes que contribuyen a la inestabilidad del sistema que, en el caso de la falla de fondo por subpresión, únicamente a la presión de agua en el estrato permeable (ver Eq. 3). Esto puede hacerse incrementando, de forma independiente al resto de la estratigrafía, la presión del agua en el estrato permeable, i.e. incrementando su carga hidráulica. En este caso se puede definir al factor de seguridad como el cociente entre la presión de agua necesaria para inducir la falla y la presión real.

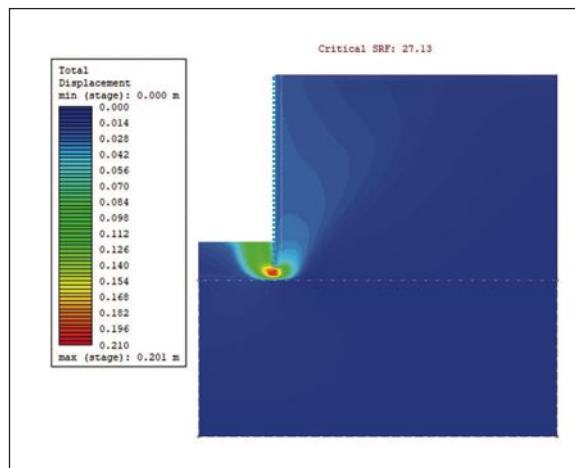


Figura 3. Mecanismo de falla para el método de reducción de parámetros en términos de los desplazamientos totales incrementales de la última iteración.

Figura 4. Mecanismo de falla para la presurización del estrato permeable en términos de los desplazamientos totales incrementales de la última iteración.

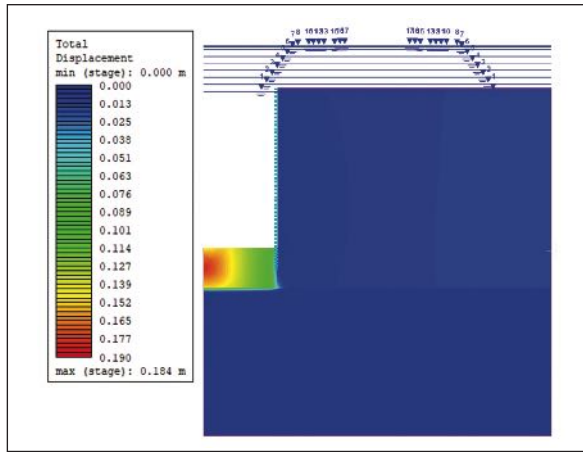
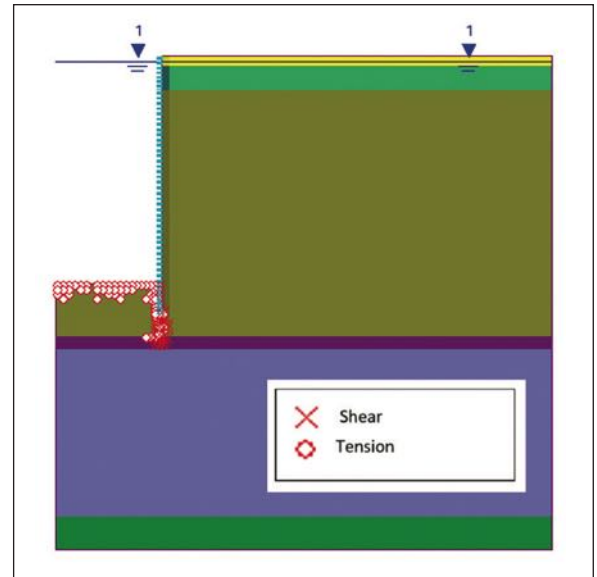


Figura 5. Puntos en fluencia al no lograr la convergencia para el caso donde se reduce la altura del lodo bentonítico.



La Figura 4 muestra el mecanismo de falla para este procedimiento. Se puede observar que el mecanismo es compatible con la falla por subpresión, donde el cilindro de suelo comprendido entre el fondo de la excavación y el estrato permeable tiende a levantarse. El factor de seguridad obtenido es de 1.22, i.e. prácticamente igual al valor de 1.21 calculado con la Eq. (3). Por lo tanto, este análisis representa una condición análoga a la representada por la ecuación analítica. Al afectar a todas las componentes que contribuyen a la inestabilidad del problema (en este caso la presión de agua en el estrato permeable), es posible derivar un factor de seguridad compatible con el mecanismo de falla por subpresión. Estos resultados generan confianza para la aplicación de este procedimiento en casos donde la Eq. (3) no es aplicable, e.g. al emplear una descripción constitutiva más compleja de los materiales en lugar de un valor único de la resistencia no drenada.

### 3.2.3 Disminución de la carga del lodo.

Finalmente, otra alternativa para generar la inestabilidad del sistema es la reducción de la altura del lodo. Ésta se disminuye gradualmente, manteniendo su densidad constante, hasta que se alcanza la condición de falla. En este caso, el factor de seguridad se define como el cociente entre la altura del lodo real y la necesaria para alcanzar la falla.

Este procedimiento de modelización induce a esfuerzos de tensión en los elementos del suelo en el fondo de la excavación, provocando su rápida fluencia en el cálculo. La Figura 5 indica los puntos que alcanzaron la plastificación debido a esta condición. La

reducción de la altura del lodo es de 3.3 m antes de que la convergencia no sea posible, derivando en un factor de seguridad de 1.16; un valor menor al obtenido en la ecuación analítica. En este procedimiento persiste el problema de que no todas las variables que contribuyen a la estabilidad del sistema están siendo reducidas y, por lo tanto, el factor de seguridad tampoco tiene relación con la presencia de la falla por subpresión. El mecanismo de falla no se identifica como una gran movilización de material, y más bien resulta en una inestabilidad local en el fondo de la excavación. Esto sugiere que la reducción del lodo puede causar una falla local, antes de que el mecanismo de falla por subpresión pueda desarrollarse.

Aunque el factor de seguridad calculado con este procedimiento no representa específicamente la falla por subpresión, la inestabilidad local identificada podría presentarse en los casos donde realmente se presente una reducción del lodo bentonítico durante la construcción. Esta situación puede ocurrir, e.g. en los procesos de evaporación durante suspensiones temporales de la construcción, filtraciones, fracturamiento hidráulico o presencia de cavidades. Por lo tanto, este procedimiento podría introducirse como una revisión adicional, una vez cumplidos los requerimientos de los otros posibles mecanismos de falla, para identificar los rangos en los que una disminución excesiva de la altura del lodo pueda generar una inestabilidad, que conduzca a deformaciones (expansión) excesivas del fondo de la excavación.

«La presurización del estrato permeable derivó en un mecanismo congruente con la falla por subpresión y en un factor de seguridad prácticamente igual al obtenido mediante la ecuación analítica. Por lo tanto, se determinó como el procedimiento más adecuado para evaluar numéricamente la condición de falla no drenada por subpresión. Esto tiene gran relevancia en la práctica profesional, ya que se puede usar para validar cálculos empleando las expresiones analíticas convencionales, o para evaluar situaciones que estén fuera del rango de aplicabilidad de dichas expresiones.»

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se evalúan diferentes procedimientos de modelización para la simulación de la falla de fondo por subpresión.

Debido a que sólo afecta a una componente que contribuye a la estabilidad del sistema, el método de reducción de parámetros no deriva en un mecanismo de falla por subpresión y tiende a sobreestimar considerablemente el factor de seguridad.

La presurización del estrato permeable derivó en un mecanismo congruente con la falla por subpresión y en un factor de seguridad prácticamente igual al obtenido mediante la ecuación analítica. Por lo tanto, se determinó como el procedimiento más adecuado para evaluar numéricamente la condición de falla no drenada por subpresión. Esto tiene gran relevancia en la práctica profesional, ya que se puede emplear para validar cálculos usando las expresiones analíticas convencionales, o para evaluar situaciones que estén fuera del rango de aplicabilidad de dichas expresiones.

Finalmente, la reducción de la altura del lodo bentonítico tampoco representó adecuadamente el mecanismo de falla por subpresión. Sin embargo, se identificó una inestabilidad local, con factores de seguridad menores a los correspondientes a la falla por subpresión, que podría derivar en expansiones excesivas del fondo de la excavación. Esta condición se presentaría en casos donde realmente exista una disminución considerable en la altura del lodo bentonítico durante la construcción de la lumbrera. Esto podría sugerir la necesidad de una revisión adicional a la estabilidad de la lumbrera, que determinaría los rangos en los que habría que mantener la altura de lodo para evitar excesivas deformaciones del fondo.

#### Referencias

- Auvinet Guichard, G., Rodríguez Rebolledo, J. F., & Rangel Núñez, J. L. (2010). "Construction of deep tunnel shafts in Mexico city soft clays by the flotation method." *Acta Geotechnica*, 5(1), 63-68.
- CFE, and II-UNAM. (2017). "Túneles y lumbreras en suelos." *Manual de diseño de obras civiles*, México, D. F., 191.
- Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). "Slope stability analysis by finite elements." *Geotechnique*, 49(3), 387-403.
- Itasca Consulting Group Inc. (2016). "Factor of Safety." *User's Guide*, Minneapolis. USA, 1-58.
- Montiel, E., Valenzuela, J. Carlos, Ossa, A., & Tlalonini, A. (2018). "Evaluación numérica de falla por sub-presión en lumbreras construidas en suelos." *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. León, Guanajuato, 8.
- Moreno-Fernández, A. (1991). "Lumbreras y túneles en suelos, experiencias innovadoras en la ingeniería mexicana, trabajo de ingreso a la Academia Mexicana de Ingeniería."
- Puller, M. (2003). *Deep Excavations, a practical manual*. Thomas Telford Ltd, London.
- Valenzuela Meza, J. C., Montiel, E., & Ossa, A. (2019). "Análisis numérico y analítico de la falla por sub-presión en lumbreras construidas en suelos." *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 1330-1337.
- Vargas, C., Guillén, J., Bernal, R., & Luna, O. (2019). "Geotechnical Analysis and Design of Tunnel Shafts in Difficult Soft Soil Conditions at Mexico City." *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 0, 1379-1391.

