

Análisis numérico y analítico de la falla por sub-presión en lumbreras construidas en suelos

Juan Carlos VALENZUELA^{a,1}, Edgar MONTIEL^{b,c} y Alexandra OSSA^{a,b}

^a*Instituto de Ingeniería, UNAM*

^b*UNAM/Posgrado de Ingeniería/Maestría en Obras Subterráneas*

^c*Geocontrol Chile, S.A.*

Resumen. Dentro de los mecanismos de falla que se estudian y reportan en la literatura concerniente a la construcción de lumbreras en suelos, la falla por subpresión cuenta con pocos ejemplos reportados. Su evaluación, tanto analítica como numérica; se ha enfocado a determinar acciones preventivas al desarrollo de la misma, dejando de lado su simulación, condición que da origen al documento. Con la finalidad de solventar esta necesidad, en el presente documento se realiza un análisis de sensibilidad de las variables de la ecuación analítica del factor de seguridad para esta falla y la evaluación numérica de las variables a través de una modelización en una configuración axisimétrica.

Palabras Clave. Falla, subpresión, lumbrera, modelización.

1. Introducción

En el caso de lumbreras construidas en suelos, es común considerar en los análisis la estabilidad de las paredes y el fondo de la excavación, basándose en la mecánica que han seguido las fallas reportadas y apoyándose en la respuesta de análisis en medios continuos.

Dentro del análisis de estabilidad de fondo, al existir a cierta profundidad un estrato de suelo con diferentes características geotécnicas; su comportamiento hidráulico es determinante, pues este puede inducir subpresión en el fondo.

Para estudiar los efectos de la subpresión y las variables que intervienen en esta, en el documento se presenta una serie de análisis realizados a una lumbrera en una estratigrafía de suelos arcillosos intercalados por un estrato arenoso, el cual, al presentar una condición hidrogeológica de acuífero confinado puede inducir la falla por subpresión.

2. Subpresión y falla de fondo en lumbreras construidas en suelos

Dentro de las fallas que acontecen en la construcción de una lumbrera, las de mayor relevancia, son las fallas de fondo y de subpresión, basándose en el avance de la obra y la labor de reacondicionamiento. Técnicas como la de Cravioto [1] y anillos

¹ Juan Carlos Valenzuela, Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México. México; E-mail: JValenzuelaM@iingen.unam.mx.

prefabricados, disminuyen en gran medida la probabilidad de falla de fondo, pues intentan compensar la fuerza ejercida por el material extraído, con lodo de densidad similar a la del suelo [2].

Por otro lado, en estas técnicas es común la implementación de un muro pantalla, con la finalidad de evitar fallas en las paredes de la excavación, sin embargo, esto aumenta la posibilidad de falla de fondo, dada la concentración de fuerzas que se puede generar en la base de la lumbrera [2-3].

El desarrollo de la falla de fondo se produce al existir un desequilibrio de fuerzas entre el interior y exterior de la lumbrera, actuando a la profundidad de desplante del muro pantalla; donde la carga externa excede la resistencia del suelo que se encuentra en el fondo de la excavación.

La profundidad de la superficie de falla dependerá tanto de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, como del espesor de los estratos que atraviesa. Si dentro de la geología del sitio existiera un estrato de mayor resistencia por debajo del fondo de la lumbrera o del muro pantalla, las dimensiones de dicha superficie de falla disminuirían [4]. Así, la distancia entre el fondo de la lumbrera y el estrato resistente se vuelve determinante sobre la estabilidad en el mecanismo de falla de fondo, pues si esta distancia es lo bastante corta, el radio de influencia de la superficie de falla no presentaría riesgo [3].

No obstante, de acuerdo con Auvinet [2], si la distancia entre el fondo de la lumbrera y el estrato resistente-permeable, es muy corta, la condición hidrogeológica del estrato será determinante en la estabilidad, debido a que se generarán fuerzas de subpresión en el fondo de la lumbrera cuando las presiones de poro en el estrato permeable sean hidrostáticas o incluso menores a las hidrostáticas por efecto de bombeo (en combinación con algún evento imprevisto que altere el equilibrio de fuerzas). El comportamiento antes descrito da origen a un mecanismo de falla, conocido como falla por subpresión.

Cabe mencionar que el contraste de resistencias es una condición un tanto subjetiva; pues la geometría de la lumbrera, las características geotécnicas e hidrogeológicas del sitio y el procedimiento de excavación; serán los responsables de establecer el grado de modificación de equilibrio que tenga el terreno al realizar la lumbrera. Es por ello, que la condición de sub-presión generada por el estrato permeable, debería de ser considerada como una acción dentro del marco de revisión de la estabilidad del fondo, en donde el uso de los métodos numéricos puede asumirla de la forma que se requiera, de acuerdo con el comportamiento hidrodinámico que presente cada estrato.

3. Análisis de sensibilidad de la ecuación analítica para la falla por subpresión

Para realizar el análisis de sensibilidad de la ecuación del factor de seguridad, F_s , y la simulación numérica de las variables que determinan la ocurrencia de esta falla, se empleó un caso de estudio correspondiente a una lumbrera cilíndrica construida por el método de lumbrera flotante, en una estratigrafía de arcillas intercaladas por un estrato de arena con mayor permeabilidad y una condición de presión hidrostática. Las dimensiones de la lumbrera son 23 m de profundidad y 20 m de diámetro; un muro pantalla de 1.5 m de espesor y 26 m de profundidad; un lodo estabilizador de peso volumétrico 10.5 kN/m^3 . La profundidad del estrato permeable es de 31 m.

3.1. Ecuación del factor de seguridad

Es posible determinar que la falla por subpresión acorde a la estratigrafía, planteada en el apartado 2, ocurre cuando en el sistema lumbrera-suelo las fuerzas resistentes son menores a las actuantes. Dentro de las fuerzas resistentes se encuentra: el peso del lodo estabilizador, el peso del suelo entre el fondo de la lumbrera y el estrato resistente permeable y la resistencia al corte no drenado en la superficie de falla; la fuerza actuante corresponde a la fuerza que ejerce el agua confinada en el estrato permeable o acuífero.

Empleando el equilibrio de fuerzas en el fondo del suelo entre la lumbrera y el estrato permeable es posible establecer un factor de seguridad, como el planteado en el manual de diseño de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en la sección de geotecnia, tema túneles y lumbreras en suelos [5], Ecs. (1) y (2).

$$F_S = \frac{\gamma_s h_s + \gamma_l h_l + C_u \eta}{\gamma_w h_w} \quad (1)$$

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

donde, γ_s = peso volumétrico del suelo en el fondo de la excavación, en kN/m^3 , h_s = altura del suelo impermeable, en m, η = factor de adherencia lumbrera-suelo, ec 2, adimensional, σ'_z = esfuerzo vertical efectivo a la profundidad media del suelo, en kPa , γ_w = peso volumétrico del agua, en kN/m^3 , h_w = profundidad del estrato permeable, C_u = resistencia al corte no drenado, γ_l = peso volumétrico del lodo, en kN/m^3 y h_l = altura del lodo, en m.

En la Ec. (1) el denominador se encuentra definido para una condición hidrostática, de no ser así, se debe modificar por la presión registrada en el estrato.

Dentro de las variables que intervienen en la Ec. (1), las que se pueden modificar en el proceso constructivo son, la altura y el peso volumétrico del lodo, las cuales se ven alteradas principalmente a causa de acontecimientos como: procesos de evaporación, filtración, no disponibilidad de suministros de insumos requeridos o cavidades presentes en el suelo. Las variables adicionales corresponden a valores que se determinan por la estratigrafía presente en el suelo y las dimensiones de la lumbrera.

3.2. Análisis de sensibilidad

Con la finalidad de evaluar la incidencia de cada una de las variables en el F_s se realizó un análisis de sensibilidad tomando como valores medios las condiciones del caso de estudio y asignando una distribución de probabilidad a cada una de estas variables de entrada acorde con las limitaciones constructivas o los valores típicos. Al evaluar los valores medios en la ecuación analítica se obtiene un F_s de 1.13.

El análisis considera dos condiciones: condición 1, existe una covarianza entre la profundidad del estrato permeable y su carga hidráulica (conferido a una situación hidrostática de forma particular) y condición 2, variación de carga hidráulica del estrato permeable independiente de la profundidad de este (condición abatida o artesiana).

Los resultados que se obtuvieron del análisis de sensibilidad se graficaron a través de diagramas de tornado para las dos condiciones respectivamente, Figura 1a y 1b, estos

diagramas presentan el valor mínimo y máximo de la variable de salida F_s (eje x), correspondiente a la variación máxima y mínima de la variable de entrada (eje y), tomando las demás variables como constantes y utilizando sus valores medios.

De los resultados obtenidos se observa que el espesor del suelo entre el fondo de la lumbrera y el estrato permeable juega un papel preponderante en la condición 2 y un papel de menor importancia en la condición 1, debido a que, de existir covarianza entre la carga hidráulica y la profundidad del estrato, tanto el denominador como el numerador del F_s crecen al aumentar la profundidad de este, logrando consigo que la modificación de esta variable no influya de manera significativa en el valor final de F_s .

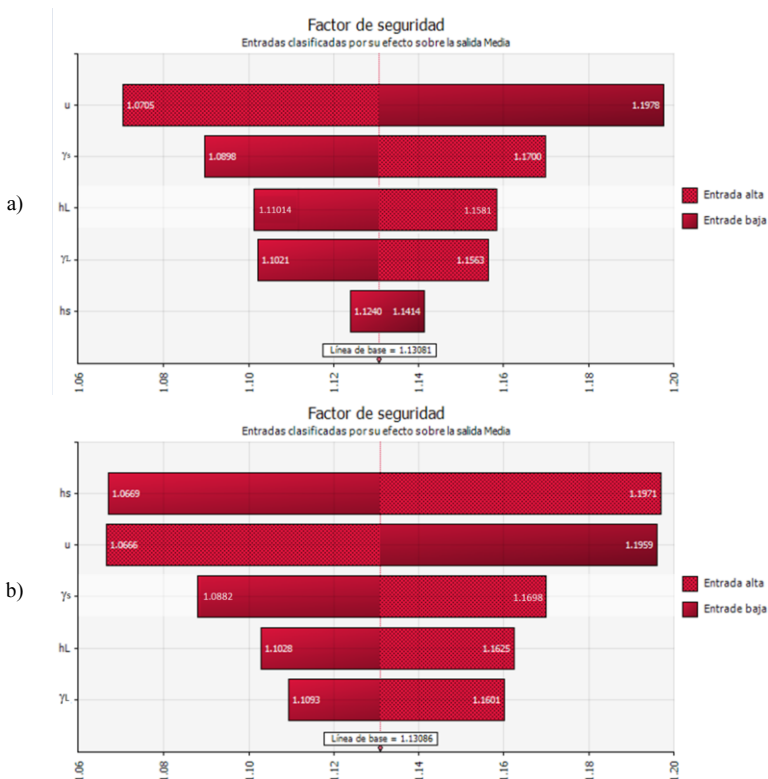


Figura 1. Resultados del análisis de sensibilidad, a) Condición 1, covarianza, b) Condición 2, comportamiento independiente.

De igual forma se observa que la influencia del peso volumétrico del lodo y la altura del mismo, presentan un comportamiento similar, siendo esto resultado del rango de probabilidad determinado para las variables. Esta similitud es de interés, ya que en análisis análogos de estabilidad de excavaciones la variación del peso del lodo con respecto a la altura del mismo presenta una repercusión mínima en el valor de F_s [6].

Cabe resaltar que la Ec. 1, como toda ecuación analítica permite evaluar un F_s preliminar de manera práctica y rápida, con lo cual, es posible realizar análisis de sensibilidad como el llevado a cabo, sin embargo, simplifica varias de las consideraciones a tener en cuenta en el análisis de falla por subpresión, para esto se recurre a los métodos numéricos los cuales ponen en consideración este tipo de condicionantes.

4. Simulación numérica

Para evaluar la incidencia de las principales variables analizadas en la ecuación analítica utilizando un modelado numérico se empleó los parámetros del caso de estudio y la condición de covarianza entre la profundidad del estrato permeable y su carga hidráulica, como resultado de que la condición de comportamiento independiente se ha descrito en un artículo precedente a este trabajo, titulado “Evaluación numérica de falla por subpresión en lumbreras construidas en suelos” [7].

Para la realización de los modelos se utilizó una condición de flujo transitorio desacoplado, debido a que se ignora la variación de la presión de poro por las deformaciones que presente el estrato permeable a causa de la modificación de los parámetros analizados.

El resultado obtenido de un análisis numérico bajo la condición hidrostática y los valores del caso de estudio dan como resultado que el modelo es estable (no falla), por lo que se evaluó la condición de estabilidad modificando las variables en un rango acorde al realizado en la ecuación analítica, manteniendo los demás parámetros constantes.

4.1. Variación del peso volumétrico de lodo

Para este análisis se partió de un comportamiento hidrostático, variando el peso volumétrico del lodo con un valor inicial de 11.0 kN/m^3 (Basado en el valor usual máximo alcanzados por un lodo a base de bentonita [8]) y reduciendo este valor hasta que el modelo falle, los resultados de desplazamiento del modelo con peso volumétrico inicial y antes de la falla se presentan en la Figura 2. En los resultados se observa que la falla se produce para un peso volumétrico de 9.55 kN/m^3 , que es menor al peso del agua, concluyendo que de mantener la altura del lodo constante e igual a la profundidad de la lumbrera la variación del peso volumétrico del lodo no produciría la falla y para su ocurrencia es necesario la variación de la altura.

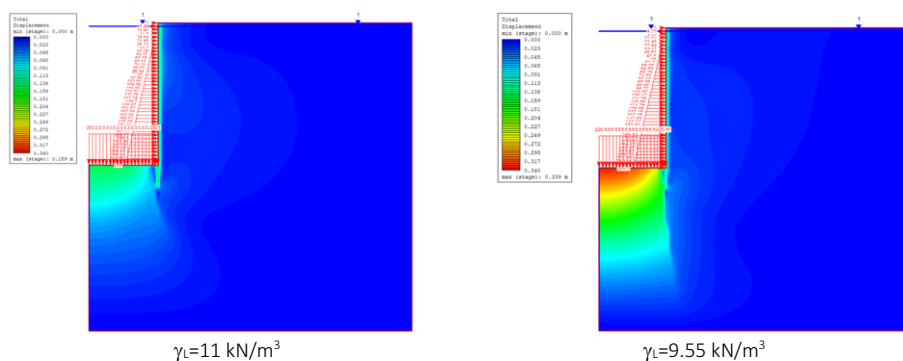


Figura 2. Desplazamientos totales del modelo axisimétrico para distinto peso volumétrico de lodo.

Al comparar el valor del peso volumétrico que se obtiene de la simulación con el valor del peso mínimo requerido en la ecuación analítica para que ocurra la falla, se encuentra que el peso volumétrico de la ecuación presenta valores conservadores.

4.2. Variación de la altura del lodo

Para el análisis se parte de un comportamiento hidrostático y se varia la altura del lodo, iniciando con 23 m y reduciendo hasta una altura en la que ocurra la falla el peso volumétrico de lodo es constante e igual a 10.5 kN/m^3 . Los resultados de desplazamiento del modelo con la altura inicial y mínima antes de la falla se presentan en la Figura 3.

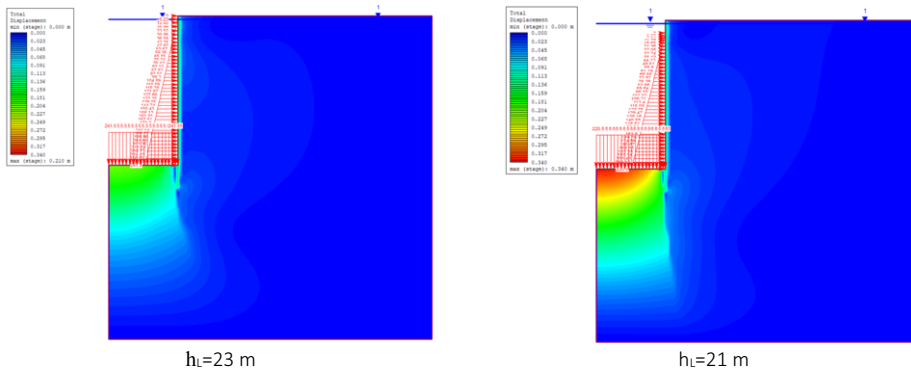


Figura 3. Desplazamientos totales del modelo axisimétrico para distinta altura de lodo.

En los resultados se observa que la falla ocurre a una altura de 21 m, para la cual con un peso volumétrico del lodo de 10.5 kN/m^3 se genera una presión en el fondo de la lumbrera de 220.5 kPa, siendo este valor igual al que se encuentra en el apartado anterior de variación del peso volumétrico para la condición previa a la falla. Se concluye que bajo esta configuración el factor determinante para la ocurrencia de la falla es la presión en el fondo de la lumbrera sin importar que este se produzca por un cambio en el peso volumétrico o en la altura del lodo, esto como resultado de la presencia del *liner* que evita las deformaciones horizontales en las paredes y la parte superior de la lumbrera, condicionante de mayor importancia en el análisis de la variación de la altura.

Al comparar el valor de la altura mínima que se obtiene de la simulación numérica con el valor de la altura mínima requerida en la ecuación analítica para alcanzar la falla, se observa que la altura de la simulación es menor a la que permite la analítica.

4.3. Variación del espesor del estrato permeable y la presencia de un liner

Existen variables que no se contemplan dentro del análisis de la ecuación analítica de la falla por subpresión, por lo cual, se evaluó su influencia en la ocurrencia de esta falla a través de la modelización numérica, dentro de estas variables se encuentra el espesor del estrato permeable y la profundidad del muro pantalla (*liner*).

Para evaluar el espesor del estrato permeable se modelizó un aumento de 4 veces el espesor de este, manteniendo su límite superior. Posteriormente el estrato se presurizó acorde a lo planteado en el trabajo precedente [7] para simular la falla por subpresión, la carga hidráulica empleada corresponde a 6.5 m sobre el nivel freático, Figura 4.

En los resultados se encontró que la carga hidráulica en el estrato permeable para la ocurrencia de la falla es independiente del espesor de dicho estrato, concluyendo que bajo este análisis el factor decisivo para la falla es la presión registrada en la parte superior del estrato.

A pesar de que no se encontró algún cambio al variar el espesor, se esperaría que, en un análisis más riguroso, con simulación acoplada ocurra una variación en los resultados, debido a que el aumento del espesor del estrato puede propiciar una disminución de presión de poro al aumentar las deformaciones en su interior y los estratos suprayacentes.

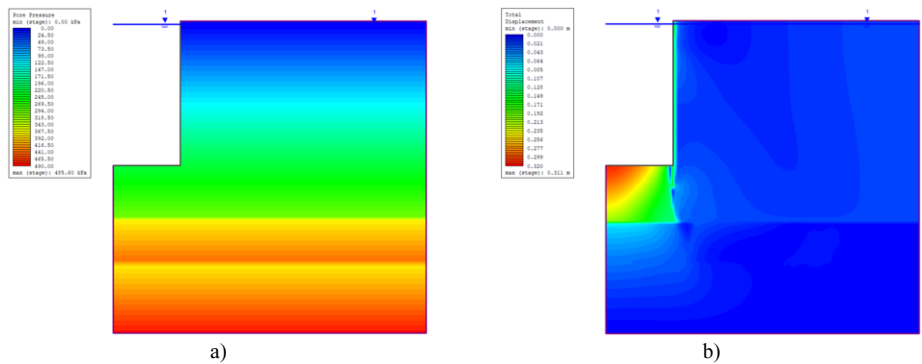


Figura 4. a) Distribución de presión de poro en modelo con espesor del estrato 4 veces el inicial, b) desplazamientos obtenidos bajo la configuración y la presurización del estrato.

Para evaluar la influencia de la profundidad del *liner* se modeló dos condiciones con una presurización en el estrato permeable, en las cuales se varió ± 2 m con respecto a la profundidad de desplante del *liner* propuesto en la condición inicial (26 m), los resultados que se encontraron se presentan en la Figura 5. De estos resultados se observa que para una misma configuración al disminuir la profundidad del *liner* las deformaciones se incrementan, por lo cual se requiere menor carga hidráulica para propiciar la falla por subpresión. Esto refleja que al disminuir la profundidad del *liner* el sistema es más vulnerable a la presencia de la falla por subpresión.

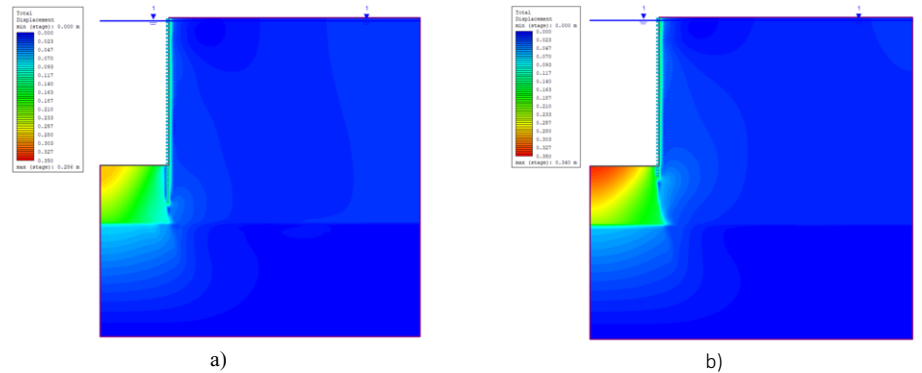


Figura 5. Desplazamientos obtenidos a) *liner* 28 m, b) *liner* a 24 m.

5. Conclusiones

En este documento se presenta un análisis de sensibilidad a la ecuación analítica del Factor de seguridad, F_s , de la falla por subpresión, en el cual se evaluó la influencia de

cada una de las variables que intervienen en esta, encontrando que para una configuración hidrostática (covarianza) la variable con mayor repercusión en el valor del F_s es la presión de poro y la variable de menor repercusión es el espesor del estrato entre el fondo y el estrato permeable.

Del análisis de sensibilidad se resalta que la influencia del peso volumétrico del lodo y de la altura de este sobre el factor de seguridad es similar, bajo el rango típico en el que se encuentran estos parámetros.

De la modelización de la falla de fondo por subpresión de una lumbrera en una estratigrafía de un estrato resistente y permeable que subyace una serie de capas arcillosas, se determina que para propiciar la falla la variación de la altura del lodo es la variable a modificar para la condición hidrostática, ya que no se ve limitada por un rango de valores como el peso volumétrico del lodo. Adicionalmente se observa que para la condición de abatimiento o artesianismo del estrato permeable es adecuada la modificación de la carga hidráulica de dicho estrato.

Ponderando los resultados numéricos respecto a los analíticos, se concluye que el impacto de las variables en la ecuación analítica es conservador respecto a la modelización, esto debido a la incidencia de las propiedades del muro impermeable (*liner*), dicha situación muestra que la no consideración del muro resulta perjudicial a la hora de tomar decisiones respecto a la estabilidad, pues genera una situación de “máxima seguridad” resultando en sobreestimaciones respecto al modelo numérico.

Cabe aclarar que no se cuenta con ejemplos de falla de este tipo, por lo que una validación respecto a la realidad física del problema crea un sesgo de confirmación, siendo necesaria la realización de modelos físicos que puedan mostrar las peculiaridades de esta falla.

Se evaluó la influencia de variables no contempladas dentro de la ecuación analítica a través de modelos numéricos como la profundidad del muro pantalla (*liner*) y el espesor del estrato permeable; para la profundidad del muro se encontró que esta influye en el valor de las deformaciones que se producen en el modelo y por consiguiente en la posibilidad de falla por subpresión, para el espesor del estrato permeable se encontró que este no presente influencia en la falla bajo las condiciones del modelo.

Adicionalmente se recomienda realizar el análisis de forma acoplada, a fin de evaluar si la deformación del estrato permeable puede reducir sustancialmente la presión en la base y la influencia del espesor del estrato permeable.

Referencias

- [1] Moreno-Fernández A.(1991). “Lumbreras y túneles en suelos. Experiencias innovadoras en la ingeniería mexicana.”, *trabajo de ingreso a la Academia Mexicana de Ingeniería*.
- [2] Auvinet G. & Rodríguez J. F.(2011). “Analysis , design , construction and behaviour of underground structures,” *2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference*.
- [3] Zemva S.(2011). “Diseño y Construcción de lumbreras en suelos blandos por el procedimiento de anillos prefabricados,” *Tesis Maestría Programa estudios posgrado en ingeniería. UNAM*, p. 157.
- [4] Tamez E.(2001). Ingeniería de Cimentaciones-Conceptos Básicos de la práctica. Mexico DF.
- [5] Comisión Federal de Electricidad (CFE) & Instituto de Ingeniería-UNAM. (2017). “Manual de Diseño de Obras Civiles” Ciudad de México, p. 191.
- [6] Paniagua W. & Hernandez C.(2014). “Análisis de la estabilidad de perforación para pilas,” *Memorias XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Puerto Vallarta, pp. 1–6.
- [7] Montiel E. Valenzuela J. C. & Ossa A.(2018). “Evaluación numérica de falla por subpresión en lumbreras construidas en suelos,” *XXIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, León.
- [8] Paniagua W. (2002) Manual de construcción geotécnica. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos SMMS. México D. F