

Estabilidad por falla de fondo en excavaciones circulares con muros diafragma en arcillas sobreconsolidadas: análisis paramétrico y método simplificado

Base Heave Stability in Circular Excavations with Diaphragm Walls in Overconsolidated Clays: Parametric Analysis and Simplified Method

 Jorge Arturo Pineda-Jaimes;  Sherley Catheryne Larrañaga-Rubio²

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia

²DICEÍN S.A.S, Bogotá-Colombia

Correspondencia: japinedaj@udistrital.edu.co

Recibido: 19 Agosto 2024

Aceptado: 06 Marzo 2025

Disponible: 10 Abril 2025

Cómo citar / How to cite

J. A. Pineda-Jaimes, and S. C. Larrañaga-Rubio, "Estabilidad por falla de fondo en excavaciones circulares con muros diafragma en arcillas sobreconsolidadas: análisis paramétrico y método simplificado," *Tecnológicas*, vol. 28, no. 62, e3203, 2025. <https://doi.org/10.22430/22565337.3203>



Resumen

Recientemente se han implementado métodos sin zanja (trench-less) en obras de saneamiento en Bogotá, Colombia para instalar colectores de más de 3 m de diámetro. Estos emplean pozos circulares profundos sostenidos por muros diafragma fundidos in situ, junto con anillos de concreto, para lanzar y recibir equipos de tunelación. Las condiciones axisimétricas exigen definir con precisión el empotramiento de los muros y verificar la estabilidad ante falla de fondo en arcillas sobreconsolidadas. Esta investigación tuvo como objetivo realizar una evaluación del factor de seguridad frente a la falla de fondo mediante un análisis paramétrico para proponer un método simplificado de evaluación. La metodología empleada consistió en la realización de simulaciones numéricas con elementos finitos, considerando variaciones en el diámetro de la excavación, su altura libre, y la profundidad de empotramiento de los muros diafragma en un perfil de arcillas del suroccidente de Bogotá caracterizado a partir de un sondeo de piezocono con medición de poros (CPTU, por sus siglas en inglés). Los resultados indicaron que el factor de seguridad depende principalmente de las propiedades geométricas de la excavación, de la profundidad de empotramiento del sistema de contención y de la resistencia no drenada de la arcilla bajo el fondo de la excavación. Finalmente, con base en los hallazgos de la modelación paramétrica, se concluye que el efecto de la sobreconsolidación superficial en el factor de seguridad puede expresarse en una ecuación semiempírica incorporando de un coeficiente de ajuste (α), siendo este efecto más significativo en excavaciones de diámetro reducido. Estos resultados permiten mejorar la evaluación de la estabilidad de excavaciones y optimizar estrategias constructivas, favoreciendo soluciones más seguras, sostenibles y resilientes en el diseño de obras subterráneas.

Palabras clave

Arcillas sobreconsolidadas, excavaciones circulares, falla de fondo, factor de seguridad, muros diafragma.

Abstract

Trenchless methods have recently been implemented in Bogotá's sanitation works to install collectors over 3 m in diameter. These use deep circular shafts supported by cast-in-place diaphragm walls and concrete rings for launching and receiving tunneling equipment. Axisymmetric conditions require precise determination of wall embedment depth and verification of bottom failure stability in superficially overconsolidated clays. This article evaluates the safety factor against base heave failure through parametric analysis and proposes a simplified evaluation method. The methodology consisted of performing numerical simulations using finite elements, considering variations in the excavation diameter, its free height, and the embedment depth of the diaphragm walls in a clay profile from southwestern Bogotá, characterized on the basis of an in-situ CPTU test. The results indicated that the safety factor depends mainly on the geometric properties of the excavation, the depth of the embedment of the containment system, and the undrained shear strength of the clay beneath the bottom of the excavation. Finally, based on the results of parametric modeling, it is concluded that the effect of the surficial overconsolidation on the safety factor can be expressed in a semi-empirical equation through an adjustment coefficient (α), being more significant in excavations with a reduced diameter. These results contribute to improving the evaluation of excavation stability and optimizing construction strategies, promoting safer, more sustainable, and more resilient solutions in the design of underground works.

Keywords

Overconsolidated clays, circular excavations, bottom failure, safety factor, diaphragm walls.

1. INTRODUCCIÓN

Los túneles de baja cobertura para alojar colectores de alcantarillado construidos mediante métodos sin zanja (trenchless) en zonas urbanas suelen requerir la construcción de pozos profundos soportados por muros diafragma para facilitar el lanzamiento y recepción de las máquinas tuneladoras en los tramos a intervenir. En las últimas dos décadas, estos métodos se han utilizado ampliamente en varios megaproyectos de saneamiento vinculados al tratamiento ambiental del río Bogotá, especialmente en la zona suroccidental de la capital colombiana. Estos pozos profundos pueden tener geometría rectangular, cuadrada o circular en planta. Los pozos circulares están ganando popularidad, ya que pueden construirse sin necesidad de puntales internos, minimizan el desplazamiento del terreno en la superficie durante la excavación y, gracias a su geometría, los empujes laterales se reducen por el efecto de arco [1]-[5].

La mayoría de los estudios asociados al desempeño de excavaciones apuntaladas con muros diafragma en arcillas han analizado las deformaciones en superficie; el desarrollo de deformaciones en las estructuras de contención [4]-[9]; aspectos asociados a las acciones y reacciones de la interacción suelo-estructura; los efectos de la rigidez relativa del sistema de contención en el desarrollo de las deformaciones [3], [4], [7]; los análisis por falla de fondo deterministas y probabilistas; y la amenaza causada por las deformaciones en superficie sobre estructuras en entornos urbanos [10]-[15] como aspectos relevantes en el contexto de excavaciones muy largas con respecto a su ancho de base o rectangulares ($0 < B/L < 1$). Es ampliamente aceptado que tanto las deformaciones en superficie alrededor de las excavaciones en arcilla, como el factor de seguridad por falla de fondo, dependen de la geometría en planta, la resistencia no drenada y la rigidez a pequeñas deformaciones del suelo, la secuencia constructiva y su relación con la instalación de apuntalamientos, la profundidad de un estrato rígido con relación a la altura de la excavación y las relaciones (B/L), y (H/B), principalmente [3], [4], [7], [8], [12], [15]-[21].

Sin embargo, la estabilidad ante falla de fondo en excavaciones circulares en arcillas sobreconsolidadas ha sido escasamente abordada en la literatura. La mayoría de las investigaciones existentes se centran en excavaciones rectangulares o alargadas, lo que limita la aplicabilidad directa de sus resultados a estructuras de geometría axisimétrica. Estudios previos [1]-[4] han analizado las condiciones de estabilidad en arcillas normalmente consolidadas, sin abordar de manera específica la influencia de la sobreconsolidación superficial, una característica distintiva de los suelos lacustres de la Sabana de Bogotá. Además,

el uso de fórmulas empíricas desarrolladas para otras condiciones geotécnicas puede derivar en diseños subestimados o sobrestimados en el contexto local.

En este estudio, se realizaron análisis numéricos para evaluar, de manera paramétrica, la estabilidad ante falla de fondo en excavaciones circulares con muros diafragma. Para ello, se empleó la técnica de los elementos finitos mediante el software PLAXIS® y análisis de estabilidad por equilibrio límite con el programa SLIDE®. Con base en los resultados obtenidos se propone un método simplificado para la evaluación del factor de seguridad frente a la falla de fondo en excavaciones circulares sostenidas por muros diafragma en un perfil de arcillas del suroccidente de Bogotá.

2. METODOLOGÍA

2.1 Modelo numérico

La Figura 1 presenta esquemáticamente el modelo de análisis bidimensional de una excavación circular en planta, considerando un perfil de arcillas sobreconsolidadas en superficie y normalmente consolidadas en profundidad.

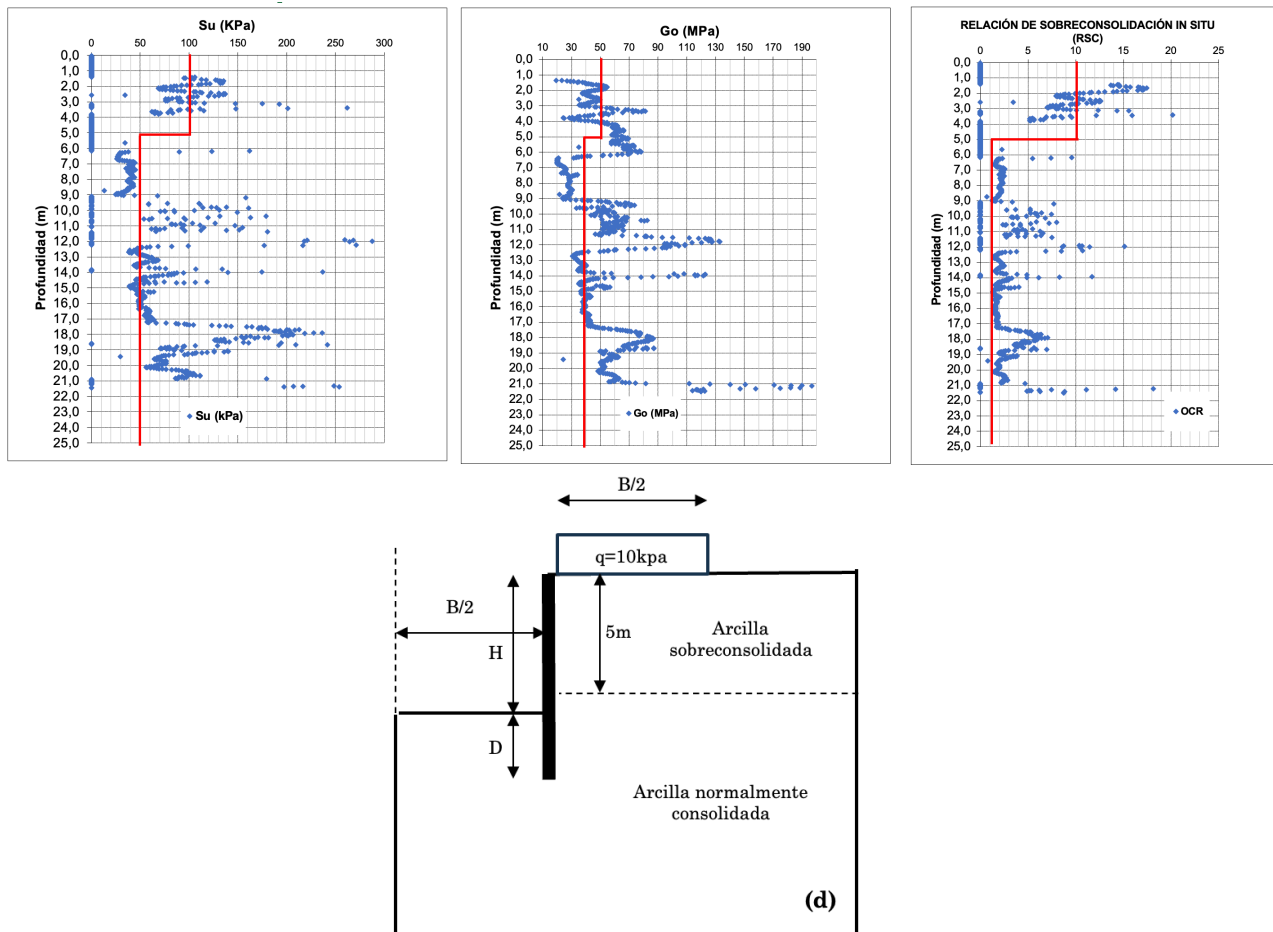


Figura 1. Perfil de análisis geotécnico para una arcilla sobreconsolidada superficialmente del suroeste de Bogotá, D.C. a partir del ensayo de penetración con cono con medición de presión de poros (CPTU, por sus siglas en inglés) y condiciones de frontera del problema.

Fuente: elaboración propia.

Este modelo se ajustó a partir de los datos obtenidos en un ensayo de penetración con cono con medición de presión de poros (CPTU), el cual permitió estimar la resistencia no drenada (S_u) y la relación de sobreconsolidación (OCR, por sus siglas en inglés) del suelo. Las unidades de medida corresponden a las del sistema internacional.

Para caracterizar el comportamiento mecánico de las arcillas en condiciones no drenadas se empleó la ley de falla de Mohr-Coulomb y un modelo constitutivo lineal-elástico en el intervalo de pequeñas deformaciones. Se analizaron excavaciones axisimétricas de diámetro [B], soportadas por muros diafragma de concreto de 0.60 m de espesor con una rigidez flexional (EI) de 6×10^6 kN/m². Como condición de carga superficial se consideró una sobrecarga distribuida de 10 kPa, extendida hasta [B/2] desde el paramento del muro, y una capa de arcilla sobreconsolidada de 5 m de espesor, conforme a lo ilustrado en las Figuras 1(a), (b) y (c).

Dado que la excavación es axisimétrica, el modelo numérico solo incluyó la mitad de la sección transversal para el análisis. El muro diafragma se representó mediante elementos de viga de 4 nodos, mientras que los nodos a lo largo de los límites laterales de la malla generada fueron restringidos para evitar desplazamientos horizontales. De igual manera, los nodos en la base del modelo fueron restringidos para impedir movimientos verticales. El muro diafragma se empotró 4 m bajo el nivel de excavación, profundidad que ha sido empleada de manera empírica en proyectos reales en la Sabana de Bogotá.

La simulación numérica se desarrolló en el programa PLAXIS, utilizando el método de reducción de la resistencia al corte para evaluar la estabilidad de la excavación durante la construcción. La secuencia constructiva comprendió los siguientes pasos: (1) instalación del muro diafragma pre-excavado y fundido in situ, (2) excavación en intervalos de hasta 3 metros de profundidad hasta alcanzar la profundidad final (H), y (3) construcción de la placa de fondo. Finalmente, los factores de seguridad obtenidos se compararon con valores reportados en la literatura [1]-[3], [15], [22], [23], permitiendo validar el procedimiento empleado.

El método de reducción de la resistencia al corte consiste en reducir progresivamente la resistencia al corte del suelo hasta que el muro diafragma esté al borde de la falla global, una vez se encuentre la excavación en la etapa 2. El factor recíproco de reducción, F, se identifica como el factor de seguridad. El procedimiento iterativo para determinar el factor de seguridad comienza asignando $F_i = F_0 = 1$, luego, F_i se incrementa por ΔF , generalmente 0.2. Con el nuevo F, para un material de Mohr-Coulomb, se reducen la cohesión (c) y la tangente del ángulo de fricción ($\tan \phi$) mediante (1) y (2):

$$\tan(\phi_{i+1}) = \frac{\tan(\phi_i)}{F_{i+1}} \quad (1)$$

$$c_{i+1} = \frac{c}{F_{i+1}} \quad (2)$$

Utilizando los parámetros de resistencia reducidos, el método busca un nuevo equilibrio mediante un análisis elasto-plástico con elementos finitos (FE). Si se encuentra un nuevo equilibrio se incrementa el factor de reducción F y se busca de nuevo el equilibrio con parámetros de resistencia reducidos. Este proceso se repite hasta que F permanezca constante con deformaciones continuas, dentro de un número especificado de iteraciones, que en este estudio alcanzaron 120. El método se detalla en los trabajos de [1], [2], [23], [24]. El valor crítico de reducción de resistencia se considera como el factor de seguridad FSf para la falla de fondo de la excavación circular. La Figura 2 y la Figura 3 muestran los resultados de un análisis típico de reducción de resistencia al corte para calcular el FSf. El límite vertical derecho del modelo se extiende hasta 6 veces el ancho de la excavación para minimizar los efectos de las restricciones de los bordes. La Tabla 1 presenta el rango de propiedades geométricas de la excavación que se consideraron para el análisis, así como las propiedades mecánicas del muro diafragma.

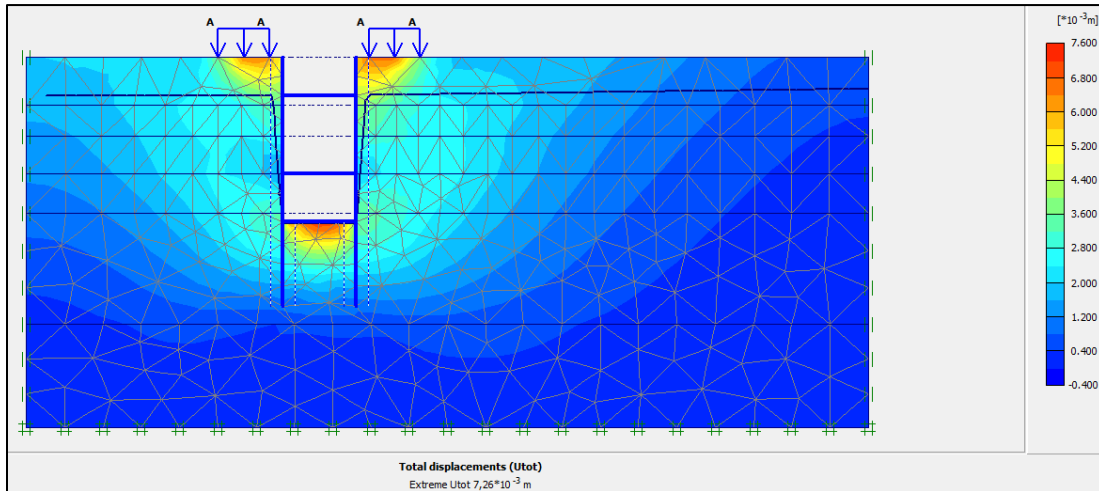


Figura 2. Estimación con elementos finitos de desplazamientos totales para una excavación circular de $B = 4 \text{ m}$, $H = 12 \text{ m}$, $D = 4 \text{ m}$. Fuente: elaboración propia.

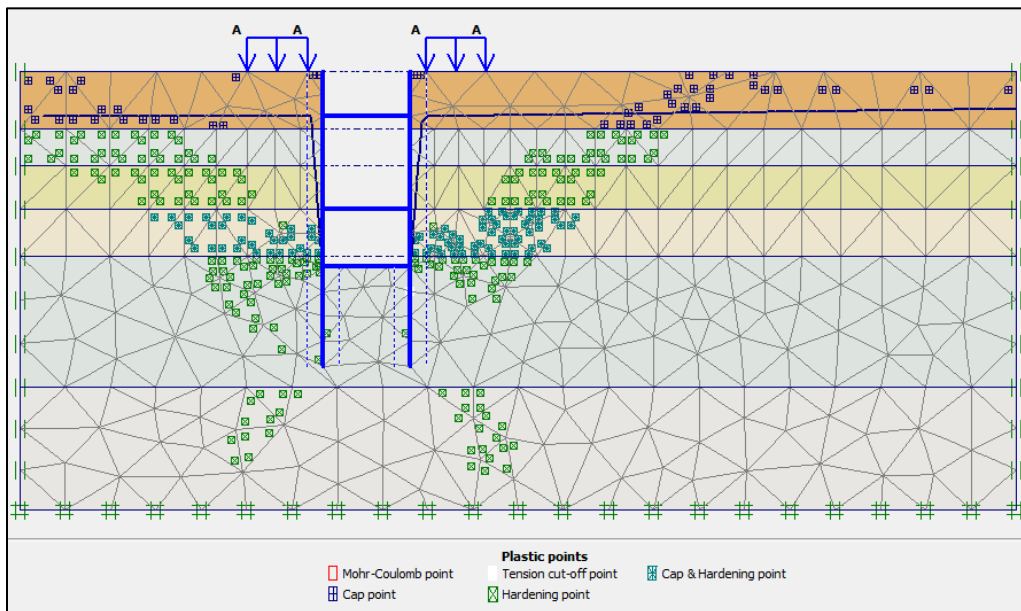


Figura 3. Análisis de estabilidad por falla de fondo empleando la reducción de resistencia para una excavación circular de $B = 4 \text{ m}$, $H = 20 \text{ m}$, $D = 4 \text{ m}$. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Resumen de características del modelo de simulación. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Símbolo	Intervalo de valores
Diámetro de la excavación (m)	B	4, 8, 12
Profundidad de excavación (m)	H	5, 10, 20
Empotramiento del muro diafragma bajo la profundidad de excavación (m)	D	0, 4
Rigidez del muro diafragma (kN/m ²)	EI	6×10^6

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el análisis paramétrico permiten establecer criterios relevantes para la estabilidad de excavaciones circulares en suelos arcillosos sobreconsolidados, considerando la influencia del diámetro de la excavación (B) y la profundidad de empotramiento del muro diafragma (D), de acuerdo con las condiciones de frontera presentadas en la Figura 1. Como se observa en la Figura 4, el factor de seguridad por falla de fondo (FSf) tiende a disminuir con el incremento en B, lo que indica que excavaciones de mayor diámetro son más vulnerables a sufrir inestabilidad en la base. No obstante, se evidencia que el aumento en la profundidad de empotramiento del muro contribuye a mejorar la estabilidad, reflejándose en un incremento del FSf. Para excavaciones con B = 4 m, el empotramiento de D = 4 m genera un incremento en FSf del 32.1 %, mientras que para B = 12 m, el incremento es de solo 15.5 %, lo que sugiere que la efectividad del empotramiento disminuye a medida que el diámetro de la excavación aumenta. Este comportamiento puede atribuirse a la geometría del campo cinemático de falla, que en excavaciones de mayor diámetro tiene un mayor desarrollo y, por tanto, una menor restricción por parte del muro diafragma y su empotramiento bajo la base de la excavación.

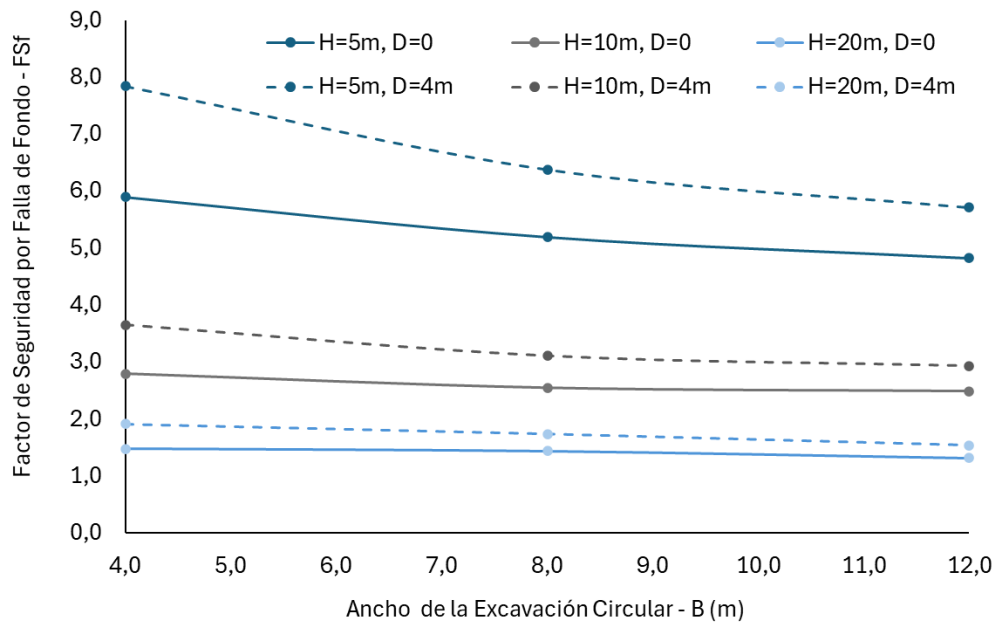


Figura 4. Variación del factor de seguridad por falla de fondo (FSf) para excavaciones de diámetro (B) con y sin empotramiento de los muros diafragma. Fuente: elaboración propia.

Además, la Figura 5 muestra que la relación entre FSf y la profundidad de excavación (H) no es lineal y varía en función del diámetro. Para excavaciones con B = 4 m, el FSf se mantiene relativamente constante hasta H = 8 m, lo que indica que en excavaciones poco profundas la estabilidad no se ve comprometida de manera significativa. Sin embargo, para excavaciones con B = 12 m, la disminución en FSf es más pronunciada a medida que la profundidad aumenta, lo que sugiere que excavaciones de gran diámetro son más sensibles a los efectos de la profundidad que aquellas de menor diámetro. Este hallazgo es relevante desde una perspectiva de diseño, ya que indica que en excavaciones profundas de gran diámetro no basta con aumentar la profundidad de empotramiento del muro diafragma para garantizar la estabilidad, sino que deben considerarse otras estrategias complementarias, como el uso de anclajes, o técnicas de mejoramiento del suelo bajo el frente de excavación incluyendo pilotes, entre otras.

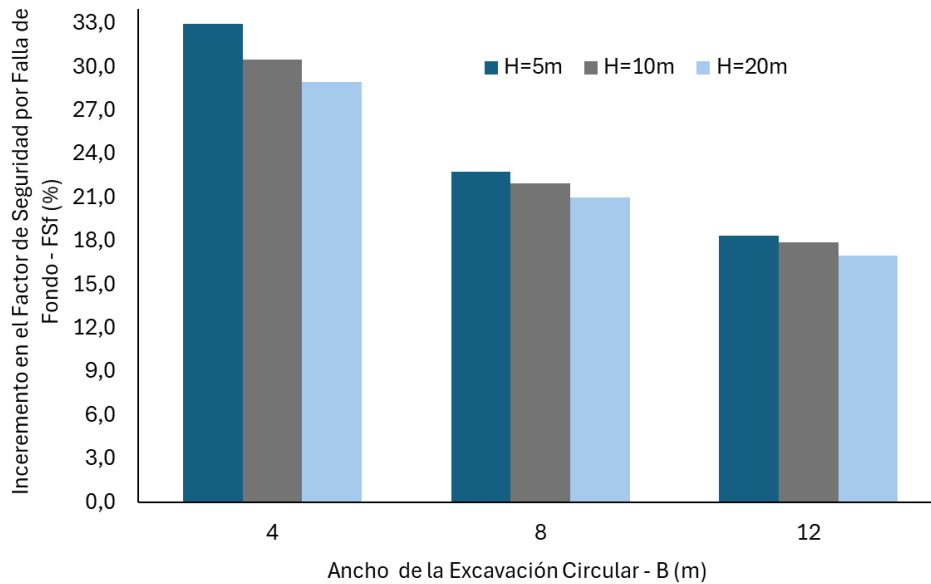


Figura 5. Variación porcentual del factor de seguridad por falla de fondo (FSf) para diferentes diámetros (B) y alturas de excavación (H). Fuente: elaboración propia.

Comparando estos resultados con estudios previos, se observa una coincidencia con lo reportado por diversos autores [1], [2], [4], [24]-[26], [27], [28], quienes han señalado que la estabilidad de excavaciones circulares en suelos arcillosos está altamente condicionada por el diámetro de la excavación y la interacción suelo-estructura del muro de contención. Sin embargo, en comparación con los valores reportados por [24], el FSf obtenido en este estudio es ligeramente inferior para $B > 8$ m, lo que puede atribuirse al efecto de la sobreconsolidación superficial del suelo. Además, estudios como los de [26], [27], han indicado que el FSf en arcillas depende significativamente del índice de plasticidad del suelo, lo que sugiere que futuras investigaciones podrían incorporar esta variable para refinar los modelos de estabilidad.

En términos de aplicaciones prácticas, estos resultados brindan información clave para el diseño de excavaciones en suelos arcillosos sobreconsolidados superficialmente, particularmente en la Sabana de Bogotá, donde la profundidad de empotramiento del muro diafragma suele establecerse de manera empírica. Los hallazgos de este estudio indican que, si bien el empotramiento contribuye a mejorar la estabilidad, su efectividad es limitada para grandes diámetros y profundidades elevadas, por lo que su selección debe ser complementada con análisis detallados de las condiciones del suelo y la interacción suelo-estructura.

La Figura 6 y la Figura 7 presentan los resultados del análisis de estabilidad geotécnica general realizado mediante la técnica de equilibrio límite empleando el programa SLIDE®, en donde se buscó corroborar la geometría de la superficie de falla crítica y el factor de seguridad. El análisis incluyó una sobrecarga en la superficie de 10 kPa y el nivel de agua libre a 3 m de profundidad, definido con base en los datos de un proyecto real desarrollado al suroccidente de Bogotá considerando condiciones no drenadas en la resistencia al corte de las arcillas. Se presenta la comparación de dos casos aleatorios en los cuales la excavación circular tiene $B = 4$ m y $B = 12$ m, para $10 < H < 20$. Se puede observar que para el menor ancho de base la superficie de falla no aflora en el fondo de la excavación, mientras que, para el mayor ancho de base, la superficie de falla sí se localiza en el frente de excavación. Esto explica, entonces, las tendencias del incremento del FSf con el empotramiento (D) en el modelo de elementos finitos. Es previsible que un aumento en (D) ocasione un incremento en la estabilidad por falla de fondo, aunque posiblemente con porcentajes más reducidos de forma inversamente

proporcional a (B), tal y como lo han presentado otros autores en análisis similares favoreciendo la resiliencia de estos sistemas [2], [11], [15], [17], [18].

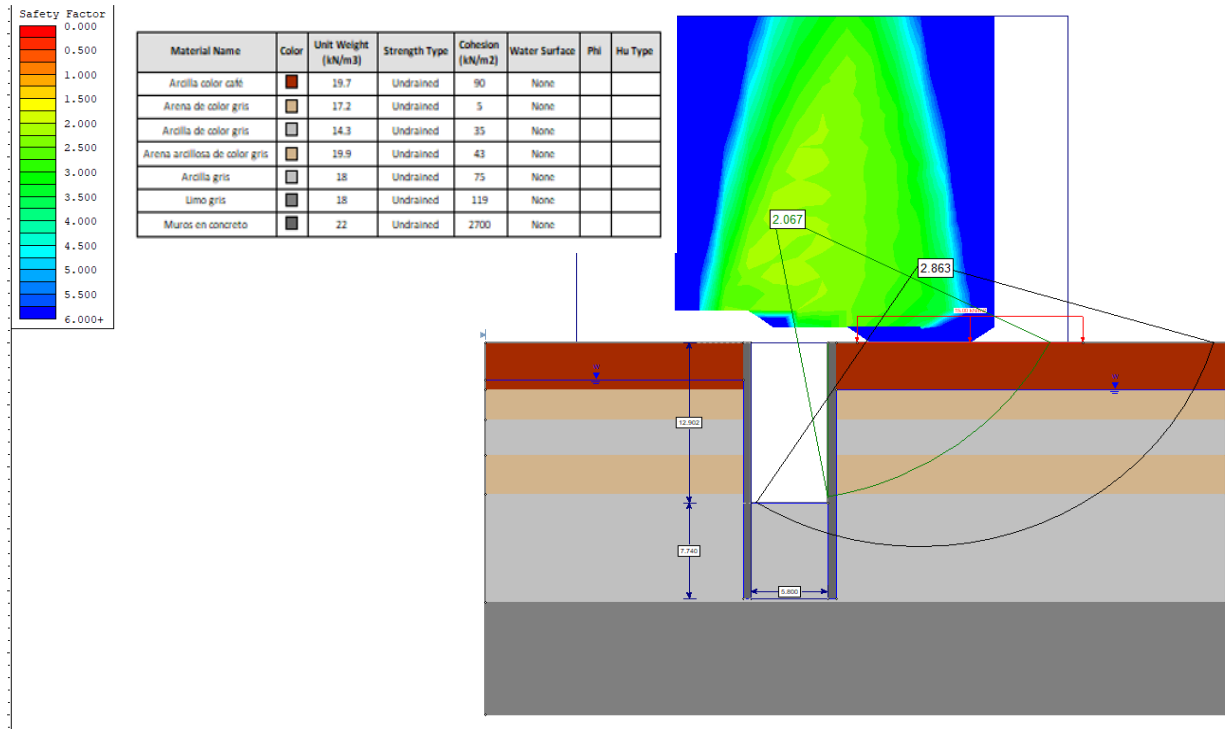


Figura 6. Factor de seguridad por estabilidad global para una excavación de B = 4.0 m y 12 m < H < 20 m). Fuente: elaboración propia.

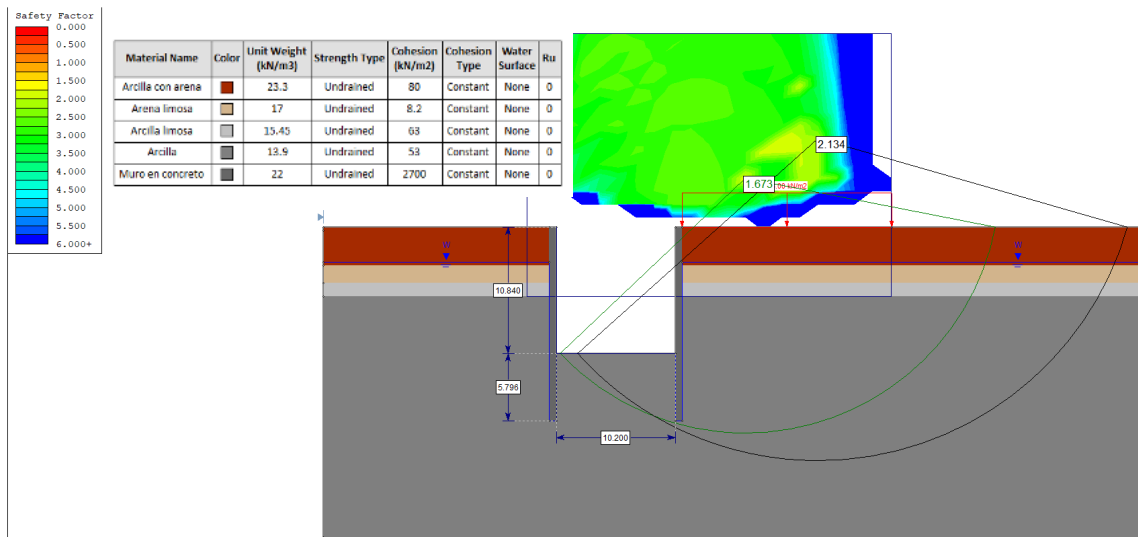


Figura 7. Factor de seguridad por estabilidad global para una excavación de B = 12 m y 10 m < H < 20 m. Fuente: elaboración propia.

En los casos en los cuales la profundidad de empotramiento (D) es igual a cero, se verificaron los valores del factor de capacidad de carga (N_s) mediante (3), con el fin de verificar la influencia de la geometría circular en este parámetro, en donde γ es el peso unitario total ponderado sobre el fondo de la excavación, H es la altura de la excavación soportada y S_u es la resistencia no drenada promedio bajo el fondo de la excavación.

$$N_s = \frac{(FSf)(\gamma H)}{S_u} \tag{3}$$

En la Tabla 2 se presentan los valores de N_s obtenidos, comparados con los valores de los factores de capacidad de carga N_{cL} (factor de capacidad de carga por límite inferior) y N_{uL} (factor de capacidad de carga por límite superior) hallados a partir de simulaciones numéricas por [27] para cimientos profundos circulares. Los valores de N_s determinados en este trabajo se encuentran dentro de los intervalos definidos por los autores, en donde fue posible la comparación de los valores de (H/B) .

Tabla 2. Valores obtenidos del factor N_s para la falla de fondo, ($D = 0$). Fuente: elaboración propia.

H(m)	B(m)	H/B	N_s	N_{cL}	N_{uL}
5	4	1.3	8.95		
	8	0.6	7.89	7.866	8.608
	12	0.4	7.33	7.303	8.104
10	4	2.5	9.52	-	-
	8	1.3	8.57	-	-
	12	0.8	8.47	8.37	9.03
20	4	5.0	10.10	-	-
	8	2.5	9.81	-	-
	12	1.7	8.98	-	-

Los valores de N_s para $D=0$ obtenidos de (3) se presentan gráficamente en la Figura 8, en donde se presenta también la mejor ecuación de ajuste obtenida, de tipo logarítmico, para representar la variación de N_s con (H/B) en el perfil estratigráfico analizado.

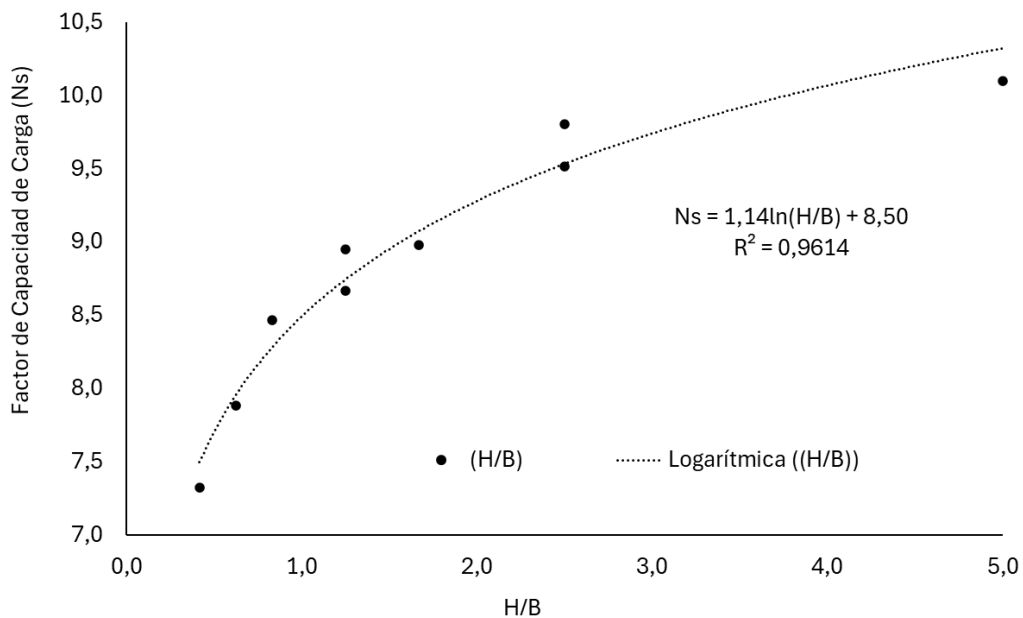


Figura 8. Variación del factor de Capacidad de Carga (N_s) con (H/B) . Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con el análisis realizado, es posible expresar el factor de seguridad por falla de fondo para las excavaciones circulares soportadas incluyendo la profundidad de empotramiento a partir de (4). Donde N_s es el factor de capacidad de carga evaluado, (S_u) es la resistencia no drenada ponderada bajo el fondo de la excavación hasta una profundidad mínima igual a $(D+H)$, q es la sobrecarga en superficie, y α es el factor de influencia del empotramiento deducido de las modelaciones numéricas, cuya variación se presenta en la Figura 9, como una función de (D/B) . Se observa que el valor de α oscila entre 1.19 y 1.31, aumentando con la relación (D/B) . La variación del factor α propuesto es congruente con algunas propuestas planteadas en la literatura a partir de resultados de simulaciones numéricas para perfiles de arcillas homogéneos [1], [2], [18], [20]-[27].

$$FSf_D = \frac{N_s S_u}{(\gamma H + q)} \alpha \tag{4}$$

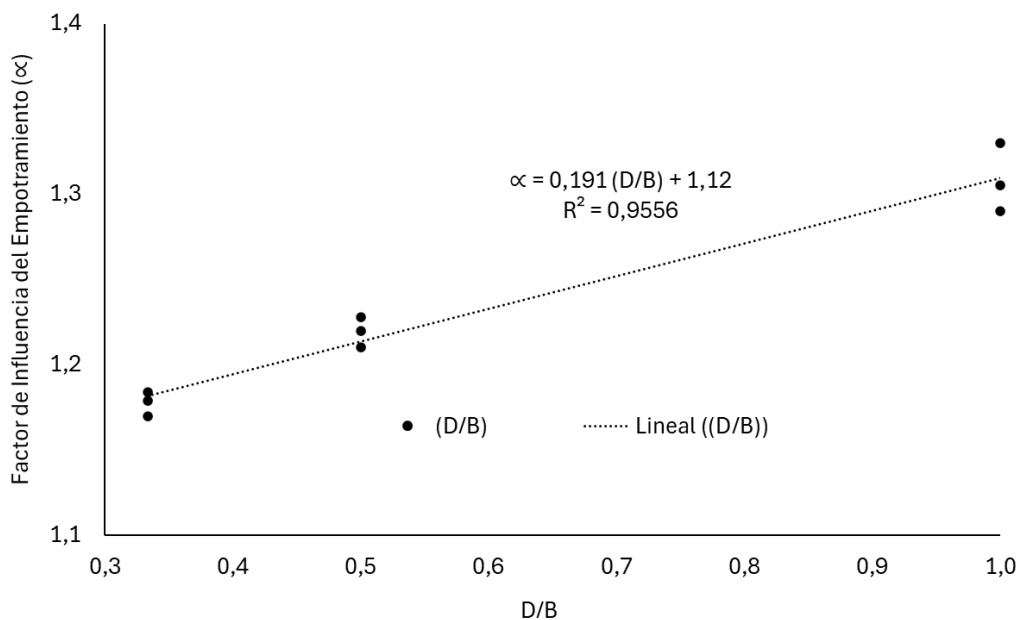


Figura 9. Variación del factor (α) con la relación (D/B) . Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que la sobreconsolidación superficial de la arcilla ejerce un efecto significativo sobre el factor de capacidad de carga (N_s), reflejando la mayor resistencia no drenada cerca de la superficie. Esta influencia se observa en la correlación logarítmica propuesta, donde (N_s) exhibe valores más elevados para relaciones (H/B) moderadas, disminuyendo progresivamente a medida que la excavación se profundiza y la arcilla pierde parte de su condición de sobreconsolidación [28]. Dicho comportamiento resalta la importancia de considerar la variación de las propiedades mecánicas superficiales de arcillas sedimentarias, especialmente en zonas con procesos geológicos y climáticos que generan sobreconsolidación superficial [28], [29], [30].

En paralelo, el factor de influencia del empotramiento (α) evidencia una tendencia creciente con la relación (D/B) , situándose en un rango aproximado entre 1.19 y 1.31. Este resultado indica que la contribución del empotramiento en la estabilidad de la excavación aumenta a medida que se profundiza el muro, aunque su efecto es más notorio en diámetros reducidos [28], [29]. El carácter sobreconsolidado de la arcilla analizada maximiza esta respuesta, al ofrecer un material relativamente rígido cerca de la superficie de la excavación circular que interactúa de manera más efectiva con el muro empotrado. De esta forma, se refuerza la pertinencia de ajustar tanto (N_s) como (α) en función del grado de sobreconsolidación del suelo, garantizando

una estimación más realista del factor de seguridad por falla de fondo en excavaciones circulares.

La conjunción de ambos parámetros (N_s y α) en el método simplificado propuesto permite incorporar de manera explícita la influencia de la sobreconsolidación y el empotramiento en el diseño geotécnico. Al relacionar la capacidad de carga de la arcilla con la geometría de la excavación y la profundidad de empotramiento del muro, se obtiene una herramienta de cálculo que, si bien requiere validaciones adicionales involucrando especialmente observaciones basadas en instrumentación en campo, representa un avance en la comprensión y modelación de la estabilidad de excavaciones circulares en entornos con arcillas sedimentarias sobreconsolidadas. Las tendencias presentadas son similares a las reportadas por [1], [2], [28], [29].

4. CONCLUSIONES

Este artículo presentó los factores que determinan el factor de seguridad por falla de fondo en excavaciones circulares soportadas con muros pantalla en arcillas de origen lacustre y paludal, sobreconsolidadas superficialmente, a partir de modelaciones numéricas con elementos finitos y análisis de estabilidad por equilibrio límite. Para ello, se incluyó la secuencia constructiva típica de pozos de lanzamiento y recepción en sistemas trenchless en un perfil de suelos del suroccidente de Bogotá. El estudio corroboró que dicho factor de seguridad depende, principalmente, de la resistencia no drenada de la arcilla, las propiedades geométricas del sistema de excavación y la profundidad de empotramiento de los muros pantalla.

De acuerdo con los resultados se destacan los siguientes aspectos: La estabilidad contra la falla de fondo en excavaciones circulares se ve fuertemente influenciada por la interacción entre el diámetro de la excavación y la profundidad de empotramiento del muro, así como por las propiedades geomecánicas del suelo arcilloso. El aumento en el diámetro de la excavación conlleva una disminución en la estabilidad del fondo, sin embargo, una mayor profundidad de empotramiento del muro diafragma incrementa el factor de seguridad, aunque el efecto se atenúa en excavaciones de gran tamaño. La resistencia no drenada de la arcilla en el fondo constituye un factor determinante para la estabilidad. La sobreconsolidación superficial confiere al suelo un comportamiento más rígido y menos deformable, pero no se identificó como variable crítica para el factor de seguridad por falla de fondo bajo las condiciones analizadas. Los valores ajustados de (N_s) y (α), obtenidos de las simulaciones numéricas, representan una formulación razonable para evaluar el factor de seguridad por falla de fondo considerando el empotramiento y la sobreconsolidación superficial. No obstante, se recomienda validar dichos valores con un mayor número de casos de simulación incorporando otros perfiles de arcillas sedimentarias lacustres y datos de instrumentación geotécnica.

Los hallazgos proporcionan una base teórico-práctica fundamentada en modelaciones numéricas sólidas, así como una herramienta simplificada para el diseño de excavaciones circulares profundas en condiciones geotécnicas asociadas a arcillas sedimentarias sobreconsolidadas superficialmente. Finalmente, el método simplificado propuesto puede modificarse y validarse para arcillas sedimentarias del altiplano cundiboyacense de Colombia, ampliando su aplicabilidad a otros entornos geotécnicos con características similares en cuanto a origen geológico e historia de esfuerzos.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Los autores agradecen el apoyo del grupo de investigación en prevención y atención de desastres GIDPAD de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por los aportes en la

discusión de los resultados obtenidos a partir de simulaciones numéricas. Los autores agradecen a DICEÍN SAS – Ingenieros Consultores y a su unidad de I+D+i por proporcionar la información técnica del análisis paramétrico.

6. REFERENCIAS

- [1] F. Cai, K. Ugai, and T. Hagiwara, "Base Stability of Circular Excavations in Soft Clay," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 128, no. 8, pp. 702-706, Aug. 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:8\(702\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:8(702))
- [2] A. T. C. Goh, "Basal heave stability of supported circular excavations in clay," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 61, pp. 145-149, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.10.005>
- [3] C.-F. Hsu, Y.-H. Tsai, Y.-R. Chen, Y.-F. Li, and S.-L. Chen, "Normalized analysis of deformation for deep excavation diaphragm walls under different neighboring building conditions," *Res. Eng.*, vol. 22, p. 102155, Jun. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102155>
- [4] H. Li, M. Huang, J. Yu, Y. Li, and Y. Guo, "Three-dimensional solution for braced excavation-induced ground settlement," *Comput. Geotech.*, vol. 172, p. 106460, Aug. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106460>
- [5] T. Boonyarak, A. Yadana Aung, V. Kamchoom, and Z. Zaw Aye, "Diaphragm wall lateral movement in deep excavations in Bangkok clays: impacts and influencing factors," *Can. Geotech. J.*, vol. 62, pp. 1-16, Jun. 2024. <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0058>
- [6] J. S. Shiau, M. S. Sams, J. Zhang, and R. J. Kemp, "Settlement analyses of underground circular tunneling in soft clay," In *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, C. Yoo, S. W. Park, B. Kim, and H. Ban, Eds., Seoul: Korean Geotechnical Society-CRC Press, 2014, pp. 347-352. https://www.issmge.org/uploads/publications/6/20/2014_055.pdf
- [7] S. Y. Lam, "Ground movements due to excavation in clay: physical and analytical models," Ph.D. Thesis, University of Cambridge, Cambridge, England, 2010. <https://doi.org/10.17863/CAM.13985>
- [8] R. P. Cunha, and H. G. Poulos, "Importance of the Excavation Level on the Prediction of the Settlement Pattern from Piled Raft Analyses," *Soils Rocks*, vol. 41, no. 1, pp. 91-99, Aug. 2018. <https://www.soilsandrocks.com/sr-411091099>
- [9] S. C. Jong, and D. E. L. Ong, "A novel Bayesian network approach for predicting soil-structure interactions induced by deep excavations," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 152, p. 105865, Oct. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105865>
- [10] Y.-G. Tang, "Probability-based method using RFEM for predicting wall deflection caused by excavation," *J. Zhejiang Univ. Sci.*, vol. 12, no. 10, pp. 737-746, Oct. 2011. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1100016>
- [11] S. S. Chowdhury, "Reliability Analysis of Excavation Induced Basal Heave," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 35, no. 6, pp. 2705-2714, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0272-2>
- [12] H. Faheem, F. Cai, K. Ugai, and T. Hagiwara, "Two-dimensional base stability of excavations in soft soils using FEM," *Comput. Geotech.*, vol. 30, no. 2, pp. 141-163, Mar. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(02\)00061-7](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(02)00061-7)
- [13] E. C. Hsiao, M. Schuster, C. Hsein Juang, and G. T. Kung, "Reliability Analysis and Updating of Excavation-Induced Ground Settlement for Building Serviceability Assessment," *J. Geotech. Geoenv. Eng.*, vol. 134, no. 10, pp. 1448-1458, Oct. 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:10\(1448\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:10(1448))
- [14] S. Tangchawal, "Reliability and assessment techniques on ground excavation," *Eng. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 1-8, May. 2009. <https://www.engj.org/index.php/ej/article/view/44>
- [15] Y. A. Delgado, J. A. Pineda, and G. J. Colorado-Urrea, "Resilience Index Assessment for Urban Excavations," in *Geocongress 2024: Geotechnics of Natural Hazards*, T. M. Evans, N. Stark, and S. Chang, Eds., Reston (US): American Society of Civil Engineers, 2024. <https://doi.org/10.1061/9780784485316.072>
- [16] V. N. Khatri, and J. Kumar, "Stability of an unsupported vertical circular excavation in clays under undrained condition," *Comput. Geotech.*, vol. 37, no. 3, pp. 419-424, Apr. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.11.001>
- [17] S. Keawsawasvong, and B. Ukritchon, "Undrained basal stability of braced circular excavations in non-homogeneous clays with linear increase of strength with depth," *Comput. Geotech.*, vol. 115, p. 103180, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103180>

- [18] W. Zhang, R. Zhang, C. Wu, A. T. C. Goh, and L. Wang, "Assessment of basal heave stability for braced excavations in anisotropic clay using extreme gradient boosting and random forest regression," *Underg. Space*, vol. 7, no. 2, pp. 233-241, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.03.001>
- [19] A. T. C. Goh, F. H. Kulhawy, and K. S. Wong, "Reliability assessment of Basal-Heave stability for braced excavations in clay," *J. Geotech. Geoenv. Eng.*, vol. 134, no. 2, pp. 145-153, Feb. 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:2\(145\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:2(145))
- [20] B.-C. Benson Hsiung, "A case study on the behaviour of a deep excavation in sand," *Comput. Geotech*, vol. 36, no. 4, pp. 665-675, May. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.10.003>
- [21] Z. Luo, S. Atamturktur, Y. Cai, and C. H. Juang, "Simplified Approach for Reliability-Based Design against Basal-Heave Failure in Braced Excavations Considering Spatial Effect," *J. Geotech. Geoenv. Eng.*, vol. 138, no. 4, pp. 441-450, Aug. 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000621](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000621)
- [22] A. T. C. Goh, R. H. Zhang, W. Wang, H. L. Liu, and W. G. Chang, "Numerical study of the effects of groundwater drawdown on ground settlement for excavation in residual soils," *Acta Geotech.*, vol. 15, no. 5, pp. 1259-1272, May. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00843-5>
- [23] A. T. C. Goh, W. G. Zhang, and K. S. Wong, "Deterministic and reliability analysis of basal heave stability for excavation in spatial variable soils," *Comp. Geotech.*, vol. 108, pp. 152-160, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.015>
- [24] D. Chakraborty, and J. Kumar, "Stability Numbers for a Vertical Circular Excavation with Surcharge," *Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. A Phys. Sci.*, vol. 87, no. 1, pp. 115-123, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1007/s40010-016-0311-z>
- [25] J. Kumar, M. Chakraborty, and J. Prasad Sahoo, "Stability of Unsupported Vertical Circular Excavations," *J. Geotech. Geoenv. Eng.*, vol. 140, no. 7, Mar. 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001118](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001118)
- [26] Y. Qiao, M. Huang, Z. Shi, Z. Zhang, and H. Wang, "A modified Prandtl upper-bound solution of basal stability for narrow-deep excavations in undrained clay," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Institute of Physics, Bristol, England, UK, 2024*, p. 012023. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1336/1/012023>
- [27] R. Salgado, A. V. Lyamin, S. W. Sloan, and H. S. Yu, "Two- and three-dimensional bearing capacity of foundations in clay," *Geotechnique*, vol. 54, no. 5, pp. 297-306, Jun. 2004. <https://doi.org/10.1680/geot.2004.54.5.297>
- [28] V. Qui Lai, K. Kounlavong, S. Keawsawasvong, R. Banyong, W. Wipulanusat, and P. Jamsawang, "Undrained basal stability of braced circular excavations in anisotropic and non-homogeneous clays," *Transport. Geotech.*, vol. 39, p. 100945, Mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100945>
- [29] R. Wang, S. Liu, L. Xu, C. Zhao, P. Ni, and W. Zheng, "Performance of a 56 m deep circular excavation supported by diaphragm and cut-off double-wall system in Shanghai soft ground," *Can. Geotech. J.*, vol. 60, no. 4, pp. 521-540, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0308>
- [30] V. Qui Lai, K. Kounlavong, S. Keawsawasvong, W. Wipulanusat, and P. Jamsawang, "Physics-based and data-driven modeling for basal stability evaluation of braced excavations in natural clays," *Heliyon*, vol. 9, no. 10, p. e20902, Oct. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20902>

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no hay conflictos de interés.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Jorge Arturo Pineda-Jaimes: conceptualización, investigación formal, análisis, curaduría de datos y redacción del artículo.

Sherley Catheryne Larrañaga-Rubio: conceptualización, investigación formal, análisis, curaduría de datos y revisión del artículo.