

Comparative Analysis of Analytical and Computational Methods for Axially Loaded Piles in Stratified Soils Subjected to Downdrag

Matías Ruiz¹; Yrene Santiago²; William Araujo³

^{1,2} Universidad Andrés Bello, Chile, m.ruizquiroga@uandresbello.edu, yrene.santiago@unab.cl

³Universidad de Piura, Perú, william.araujo@udep.edu.pe

Abstract-- *The Downdrag or negative skin friction phenomenon constitutes a critical aspect in the design of deep foundations, particularly for piles installed in soft or stratified soils, where settlement of the surrounding soil generates a relative downward displacement that induces negative shear stresses along the pile shaft. This mechanism mobilizes an additional load that adds to the applied structural loads and may reduce the available axial capacity of the pile while increasing settlements. Despite its relevance in infrastructure projects founded on compressible soils, the evaluation of Downdrag still presents challenges associated with the complexity of soil–pile interaction and the influence of geometric and stratigraphic variables. The objective of this research is to evaluate the load-bearing capacity and settlements of piles constructed in stratified soils affected by Downdrag through a comparative analysis between traditional analytical methods and computational analysis. For this purpose, 45 case studies representing different stratigraphic configurations and thicknesses of critical cohesive soil layers were analyzed, also considering variations in pile diameter. The computational analysis was performed using the pile module of the GEO5 software, which is based on analytical formulations of soil–pile interaction. The results show that increasing the thickness of the critical cohesive soil layer has a significant influence on pile behavior. Analytical calculations and computational analysis showed high agreement in the estimation of shaft and tip bearing capacity (differences lower than 2.5%). However, settlement predictions exhibited larger discrepancies, highlighting the influence of soil stratigraphy, the thickness of cohesive layers susceptible to settlement, and pile diameter on the development of Downdrag.*

Keywords: *Downdrag; negative skin friction; load-bearing capacity; pile settlements; stratified soils.*

Análisis comparativo de métodos analíticos y computacionales para pilotes sometidos a carga axial en suelos estratificados sometidos a Downdrag

Matías Ruiz¹; Yrene Santiago²; William Araujo³

^{1,2} Universidad Andrés Bello, Chile, m.ruizquirola@uandresbello.edu, yrene.santiago@unab.cl

³Universidad de Piura, Perú, william.araujo@udep.edu.pe

Resumen— El fenómeno de Downdrag o fricción negativa constituye un aspecto crítico en el diseño de cimentaciones profundas, particularmente en pilotes instalados en suelos blandos o estratificados, donde el asentamiento del suelo circundante genera un desplazamiento relativo descendente que induce esfuerzos cortantes negativos a lo largo del fuste del pilote. Este mecanismo moviliza una carga adicional, que se suma a las cargas estructurales aplicadas y puede reducir la capacidad axial disponible del pilote y aumentar los asentamientos. A pesar de su relevancia en proyectos de infraestructura fundados en suelos compresibles, la evaluación del Downdrag continúa presentando desafíos asociados a la complejidad de la interacción suelo-pilote y a la influencia de variables geométricas y estratigráficas. El objetivo de esta investigación es evaluar la capacidad de carga y los asentamientos de pilotes construidos en suelos estratificados afectados por el efecto Downdrag, mediante un análisis comparativo entre métodos analíticos tradicionales y análisis computacional. Para ello, se analizaron 45 casos de estudio representativos de distintas configuraciones de estratigrafía y espesores de suelo cohesivo crítico, considerando además variaciones en el diámetro del pilote. El análisis computacional se realizó utilizando el módulo de pilotes del software GEO5, basado en formulaciones analíticas de interacción suelo-pilote. Los resultados muestran que el incremento del espesor de suelo crítico tiene una influencia significativa en el comportamiento de los pilotes. El cálculo analítico y el análisis computacional mostraron alta concordancia en la estimación de la capacidad de carga por fuste y punta (diferencias menores a 2,5 %). Sin embargo, los asentamientos presentaron discrepancias mayores, evidenciando la influencia de la estratigrafía, el espesor de capas cohesivas y el diámetro del pilote en el desarrollo del Downdrag.

Palabras claves: Downdrag; fricción negativa; capacidad de carga; asentamientos en pilotes; suelos estratificados.

I. INTRODUCCIÓN

Las cimentaciones profundas mediante pilotes constituyen una solución ampliamente utilizada en proyectos de infraestructura construidos sobre suelos compresible o con baja capacidad portante, ya que permiten transferir las cargas estructurales hacia estratos más competentes ubicados a mayor profundidad (Das, 2012). Sin embargo, cuando el suelo circundante experimenta asentamientos mayores que el pilote, se genera un desplazamiento relativo descendente que induce esfuerzos cortantes negativos a lo largo del fuste, fenómeno conocido como Downdrag o fricción negativa. Este mecanismo moviliza una carga adicional sobre el pilote que se

suma a las cargas estructurales aplicadas y puede provocar una reducción de la capacidad axial disponible y un aumento de los asentamientos del sistema de cimentación (O'Neill y Reese, 1999; Fellenius, 2004).

El fenómeno de Downdrag suele desarrollarse en suelos blandos o altamente compresibles, como arcillas y limos, donde procesos como consolidación del terreno, rellenos recientes o descensos del nivel freático inducen asentamientos diferenciales entre el suelo y el pilote (Bergado et al., 2001). En estas condiciones, el suelo tiende a desplazarse hacia abajo en relación con el elemento estructural, invirtiendo el sentido de la fricción en el fuste y generando una carga descendente adicional que modifica la distribución de esfuerzos a lo largo del pilote. Este efecto puede afectar significativamente el desempeño de la cimentación, comprometiendo la estabilidad estructural y el comportamiento en servicios de obras de infraestructura tales como edificios, puentes y carreteras (Mayne y Kulhawy, 1982; Bergado, 2019).

Diversos estudios han abordado el análisis del Downdrag mediante enfoques analíticos basados en principios de mecánica de suelos y relaciones empíricas, así como mediante análisis computacionales que permiten representar de forma más detallada la interacción suelo-estructura (Fellenius, 2004; Gobius, 2016). No obstante, la predicción de este fenómeno continúa siendo un desafío en la práctica de la ingeniería geotécnica debido a la complejidad del comportamiento del sistema suelo-pilote y a la influencia de múltiples variables, tales como las propiedades mecánicas del suelo, la distribución estratigráfica de los depósitos y las características geométricas del pilote. En particular, las configuraciones estratificadas, donde se alternan capas de suelo blando y material granular, pueden modificar significativamente la magnitud de la fricción negativa y la respuesta global del sistema de cimentación.

A pesar de los avances en el estudio del Downdrag, aún existe limitada evidencia sobre las posibles diferencias en las estimaciones obtenidas mediante métodos analíticos y análisis computacional cuando se consideran de manera conjunta de la estratificación del suelo y de las características geométricas del pilote, particularmente su diámetro, en la evolución de las cargas inducidas por la fricción negativa y en los

asentamientos asociados. Esta limitación dificulta la evaluación precisa del fenómeno y puede conducir a diseños excesivamente conservadores o, en algunos casos, a una subestimación de las cargas actuantes del pilote.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la capacidad de carga y los asentamientos de pilotes construidos en suelos estratificados afectados por el fenómeno Downdrag, mediante un análisis comparativo entre métodos analíticos y soluciones computacionales. Para ello, se analizan diferentes configuraciones de estratificación del suelo y variaciones en el diámetro del pilote, con el fin de evaluar su influencia en el desarrollo de la fricción negativa y el comportamiento del sistema de cimentación.

Este trabajo aporta evidencia sobre el comportamiento de pilotes sometidos a Downdrag en suelos estratificados y contribuye a mejorar la comprensión de la interacción suelo-estructura bajo condiciones complejas de estratificación. Asimismo, los resultados proporcionan criterios que pueden apoyar el diseño más eficiente y seguro de cimentaciones profundas, integrando herramientas analíticas y computacionales para una evaluación más confiable del fenómeno.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

A. Downdrag y carga de arrastre en pilotes

El Downdrag o fricción negativa corresponde al desarrollo de esfuerzos cortantes descendentes a lo largo del fuste de un pilote cuando el suelo circundante experimenta asentamientos mayores que el propio elemento estructural. Este desplazamiento relativo genera una carga adicional llamada dragload, que se suma a las cargas estructurales aplicadas y modifica la distribución de esfuerzos axiales en el pilote (O'Neill y Reese, 1999; Fellenius, 2004). El fenómeno se presenta con mayor frecuencia en suelos compresibles, como arcillas blandas o limos, donde procesos como el de consolidación de terreno, sobrecargas superficiales o variaciones del nivel freático inducen asentamientos del suelo alrededor del pilote (Bergado et al., 2001).

Un concepto clave asociado al desarrollo del Downdrag es el plano neutro, definido como la profundidad en la cual el desplazamiento vertical del pilote y del suelo circundante es igual, por lo que la fricción cambia de sentido (Fellenius, 2004). Por encima de este plano se desarrolla presión negativa que contribuye a la carga descendente sobre el pilote, mientras que por debajo se moviliza fricción positiva que aporta a la resistencia del sistema (ver Fig. 1). La magnitud de la carga de arrastre depende de diversos factores, entre los que destacan las propiedades del suelo, la magnitud de los asentamientos del terreno, la geometría del pilote y la configuración estratigráfica del subsuelo (Poulos & Davis, 1980).

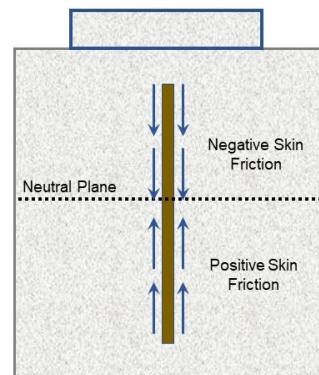


Fig. 1. Esquema conceptual del Downdrag en pilotes, mostrando la fricción negativa por encima del plano neutro y la fricción positiva por debajo adaptado de Melese & Gebregziabher, 2021.

B. Capacidad de carga de pilotes en presencia de fricción negativa

La capacidad de carga axial de un pilote corresponde a la máxima carga que puede transmitir al suelo sin generar fallas geotécnicas ni deformaciones excesivas, desarrollándose a través de la resistencia de punta y la fricción lateral del fuste. En presencia de Downdrag, parte de esta fricción actúa en sentido descendente, generando una carga adicional que reduce la capacidad axial disponible del pilote. Además, en perfiles estratificados, las diferencias de rigidez entre capas modifican la distribución de esfuerzos y la ubicación del plano neutro, afectando tanto la magnitud de la carga de arrastre como el comportamiento global del sistema de cimentación, por lo que resulta fundamental considerar explícitamente la estratigrafía del suelo en el análisis.

C. Enfoques de análisis del fenómeno

El análisis del Downdrag puede abordarse mediante métodos analíticos tradicionales o mediante herramientas de computacionales. Los métodos tradicionales analíticos se basan en formulaciones empíricas y principios de mecánica de suelos que permiten estimar la capacidad de carga, la fricción lateral y las cargas inducidas por fricción negativa a partir de parámetros geotécnicos representativos (Das, 2010; Fellenius, 2004). Estos métodos son ampliamente utilizados en la práctica debido a su simplicidad y aplicabilidad en etapas preliminares de diseño.

Por otra parte, el análisis computacional permite implementar de forma sistemática las formulaciones analíticas empleadas en el diseño de pilotes, facilitando la evaluación de configuraciones más complejas de estratigrafía y geometría. En esta investigación se utilizó el módulo "Pilote Individual" del software GEO5 para analizar el comportamiento de pilotes

sometidos a carga axial y fricción negativa. El programa representa el suelo como un medio estratificado definido mediante parámetros geotécnicos por capa y aplica formulaciones analíticas de interacción suelo-pilote para estimar la resistencia por fuste y por punta. Este enfoque permite examinar la influencia de la estratificación del suelo y de la geometría del pilote, particularmente su diámetro, en el desarrollo del fenómeno. La comparación de los resultados analíticos y computacionales proporciona una base para evaluar las diferencias entre ambos enfoques y mejorar la estimación del comportamiento de pilotes afectados por Downdrag en condiciones geotécnicas complejas.

III. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló mediante un enfoque comparativo que integra análisis de resultados analíticos y computacionales, con el objetivo de evaluar la influencia de la estratigrafía del suelo y del diámetro del pilote en la capacidad de carga, asentamientos y fricción negativa en cimentaciones profundas. Para ello, el estudio de desarrollo en tres etapas principales las cuales se describen a continuación.

A. Definición de las condiciones geotécnicas y casos de análisis

En primer lugar, se definieron las condiciones geotécnicas representativas del estudio, considerando dos tipos de suelos clasificados según el Unified Soil Classification System (USCS): un suelo granular, representativo de gravas o arenas con alta capacidad portante y baja compresibilidad, y un suelo cohesivo crítico clasificado como arcilla de alta plasticidad (CH), caracterizado por su gran compresibilidad, menor capacidad de carga y susceptibilidad a la consolidación y por lo tanto, al desarrollo de fricción negativa (Coduto, Yeung & Kitch, 2016; Tomlinson & Woodward, 2015; Shen et al., 2022; Bian et al., 2024) al interactuar con pilotes. Para cada material se usaron parámetros geotécnicos típicos tales como peso unitario y parámetros resistentes, los cuales se mantuvieron constantes a lo largo del análisis con el fin de aislar el efecto de la estratigrafía del suelo y la geometría del pilote.

A partir de estos materiales se definieron cinco perfiles de suelo con configuraciones estratigráficas que permiten representar distintas condiciones geotécnicas de interés: suelo cohesivo sobre suelo granular, suelo granular sobre suelo cohesivo, suelo cohesivo intercalado entre capas granulares, suelo granular intercalado entre capas cohesivas y un perfil homogéneo de suelo granular considerado como caso patrón (ver Fig. 2). Este último perfil se utilizó como referencia para comparar el comportamiento del pilote en condiciones favorables de capacidad portante y baja compresibilidad del terreno versus aquellos perfiles con presencia de suelos cohesivos compresibles. En los perfiles que incluyen suelo

cohesivo se consideraron tres espesores de estrato crítico (3 m, 5 m y 7 m), con el objetivo de analizar cómo el espesor de la capa compresible influye en el desarrollo de la fricción negativa y en los asentamientos del sistema.

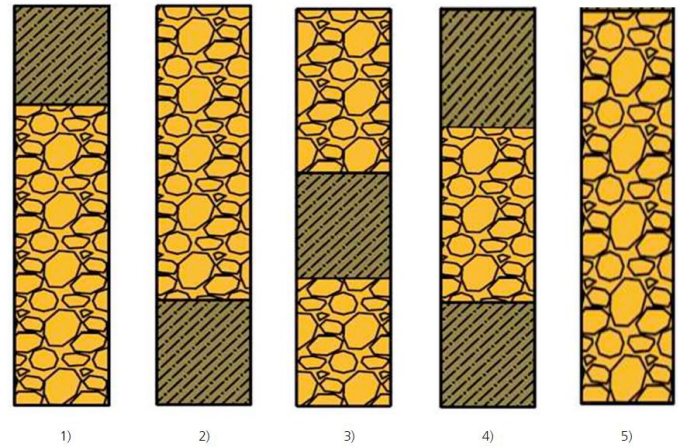


Fig. 2. Perfiles de suelo considerados en el estudio. 1) Perfil N°1; 2) Perfil N°2; 3) Perfil N°3; 4) Perfil N°4; 5) Perfil N°5.

En cuanto a la geometría del elemento estructural, se analizaron pilotes circulares con diámetros de 0.5 m, 0.8 m y 1.0 m, representativos de cimentaciones profundas utilizadas en proyectos de distinta escala. La longitud del pilote se mantuvo constante en 15 m para todos los casos, con el propósito de evitar que esta variable influya en la comparación de los resultados y centrar el análisis en los efectos de la estratigrafía del suelo y del diámetro. Asimismo, se consideró el nivel freático ubicado en la superficie del terreno, representando una condición conservadora para el cálculo de tensiones efectivas en suelos saturados.

B. Estimación analítica de la capacidad de carga, fricción negativa y asentamientos

En la segunda etapa, se realizó la estimación con métodos analíticos del comportamiento del pilote mediante formulaciones clásicas utilizadas en diseño geotécnico. La capacidad última de carga (Q_u) se determinó considerando la contribución conjunta de la resistencia de punta (Q_p) y la resistencia por fricción lateral a lo largo del fuste (Q_s). Para ello, se emplearon las expresiones propuestas por Meyerhof (1976) para la ecuación 1 y Vesic (1977) para la ecuación 2, ampliamente utilizadas para estimar la transferencia de carga en pilotes sometidos a carga axial.

$$Q_p = A_p \cdot (c' \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^*) \leq A_p \cdot 0.5 \cdot P_a \cdot N_q^* \cdot \tan \phi \quad (1)$$

Donde Q_p , es la capacidad de punta del pilote (kN); P_a , presión atmosférica (100 kNm²); ϕ , ángulo de fricción efectivo del suelo del estrato de apoyo; q' , es el esfuerzo vertical efectivo al nivel de la punta del pilote (kN/m²), que

depende del tipo de suelo y la profundidad a la que se encuentra el pilote; A_p , es el área de la base del pilote (m^2); Nq^* , es el factor de corrección para la capacidad de punta.

$$Q_s = k \cdot \sigma'_n \cdot \tan(0,8 \cdot \phi') \cdot p \cdot L \quad (2)$$

Donde Q_s , es la capacidad de fuste total (kN); ϕ' , ángulo de fricción efectivo del suelo del estrato de apoyo; p , perímetro del pilote (m); L , longitud del pilote (m); σ'_n , presión, de sobrecarga efectiva promedio kNm^2 ; K , el coeficiente de presión lateral de tierra.

$$Q_n = 0,5 \cdot p \cdot K' \cdot \gamma_f' \cdot H_f^2 \cdot \tan \delta' \quad (3)$$

Donde Q_n , es la fricción negativa total (kN); p , perímetro del pilote (m); K' , coeficiente de presión de tierra $= K_0 = 1 - \sin \phi'$; γ_f' , peso específico efectivo del relleno; δ' , ángulo de fricción entre el suelo y el pilote $< 0,5-0,7 \cdot \phi'$; H_f , altura del relleno.

Q_p se calculó a partir del esfuerzo vertical efectivo en la base del pilote y de los factores de capacidad portante asociados a las propiedades del suelo en el estrato de apoyo. Por su parte, Q_s se estimó considerando la interacción entre el suelo y la superficie lateral del pilote. En suelos granulares se aplicó un enfoque basado en tensiones efectivas y fricción suelo-pilote, mientras que en suelos cohesivos se utilizó el método α el cual relaciona la resistencia lateral con la resistencia al corte no drenado del suelo.

Adicionalmente, se evaluó la generación de la fricción negativa en los perfiles que presentan estratos cohesivos susceptibles a asentamientos. Este fenómeno se produce cuando el suelo circundante experimenta consolidación o compresión mayor que el pilote, generando una fuerza descendente adicional sobre el fuste que incrementa la carga axial actuante. La magnitud de esta fricción se estimó considerando el peso efectivo del suelo, el coeficiente lateral en reposo y el ángulo de fricción entre el suelo y el pilote.

Finalmente, se estimaron los asentamientos del sistema pilote-suelo bajo carga axial. Aunque las formulaciones clásicas permiten descomponer el asentamiento en tres componentes: la deformación del pilote, la deformación del suelo bajo el pilote y la deformación asociada a la fricción lateral, para efectos comparativos con el análisis computacional se utilizó una expresión simplificada basada en los modelos de Poulos y Davis (1980). Esta formulación relaciona el asentamiento con la carga aplicada, el diámetro del pilote, el módulo equivalente del suelo y un factor de influencia que representa la interacción entre el pilote y el terreno.

C. Selección y justificación de parámetros geotécnicos

Los parámetros geotécnicos utilizados en el análisis corresponden a valores típicos reportados en la literatura para suelos granulares densos y arcillas de alta plasticidad (CH), con el propósito de representar escenarios geotécnicos comparables y aislar el efecto de la estratigrafía y geometría del pilote. El módulo secante del suelo (E_s) fue seleccionado considerando rangos representativos de rigidez reportados para cada tipo de material. Para el suelo granular se adoptó $E_s = 100$ MPa, representativo de depósitos densos con baja compresibilidad, mientras que para el suelo cohesivo se consideró $E_s = 3$ MPa, consistente con arcillas blandas a medianamente consistentes susceptibles a consolidación.

El coeficiente de presión lateral K utilizado en la estimación de la resistencia de fuste se definió bajo condiciones de presión en reposo, adoptando la expresión de Jaky: mientras que el ángulo de fricción suelo - pilote δ se consideró dentro del rango recomendado por Tomlinson y Woodward (2015), utilizando valores entre $0,5 \phi'$ y $0,7 \phi'$ dependiendo del tipo de suelo y condición de interfaz. En suelos cohesivos, la resistencia lateral se estimó mediante el método α , utilizando un coeficiente de adhesión $\alpha = 0,87$, valor consistente con arcillas blandas de resistencia no drenada moderada.

El análisis computacional en GEO5 se desarrolló bajo el estándar NAVFAC DM 7.2 utilizando factores de seguridad globales asociados a condiciones permanentes de carga axial. La verificación del comportamiento del pilote se evaluó principalmente en términos de capacidad portante y deformaciones en servicio. Debido a la sensibilidad del fenómeno del Dowlndrag a la rigidez del suelo y a la interacción en la interfaz suelo-pilote, los resultados obtenidos deben interpretarse dentro del rango de variabilidad asociado a estos parámetros. En particular, variaciones en E_s , K y δ pueden modificar significativamente las estimaciones de asentamiento y fricción negativa, especialmente en perfiles con capas cohesivas de gran espesor.

D. Análisis computacional del sistema pilote-suelo

El análisis se realizó considerando pilotes perforados de hormigón armado ejecutadas in situ, hipótesis coherente con la configuración definida en el módulo "Pilote Individual" de GEO5. En consecuencia, no se consideraron efectos asociados a pilotes hincados, tales como densificación del terreno, incremento temporal de presiones de poros o modificación local de tensiones efectivas alrededor del fuste.

Asimismo, se asumió una rugosidad de interfaz suelo-pilote compatible con superficies de hormigón convencional, representada mediante los valores adoptados para el ángulo de fricción suelo-estructura (δ) y el coeficiente de adhesión α . No se incorporaron explícitamente efectos de recubrimientos

especiales, variaciones de textura superficial ni tratamientos de reducción de fricción negativa.

Debe considerarse que las condiciones de instalación pueden modificar significativamente la resistencia de fuste y el desarrollo del Downdrag. En pilotes hincados, por ejemplo, la alteración del estado tensional del terreno puede incrementar la fricción lateral movilizada, mientras que en pilotes perforados puede producirse una reducción local de rigidez debido a disturbios constructivos. Por ello, los resultados obtenidos representan condiciones ideales de interacción suelo-pilote y deben interpretarse como una aproximación comparativa bajo supuestos homogéneos de instalación.

La última etapa consistió en la modelación computacional de los casos analizados mediante el software GEO5, utilizando el módulo destinado al análisis de pilotes individuales sometidos a carga vertical. Este procedimiento permitió estudiar el comportamiento del sistema pilote-suelo considerando la distribución de esfuerzos a lo largo del fuste, la movilización de la resistencia lateral y los asentamientos asociados.

En el modelo se definieron los perfiles estratigráficos previamente establecidos, incorporando los parámetros geotécnicos correspondientes a cada estrato, así como la geometría del pilote y las condiciones hidráulicas definidas anteriormente. El análisis se realizó mediante el módulo de pilote individual del software GEO5, donde el suelo se representa como un medio estratificado caracterizado por parámetros geotécnicos por capa, los cuales son utilizados en formulaciones analíticas de interacción suelo-pilote para estimar la resistencia por fuste y punta. Este enfoque permite mantener la coherencia con las hipótesis utilizadas en los métodos analíticos y facilita la comparación entre ambos enfoques.

El análisis consideró la interacción entre el pilote y el suelo circundante, incluyendo el desarrollo de fricción negativa en estratos cohesivos susceptibles a asentamiento. Esta fricción se estimó mediante formulaciones analíticas de resistencia por fuste, permitiendo identificar el plano neutro y cuantificar la carga adicional descendente sobre el pilote. Asimismo, se incorporaron condiciones hidráulicas con nivel freático en superficie, influyendo en las tensiones efectivas del terreno. El estudio se definió a partir de la estratigrafía, los parámetros geotécnicos, la geometría del pilote y las condiciones de carga e hidráulicas consideradas.

La comparación entre los métodos analítico y computacional permitió evaluar la influencia de la estratigrafía, el espesor del estrato cohesivo crítico y el diámetro del pilote sobre la capacidad de carga, los asentamientos y el fenómeno de Downdrag. Los resultados

evidenciaron que el módulo de deformación del suelo (E_s) es el parámetro con mayor incidencia en los asentamientos, mientras que los parámetros K y δ afectan principalmente la resistencia de fuste y la magnitud de la fricción negativa. En particular, incrementos en δ generan mayores esfuerzos de interacción suelo-pilote, explicando parte de las diferencias observadas entre ambos enfoques en la estimación deformacional.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La evaluación de la capacidad de carga y del comportamiento deformacional del pilote se realizó para los 45 casos mediante la aplicación de dos enfoques complementarios: estimaciones mediante un método analítico basado en las formulaciones propuestas por Meyerhof (1976) y Vesic (1977) y un análisis computacional utilizando el software GEO5.

A. Resultados enfoque analítico

En el método analítico, la Q_p se determinó mediante (1), la cual considera el esfuerzo efectivo en la base del pilote, el área de la sección transversal y el factor adimensional N_q el cual depende del ángulo de fricción interna del suelo de apoyo. Los parámetros utilizados para el cálculo se resumen en la Tabla 1. Dado que la profundidad del sello del pilote se mantuvo constante en todos los casos analizados, la única variable geométrica considerada fue el diámetro del pilote. En consecuencia, se obtuvieron tres valores de Q_p correspondiente a los tres diámetros evaluados en el estudio. Los resultados de la estimación de la resistencia de punta para todos los casos se resumen en la Tabla 2.

TABLA 1.
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS SUELOS (FINE SOFTWARE. (N.D.) GEO5).

Parámetro	Suelo Granular	Suelo Cohesivo
Cohesión, c [kPa]	0	16
Peso unitario saturado, γ [kN/m ³]	20	21
Ángulo de fricción interna, ϕ [°]	35	19
Resistencia al corte, S_u [kPa]	N/A	25
Módulo secante, E_s [MPa]	100	3
Adhesión, α	-	0,87

En este mismo enfoque, la Q_s se estimó utilizando las ecuaciones de interacción suelo-pilote propuestas por Meyerhof (1979) (2), las cuales consideran distintos mecanismos resistentes dependiendo del tipo de suelo. En suelos granulares, la resistencia se calcula en función del esfuerzo efectivo lateral, el perímetro del pilote, el coeficiente de presión lateral del suelo y el ángulo de fricción interna. En suelos cohesivos, la resistencia se obtiene a partir de la resistencia no drenada del suelo y un factor empírico de adhesión (α) Los parámetros utilizados para las estimaciones

se presentan en la Tabla 1. Los resultados de la estimación para los casos analizados se resumen en la Tabla 2.

El efecto de la fricción negativa o Dwnndrag se evaluó mediante las ecuaciones que consideran la interacción entre el pilote y los estratos susceptibles a asentarse. El cálculo se basa en el esfuerzo efectivo lateral, el perímetro del pilote y las propiedades resistentes del suelo. Los parámetros utilizados para la estimación se resumen en la Tabla 1. En los casos de análisis asociados al suelo granular intercalado con suelo crítico, la fricción negativa total se obtuvo sumando los aportes de cada tramo del pilote. Los resultados correspondientes a todos los casos se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2.
RESULTADOS MÉTODO ANALÍTICO

Perf.	Diam. pilote [m]	Esp. SG [m]	Esp. SC [m]	Qp [kN]	Qs [kN]	Qn [kN]	QT [kN]	S [mm]
1	0,5	12,0	3,0	8.423,40	3.259,58	-16,75	11.666,23	0,52
1	0,5	10,0	5,0	8.423,40	2.801,73	-46,54	11.178,59	0,82
1	0,5	8,0	7,0	8.423,40	2.343,88	-91,21	10.676,07	1,13
1	0,8	12,0	3,0	21.563,89	5.215,32	-26,81	26.752,40	0,33
1	0,8	10,0	5,0	21.563,89	4.482,76	-74,46	25.972,19	0,52
1	0,8	8,0	7,0	21.563,89	3.750,20	-145,94	25.168,15	0,70
1	1,0	12,0	3,0	33.693,58	6.519,16	-33,51	40.179,23	0,26
1	1,0	10,0	5,0	33.693,58	5.603,45	-93,07	39.203,96	0,41
1	1,0	8,0	7,0	33.693,58	4.687,75	-182,42	38.198,91	0,56
2	0,5	12,0	3,0	8.423,40	2.628,16	-153,03	10.898,53	0,52
2	0,5	10,0	5,0	8.423,40	1.924,76	-238,94	10.109,22	0,82
2	0,5	8,0	7,0	8.423,40	1.361,67	-311,97	9.473,10	1,13
2	0,8	12,0	3,0	21.563,89	4.205,06	-244,85	25.524,10	0,33
2	0,8	10,0	5,0	21.563,89	3.079,61	-382,31	24.261,19	0,52
2	0,8	8,0	7,0	21.563,89	2.178,68	-499,15	23.243,42	0,70
2	1,0	12,0	3,0	33.693,58	5.256,32	-306,07	38.643,83	0,26
2	1,0	10,0	5,0	33.693,58	3.849,52	-477,89	37.065,21	0,41
2	1,0	8,0	7,0	33.693,58	2.723,34	-623,94	35.792,98	0,56
3	0,5	12,0	3,0	8.423,40	2.312,45	-16,75	10.719,10	0,52
3	0,5	10,0	5,0	8.423,40	1.924,76	-46,54	10.301,62	0,82
3	0,5	8,0	7,0	8.423,40	1.572,14	-91,21	9.904,33	1,13
3	0,8	12,0	3,0	21.563,89	3.699,92	-26,81	25.237,00	0,33
3	0,8	10,0	5,0	21.563,89	3.079,61	-74,46	24.569,04	0,52
3	0,8	8,0	7,0	21.563,89	2.515,43	-145,94	23.933,38	0,70
3	1,0	12,0	3,0	33.693,58	4.624,91	-33,51	38.284,98	0,26
3	1,0	10,0	5,0	33.693,58	3.849,52	-93,07	37.450,03	0,41
3	1,0	8,0	7,0	33.693,58	3.144,29	-182,42	36.655,45	0,56
4	0,5	12,0	3,0	8.423,40	2.099,24	-136,28	10.386,36	0,98
4	0,5	10,0	5,0	8.423,40	1.218,62	-192,41	9.449,61	1,58
4	0,5	8,0	7,0	8.423,40	618,62	-220,76	8.821,26	2,18
4	0,8	12,0	3,0	21.563,89	3.358,78	-218,05	24.704,62	0,61
4	0,8	10,0	5,0	21.563,89	1.949,79	-307,85	23.205,83	0,99
4	0,8	8,0	7,0	21.563,89	989,80	-353,21	22.200,48	1,36
4	1,0	12,0	3,0	33.693,58	4.198,48	-272,56	37.619,50	0,49
4	1,0	10,0	5,0	33.693,58	2.437,23	-384,82	35.745,99	0,79
4	1,0	8,0	7,0	33.693,58	1.237,24	-441,51	34.489,31	1,09

Nota: SG: Suelo granular; SC: Suelo cohesivo.

El asentamiento elástico del pilote del pilote se estimó mediante un modelo elástico simplificado, que considera la rigidez del sistema suelo-pilote, incorporando el módulo secante de los distintos estratos, un factor de influencia asociado a la geometría del sistema y la resistencia movilizada del fuste. Los parámetros usados en la estimación se resumen

en la Tabla 1. Este cálculo incorpora el módulo secante de los distintos estratos, el factor de influencia y la resistencia movilizada del fuste. Los valores obtenidos para los 36 casos se resumen en la Tabla 2.

B. Resultados enfoque computacional

El comportamiento del pilote se analizó también mediante cálculo computacional utilizando el módulo “Pilote Individual” del software GEO5. El análisis se desarrolló considerando el estándar NAVFAC DM 7.2 bajo un enfoque de verificación mediante factores de seguridad en condiciones de diseño permanente. Se definió un pilote de sección circular ejecutado mediante perforación en hormigón armada, incorporando las propiedades mecánicas del material y las características del refuerzo estructural. Posteriormente se incorporó la estratigrafía del terreno, asignando a cada capa los parámetros geotécnicos correspondientes. El análisis considera la aplicación de una carga axial vertical centrada en el cabezal del pilote, sin considerar momentos ni cargas laterales. Asimismo, se habilitó el análisis de asentamientos mediante la generación de curvas carga-asentamiento, permitiendo considerar la rigidez de cada estrato de suelo y la relación geométrica longitud-diámetro del pilote. La Fig. 3 muestra la distribución de la resistencia y resultados de asentamientos. El resumen de los resultados se resume en la Tabla 3.

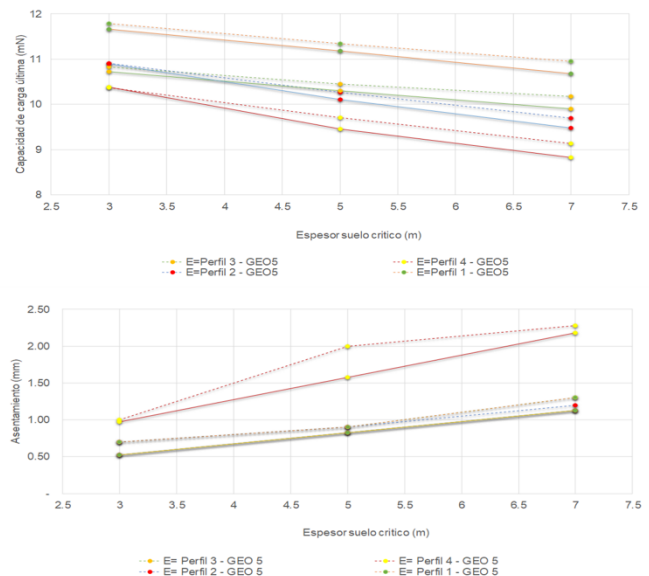


Fig. 3. Capacidad de carga y asentamientos para pilotes de D=0,5m en diferentes perfiles 1,2,3 y 4 calculados con Geo5 – Pilote Individual

C. Análisis de los resultados

La comparación entre ambos enfoques permite analizar la influencia de la estratigrafía del terreno, el espesor del estrato

cohesivo crítico y del diámetro del pilote en la estimación de su comportamiento, la Fig. 3 muestra los resultados de la capacidad de carga. En términos generales, como era de esperarse la capacidad de carga aumenta de manera proporcional al incremento del diámetro del pilote. No obstante, el análisis de los distintos perfiles estratigráficos evidencia que la distribución de los estratos tiene una influencia significativa en la capacidad portante. En perfiles donde los estratos granulares predominan en la parte inferior del pilote, la contribución por punta se incrementa y las diferencias entre ambos métodos se mantienen relativamente bajas. Sin embargo, cuando el estrato cohesivo crítico se ubica en zonas cercanas a la base del pilote la capacidad de carga disminuye debido. Por otro lado, en perfiles con mayor presencia de suelos cohesivos, las discrepancias entre los enfoques tienen aumentar. Esta diferencia se explica parcialmente por la forma en que cada metodología representa la interacción suelo-pilote. El método analítico utiliza coeficientes empíricos globales que simplifican el comportamiento del sistema, mientras que el análisis computacional permite representar de forma más detallada y sistemática la redistribución de esfuerzos y la influencia específica de cada estrato del terreno.

El espesor del estrato de suelo cohesivo, como era de esperarse, también influye de manera directa en el comportamiento resistente del sistema. A medida que el espesor de la capa crítica aumenta, la contribución por fricción lateral aumenta, pero al mismo tiempo se reduce la eficiencia global del fuste, ya que la interacción suelo-pilote se desarrolla en un material con menos capacidad de transferencia de esfuerzos. En los casos con espesores de suelo cohesivo crítico de 7 m además se observa una mayor discrepancia entre los resultados entregados por ambos enfoques. Esto pudiera explicarse porque el método analítico representa el comportamiento del suelo mediante parámetros promedio, mientras que el modelo numérico permite capturar variaciones locales de rigidez y resistencia a lo largo del perfil.

La magnitud de la fricción negativa depende principalmente del espesor del estrato cohesivo crítico y del diámetro del pilote. Un mayor espesor de la capa susceptible a consolidación incrementa el tramo del fuste sometido a fricción negativa, generando mayores cargas descendentes sobre el pilote. Asimismo, pilotes de mayor diámetro presentan una mayor superficie de interacción suelo-pilote, aumentando el valor absoluto del Dwindrag; sin embargo, este efecto se compensa parcialmente por el incremento de la capacidad resistente total del pilote, reduciendo así el impacto relativo de la fricción negativa.

En el análisis de los asentamientos (ver Fig. 4), en perfiles con predominio de suelos cohesivos de baja rigidez, el método analítico tiende a subestimar los desplazamientos verticales en comparación con los resultados del análisis computacional.

Esto se debe a que el enfoque analítico emplea un módulo de elasticidad equivalente que representa el comportamiento promedio del suelo, lo que reduce la influencia de variables locales de rigidez. En contraste, el análisis computacional considera de forma explícita la deformabilidad de cada estrato, permitiendo capturar incrementos localizados de deformación asociados a capas más compresibles.

TABLA 3.
RESULTADOS ENFOQUE COMPUTACIONAL

Perf.	Diam. pilote [m]	Qp [kN]	Qs [kN]	Qn [kN]	QT [kN]	S [mm]
1	0,5	8.507,63	3.298,34	-17,22	11.788,75	0,70
1	0,5	8.563,79	2.827,00	-47,53	11.343,26	0,90
1	0,5	8.619,94	2.423,53	-92,16	10.951,31	1,30
1	0,8	21.779,53	5.059,35	-27,74	26.811,14	1,30
1	0,8	21.923,29	4.466,93	-76,08	26.314,14	1,60
1	0,8	22.067,05	3.984,36	-147,24	25.904,17	2,00
1	1,0	34.030,52	6.231,28	-34,76	40.227,04	1,60
1	1,0	34.255,14	5.640,60	-95,12	39.800,62	2,00
1	1,0	34.479,76	5.037,89	-183,99	39.333,66	2,50
2	0,5	8.507,63	2.554,76	-158,56	10.903,83	0,70
2	0,5	8.563,79	1.952,16	-244,24	10.271,71	0,90
2	0,5	8.619,94	1.388,60	-315,05	9.693,49	1,20
2	0,8	21.779,53	3.980,50	-253,57	25.506,46	1,10
2	0,8	21.923,29	3.037,69	-391,81	24.569,17	1,40
2	0,8	22.067,05	2.293,89	-503,29	23.857,65	1,70
2	1,0	34.030,52	4.989,07	-316,63	38.702,96	1,40
2	1,0	34.255,14	3.784,28	-487,61	37.551,81	1,70
2	1,0	34.479,76	2.885,55	-629,67	36.735,64	2,10
3	0,5	8.507,63	2.334,17	-17,20	10.824,60	0,70
3	0,5	8.563,79	1.932,79	-47,69	10.448,89	0,90
3	0,5	8.619,94	1.645,32	-92,14	10.173,12	1,30
3	0,8	21.779,53	3.521,19	-27,82	25.272,90	1,20
3	0,8	21.923,29	3.007,60	-76,08	24.854,81	1,50
3	0,8	22.067,05	2.634,24	-147,38	24.553,91	1,90
3	1,0	34.030,52	4.367,07	-34,77	38.362,82	1,50
3	1,0	34.255,14	3.779,79	-95,21	37.939,72	1,80
3	1,0	34.479,76	3.362,92	-184,66	37.658,02	2,30
4	0,5	8.591,86	1.919,03	-141,00	10.369,89	1,00
4	0,5	8.704,18	1.199,86	-196,84	9.707,20	2,00
4	0,5	8.816,49	538,73	-223,43	9.131,79	2,28
4	0,8	21.995,17	2.982,30	-226,23	24.751,24	1,60
4	0,8	22.282,69	1.610,73	-314,17	23.579,25	2,90
4	0,8	22.570,21	686,71	-357,13	22.899,79	2,99
4	1,0	34.367,45	3.570,26	-282,05	37.655,66	2,00
4	1,0	34.816,70	1.861,38	-393,99	36.284,09	3,30
4	1,0	35.265,95	727,84	-446,54	35.547,25	3,33

Nota: SG: Suelo granular; SC: Suelo cohesivo.

La Tabla 4 presenta las diferencias porcentuales entre los resultados obtenidos por ambos métodos para la resistencia de punta, resistencia de fuste, fricción negativa y asentamientos. El análisis de estos resultados indica que las diferencias en la estimación de la capacidad de carga por punta se mantienen generalmente por debajo de 2.5%, mientras que la resistencia de fuste presenta variaciones moderadas dependientes de la estratigrafía. La fricción negativa muestra una mayor sensibilidad a las propiedades del suelo y a la distribución de los estratos. No obstante, el parámetro que representa mayores discrepancias entre ambos métodos es el asentamiento, con

diferencias porcentuales considerablemente superiores a las observadas en los parámetros de resistencia.

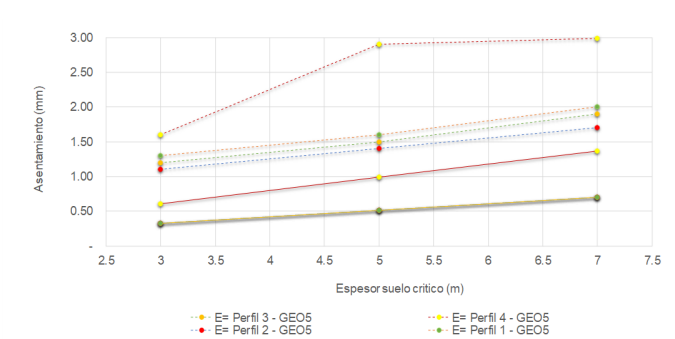


Fig. 4. Asentamientos calculados por métodos analíticos y Geo5 – Pilote Individual para D=1,0m.

En resumen, los resultados indican que el método analítico proporciona estimaciones razonables para la capacidad portante del pilote, especialmente en perfiles relativamente homogéneos o con predominio de suelos granulares. Sin embargo, su precisión disminuye cuando se analizan estratigrafías complejas, capas cohesivas de espesor considerable o condiciones favorables para el desarrollo de fricción negativa. En estos casos, el análisis computacional permite representar con mayor fidelidad la interacción suelo-pilote y la variabilidad estratigráfica del terreno, proporcionando estimaciones más sensibles a cambios locales en las propiedades geotécnicas. En consecuencia, ambos enfoques pueden considerarse complementarios dentro del proceso de diseño de cimentaciones profundas, siendo el método analítico útil para estimaciones preliminares y el análisis computacional una herramienta más robusta para el análisis detallado en condiciones geotécnicas complejas como suelos estratificados.

Si bien la comparación entre el método analítico y el análisis computacional mostró una adecuada concordancia en la estimación de la capacidad de carga axial, particularmente en la resistencia de punta y de fuste, las discrepancias observadas en los asentamientos —que en algunos casos alcanzan diferencias del orden de 60–80 %— evidencian la sensibilidad del fenómeno a la representación de la deformabilidad del suelo y de la interacción suelo–pilote.

En este estudio, la validación se realizó mediante contraste cruzado entre formulaciones analíticas clásicas y el módulo de pilotes individuales de GEO5, ambos basados en principios de transferencia de carga y tensiones efectivas. Sin embargo, no se incorporaron ensayos instrumentados de campo, tales como pruebas de carga estática con medición de deformaciones, perfiles de transferencia de carga o determinación experimental del plano neutro, por lo que los resultados deben interpretarse como una evaluación comparativa de tendencias y sensibilidad del sistema más que como una calibración directa del comportamiento real.

TABLA 4.
COMPARACIÓN PORCENTUAL DE LOS RESULTADOS DE
AMBOS ENFOQUES

Perf.	Diam. pilote [m]	Esp. SG [m]	Esp. SC [m]	QT [%]	S [%]
1	0,5	12,0	3,0	1,0	25,7
1	0,5	10,0	5,0	1,5	8,9
1	0,5	8,0	7,0	2,5	13,1
1	0,8	12,0	3,0	0,2	74,6
1	0,8	10,0	5,0	1,3	67,5
1	0,8	8,0	7,0	2,8	65,0
1	1,0	12,0	3,0	0,1	83,8
1	1,0	10,0	5,0	1,5	79,5
1	1,0	8,0	7,0	2,9	77,6
2	0,5	12,0	3,0	0,0	25,7
2	0,5	10,0	5,0	1,6	8,9
2	0,5	8,0	7,0	2,3	5,8
2	0,8	12,0	3,0	-0,1	70,0
2	0,8	10,0	5,0	1,3	62,9
2	0,8	8,0	7,0	2,6	58,8
2	1,0	12,0	3,0	0,2	81,4
2	1,0	10,0	5,0	1,3	75,9
2	1,0	8,0	7,0	2,6	73,3
3	0,5	12,0	3,0	1,0	25,7
3	0,5	10,0	5,0	1,4	8,9
3	0,5	8,0	7,0	2,6	13,1
3	0,8	12,0	3,0	0,1	72,5
3	0,8	10,0	5,0	1,1	65,3
3	0,8	8,0	7,0	2,5	63,2
3	1,0	12,0	3,0	0,2	82,7
3	1,0	10,0	5,0	1,3	77,2
3	1,0	8,0	7,0	2,7	75,7
4	0,5	12,0	3,0	-0,2	2,0
4	0,5	10,0	5,0	2,7	21,0
4	0,5	8,0	7,0	3,4	4,4
4	0,8	12,0	3,0	0,2	61,9
4	0,8	10,0	5,0	1,6	65,9
4	0,8	8,0	7,0	3,1	54,5
4	1,0	12,0	3,0	0,1	75,5
4	1,0	10,0	5,0	1,5	76,1
4	1,0	8,0	7,0	3,0	67,3

Nota: SG: Suelo granular; SC: Suelo cohesivo.

Diversos autores han señalado que la predicción de asentamientos y de fricción negativa presenta una alta dependencia de parámetros de rigidez y de condiciones constructivas del pilote, especialmente en suelos cohesivos compresibles. En consecuencia, futuras investigaciones deberían incorporar información experimental proveniente de pilotes instrumentados o ensayos de carga axial, permitiendo calibrar la posición del plano neutro, validar la magnitud del Downdrag y reducir la incertidumbre asociada a las estimaciones deformacionales.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como objetivo principal evaluar la capacidad de carga y el comportamiento deformacional de pilotes sometidos a carga axial en distintos escenarios estratigráficos, mediante la comparación entre un método analítico basado en las formulaciones de Meyerhof (1976) y Vesic (1977) y un análisis computacional desarrollado en el

software GEO5. A partir de los resultados obtenidos para los 45 casos analizados, es posible establecer las siguientes conclusiones principales en relación con los objetivos planteados.

El método analítico permitió estimar adecuadamente la capacidad de carga por punta y por fuste en condiciones estratigráficas relativamente simples. Las diferencias observadas entre los resultados analíticos y numéricos para estos parámetros se mantuvieron, en general, por debajo de aproximadamente 2,5 %, lo que indica una concordancia aceptable entre ambos enfoques para la estimación de la resistencia última del pilote. Esto confirma que las formulaciones analíticas continúan siendo herramientas válidas para evaluaciones preliminares y etapas iniciales de diseño en concordancia con lo reportado en la literatura clásica de cimentaciones profundas (Poulos y Davis, 1980; Das 2010).

La estratigrafía del terreno tuvo una influencia significativa en el comportamiento del sistema suelo-pilote. La distribución de los estratos a lo largo del fuste modifica la forma en que se movilizan los mecanismos resistentes, particularmente en presencia de capas cohesivas de baja rigidez. Cuando el pilote se apoya en estratos granulares más competentes, la capacidad por punta aumenta y las diferencias entre ambos enfoques tienden a disminuir. En contraste, cuando el estrato cohesivo crítico se ubica en posiciones cercanas a la base del pilote o presenta espesores significativos, se observa una mayor dispersión en los resultados y una reducción en la eficiencia resistente del sistema, lo que es consistente con estudios previos que destacan la sensibilidad del comportamiento de pilotes a la variabilidad estratigráfica y a la presencia de suelos compresibles (Randolph, 2003).

Los resultados muestran que el incremento del espesor del suelo cohesivo crítico influye tanto en la capacidad de carga como en el comportamiento deformacional. A medida que aumenta el espesor del estrato cohesivo, la transferencia de esfuerzos a lo largo del fuste se desarrolla en materiales de menor resistencia y rigidez, lo que reduce la eficiencia global del pilote y aumenta la sensibilidad del sistema frente a fenómenos de consolidación y deformación del suelo, reforzando la importancia de considerar explícitamente la estratificación en el análisis de pilotes sometidos a cargas axiales.

La fricción negativa está influenciada principalmente por el espesor de las capas cohesivas susceptibles a asentamiento y por la superficie de contacto entre el pilote y el suelo. Aunque pilotes de mayor diámetro generan mayores valores absolutos de Downdrag debido al incremento del perímetro del fuste, su impacto relativo disminuye porque el aumento de la capacidad resistente compensa parcialmente esta carga adicional. Asimismo, el análisis de asentamientos mostró mayores discrepancias entre los métodos analítico y computacional, ya que el primero emplea modelos simplificados de rigidez del

suelo, mientras que el segundo incorpora la variabilidad estratigráfica y la deformabilidad de cada capa, representando de manera más realista el comportamiento del sistema suelo-pilote, especialmente en perfiles heterogéneos o con capas blandas.

En general, ambos enfoques resultan complementarios para el diseño de cimentaciones profundas: el método analítico es útil para estimaciones preliminares y perfiles homogéneos, mientras que el análisis computacional ofrece mayor precisión en condiciones geotécnicas complejas con presencia de capas cohesivas críticas, fricción negativa o variaciones importantes de rigidez. Sin embargo, el estudio presenta limitaciones debido a que la validación se basó únicamente en comparaciones entre modelos analíticos y simulaciones computacionales, sin datos experimentales o mediciones de campo. Por ello, se recomienda que futuras investigaciones incorporen ensayos e instrumentación de campo para validar los resultados y mejorar la calibración de los modelos empleados.

REFERENCIAS

- [1] B. M. Das, *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*, 7th ed. México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V., 2012.
- [2] M. W. O'Neill and L. C. Reese, *Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods*. Washington, DC: National Highway Institute, 1999.
- [3] B. H. Fellenius, *Unified Design of Piles and Pile Groups*. Vancouver, BC, Canada, 2004.
- [4] D. T. Bergado, M. C. Alfaro and B. M. Pradhan, *Improvement of Soft Ground*. London, U.K.: Routledge, 2001.
- [5] P. W. Mayne and F. H. Kulhawy, *Foundations in Engineering Practice*. New York, NY, USA: Wiley, 1982.
- [6] D. T. Bergado, *Pile Foundation Analysis and Design*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2019.
- [7] H. G. Poulos and E. H. Davis, *Pile Foundation Analysis and Design*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1980.
- [8] Melese, F. W., & Gebregziabher, H. F. (2021). Behavior of structurally non-connected settlement reducing piles under raft foundation (Preprint). <https://www.researchgate.net/publication/357974528>
- [9] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, 7th ed. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2010.
- [10] K. Terzaghi and R. B. Peck, *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York, NY, USA: Wiley, 1967.
- [11] D. M. Potts and L. Zdravković, *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory*. London, U.K.: Thomas Telford Publishing, 1999.
- [12] D. P. Coduto, M. R. Yeung and W. A. Kitch, *Foundation Design: Principles and Practices*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2016.
- [13] M. Tomlinson and J. Woodward, *Pile Design and Construction Practice*, 6th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
- [14] R. F. Shen *et al.*, "Negative skin friction on piles," in *Physical Modelling in Geotechnics*, 2022.
- [15] H. Bian *et al.*, "Bearing characteristics and negative skin friction of pile foundations," *Water*, MDPI, 2024.
- [16] M. F. Randolph, "Science and empiricism in pile foundation design. Géotechnique", 2003.