

Comparación Analítica de la Resistencia a la Extracción entre Anclajes Helicoidales y Anclajes Pretensados

Analytical Comparison of Pullout Resistance between Helical Anchors and Prestressed Anchors

Gilberto MONTIEL¹, y Erika BERNAL²

¹SoilSolution, México

RESUMEN: A través de modelación analítica y numérica, se realiza una comparación de la capacidad de carga a tensión entre los anclajes helicoidales y los anclajes pretensados tipo bulbo embedidos en un suelo no cohesivo. También se exploran los aspectos geométricos y mecánicos de ambos sistemas de anclajes, destacando sus diferencias y similitudes.

ABSTRACT: Through analytical and numerical modeling, a comparison of the tension load capacity between helical anchors and bulb-type prestressed anchors embedded in a non-cohesive soil is carried out. The geometric and mechanical aspects of both anchoring systems are also explored, highlighting their differences and similarities.

1 INTRODUCCIÓN

Los anclajes se utilizan para proporcionar estabilidad y seguridad a diversas obras de ingeniería civil, desde excavaciones profundas hasta estabilización de taludes. Pueden ser de diferentes tipos y su elección depende de las condiciones geotécnicas del suelo, principalmente. Sin embargo, hoy en día juegan otros factores decisivos para elegir el sistema ideal, por ejemplo, la rapidez de instalación y el costo del sistema. Para eficientar dicho proceso constructivo, se desarrollaron los anclajes helicoidales, que a diferencia del sistema de pretensados, en lugar de tener que perforar, insertar torones, inyectar concreto y tensar el acero, los anclajes helicoidales se instalan a rotación en el suelo sin necesidad de prebarrenar e inyectar concreto.

El objetivo de este artículo es 1) validar una metodología de cálculo analítico para determinar la resistencia a la extracción de un anclaje helicoidal, mediante un método numérico y 2) realizar una comparativa de la resistencia a la extracción entre los anclajes helicoidales y pretensados.

2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ANCLAJES HELICOIDALES

2.1 Propiedades Geométricas

Los anclajes helicoidales constan de dos componentes principales: la sección tubular y las hélices de soporte (Figura 1).

A la sección con hélices se le pueden añadir extensiones tubulares para aumentar su longitud libre. Además, en la terminación del anclaje helicoidal se puede añadir una placa de reacción

(funcionamiento activo), como se ilustra en la Figura 2.

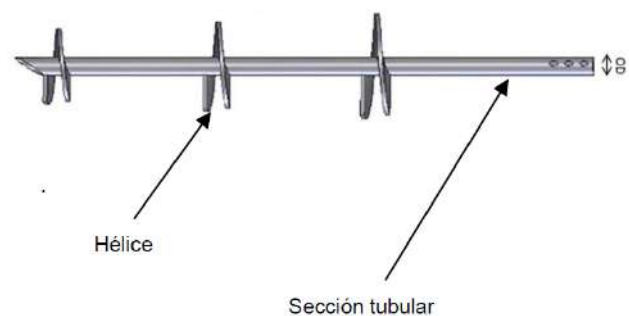


Figura 1. Esquema de un anclaje helicoidal.

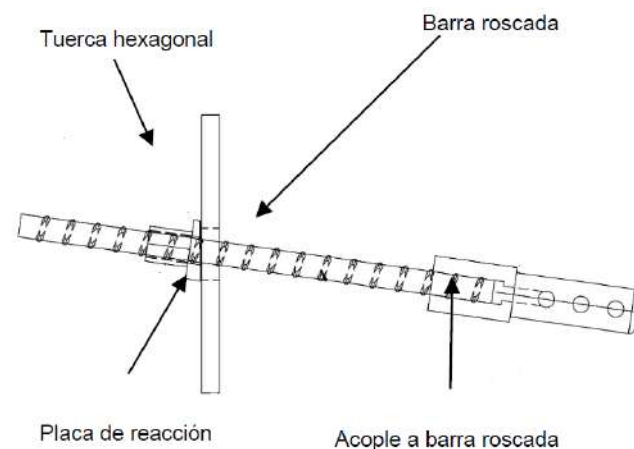


Figura 2. Esquema de placa de reacción.

Los diámetros exteriores disponibles para la sección tubular son los siguientes: 73.023 mm, 88.9

mm, 114.3 mm, 127 mm, 139.7 mm y 177.8 mm. Los espesores de la sección tubular varían desde los 4.826 mm hasta 12.65 mm. Los diámetros disponibles de las hélices son los siguientes: 203.2 mm, 254 mm, 304.8 mm, 355.6 mm y 406.4 mm. Los espesores disponibles son: 9.53 mm y 12.7 mm.

El espaciamiento entre hélices debe ser 3 veces el diámetro inmediato inferior (Figura 3).

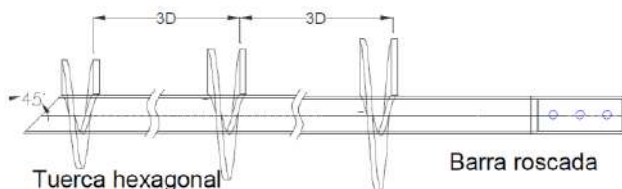


Figura 3. Espaciamiento entre Hélices

2.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas se dividen para dos tipos de anclajes helicoidales, tipo A y B.

Las propiedades mecánicas para la sección tubular del tipo A son las correspondientes al acero A-1018 Grado 80, y para las hélices son las correspondientes al acero A-1018 Grado 50.

Las propiedades mecánicas para la sección tubular del tipo B son las correspondientes al acero A-106 Grado B y para las hélices son las correspondientes al acero A-36.

Los anclajes helicoidales poseen un tratamiento anticorrosión llamado "Hot dip galvanization," que involucra un revestimiento de Zinc de 4 a 6 micras según la norma ASTM A123, proporcionando protección contra la corrosión por hasta 100 años.

3 PROCESO DE INSTALACIÓN DE LOS ANCLAJES HELICOIDALES

3.1 Torque de instalación

Los anclajes helicoidales no requieren perforación previa, ni inyección de lechada. Son modulares, recuperables, reutilizables y de fácil instalación; únicamente se necesita un equipo que proporcione energía hidráulica al equipo rotatorio y que registre el torque aplicado durante la instalación en tiempo real (Figura 4), lo que reduce al mínimo el personal, el equipo y los costos.

No se debe exceder el torque de instalación, ya que esto podría provocar la falla del elemento de acero.

La ecuación siguiente permite determinar el torque de instalación en función de la capacidad de carga:

$$T = \frac{Q_u}{K_t} \quad (1)$$

donde: T = torque de instalación, Q_u = Capacidad de carga última, K_t = Factor de torque.

En la Tabla 1 se muestra nuestro factor de torque para los diferentes diámetros de sección tubular.



Figura 4. Equipo de instalación.

Tabla 1. Factor de torque, K_t .

Diámetro externo (mm)	K_t
73.023	8-9
88.9	7-8
114.3	6-7
127	6-7
139.7	5-6
177.8	4-5

A medida que aumenta el número de hélices y la profundidad, aumenta proporcionalmente el torque de instalación. Por lo tanto, el torque de instalación limita la profundidad y el número de hélices en el diseño. Sin embargo, se cuentan con diferentes secciones tubulares para adaptarse al diseño.

4 VALIDACIÓN NUMÉRICO - ANALÍTICA DE UNA PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE UN ANCLAJE HELICOIDAL.

4.1 Modelado mediante método de elementos finitos.

Para esta modelación de prueba de extracción se utilizó el software Plaxis 3D, se consideró un suelo no cohesivo (arena limosa), las propiedades del suelo están indicadas en Tabla 2 y las propiedades del anclaje helicoidal indicadas en la Tabla 3.

Tabla 2. Propiedades para suelo homogéneo.

UG-1	γ (kN/m ³)	C' (kPa)	ϕ°	E (kPa)	ν	k_α
SM	16	1	38	25,000	0.35	0.3843

Tabla 3. Propiedades para anclaje helicoidal.

A-1018 Grado 80	γ (kN/m ³)	E (kPa)	ν
A80	78	2.07E+12	0.2

Se utilizó el modelo constitutivo Mohr Coulomb con análisis drenado para el suelo y el modelo constitutivo Lineal elástico no poroso para el anclaje helicoidal. No se consideró nivel freático. El tipo de análisis es de tipo plástico, la carga aplicada para extracción es de 325 kN.

En la Figura 5 se muestra una porción de suelo fuera del plano (espesor de 2 m). El anclaje propuesto tiene un ángulo de 20° respecto a la horizontal, 8 m de longitud y 3 hélices, cuyos diámetros son 203.2 mm, 254mm y 304.8mm.

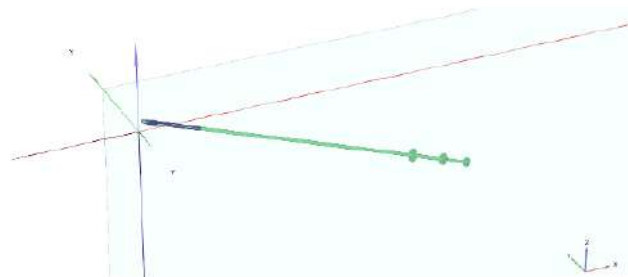


Figura 5. Modelamiento de anclaje helicoidal.

Para la interacción entre el suelo y pared lateral de la sección tubular se consideró un ángulo de fricción interna del suelo al 50%. En la Figura 6 se pueden apreciar las interfaces consideradas.



Figura 6. Interfaces en el anclaje helicoidal.

La discretización del modelo se muestra en la Figura 7 y los puntos plásticos después de la falla se ilustran en la Figura 8, a un factor de aplicación de carga de 0.85. En otras palabras, la falla ocurrió al alcanzar el 85% de los 325 kN aplicados

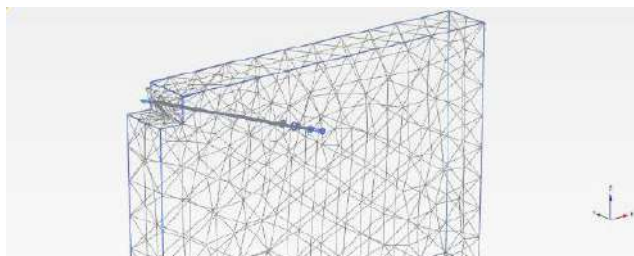


Figura 7. Discretización del modelo.

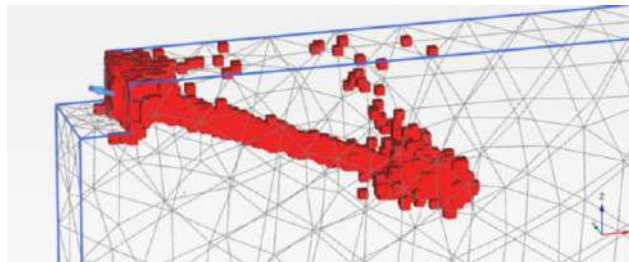


Figura 8. Puntos plásticos tras fallar el anclaje.

En la Figura 9 se muestran los desplazamientos del anclaje helicoidal en un gráfico de temperaturas. El máximo desplazamiento es de 0.115 m.

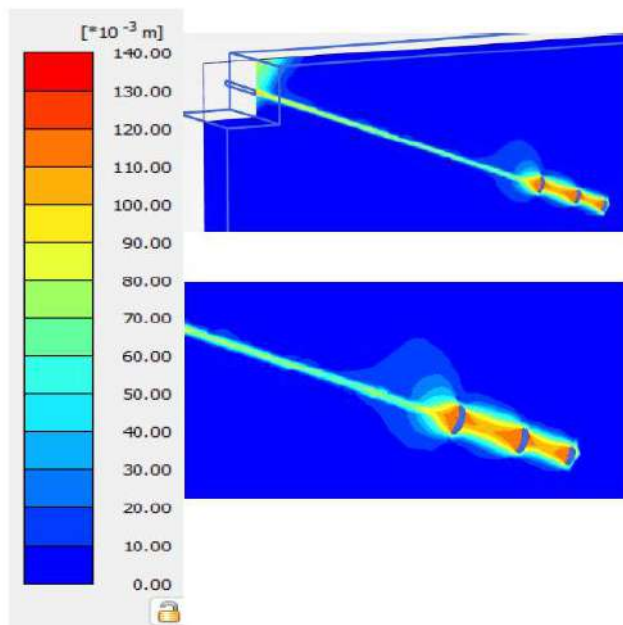


Figura 9. Desplazamientos en anclaje helicoidal.

Esta prueba de extracción nos ayudará a validar el método analítico llamado modelo de corte cilíndrico, que se describe en la siguiente sección.

4.2 Evaluación analítica de la resistencia al arrancamiento llamado modelo de corte cilíndrico.

De acuerdo con el manual de Helical Pile Foundation Design Guide3 se recomienda el uso de la ecuación de capacidad de carga a tensión mediante el método de modelo de corte cilíndrico para determinar la resistencia a la extracción del anclaje (Figura 10).

La ecuación para determinar la capacidad de carga a tensión mediante el modelo de corte cilíndrico es la siguiente:

$$Q_u = \pi DL(C + k\sigma'_v \tan \phi) + A_h(N_c + q'N_q) \quad (2)$$

donde: D = promedio de diámetros en hélices, L = distancia total entre la hélice superior e inferior, K = coeficiente de tierra en reposo, σ'_v = esfuerzo efectivo, ϕ = ángulo de fricción interna, A_h = área de la hélice superior.

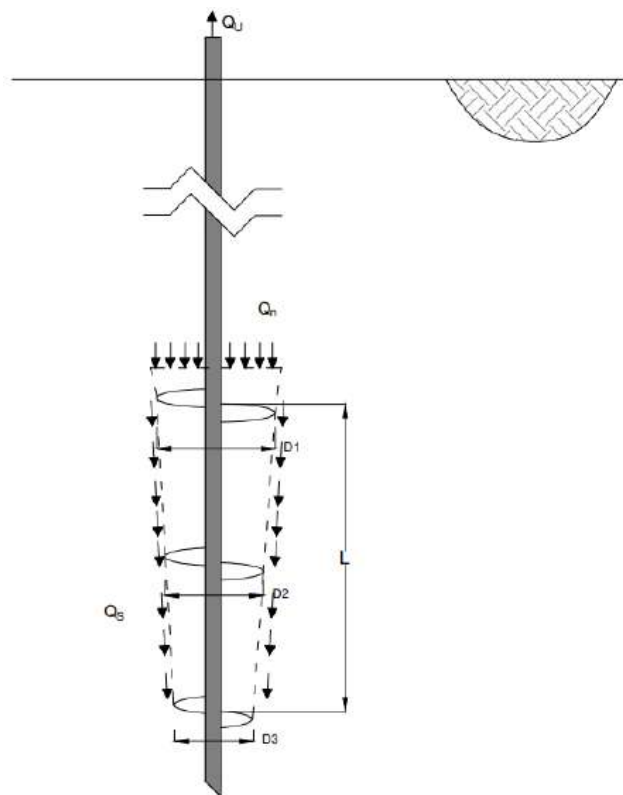


Figura 10. Modelo de corte cilíndrico.

Se empleó el software DeepFND para determinar la resistencia a la extracción de un anclaje helicoidal mediante el modelo de corte cilíndrico ya que también permite considerar la adherencia lateral de la sección tubular. En el caso del método de elementos finitos, se incluyeron ambas resistencias, por lo tanto, para determinar esto con el software DeepFND, consideramos ambas resistencias. La Figura 11 muestran los resultados obtenidos con el modelo de corte cilíndrico.

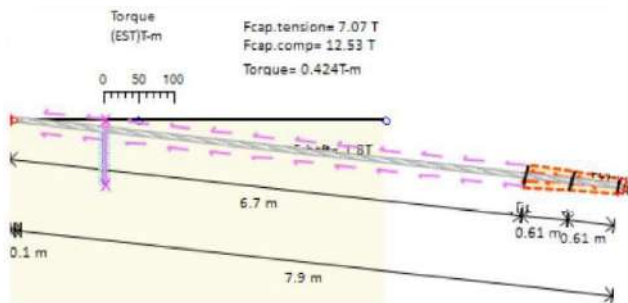


Figura 11. Esquema mediante DeepFND.

La capacidad de carga a tensión obtenido con el modelo de corte cilíndrico más la resistencia lateral (adherencia al 50%) de la sección tubular fue de 70.7 kN. El software también puede calcular el torque de instalación, que en esta configuración es de 3.77 kN-m.

Los resultados anteriores se utilizan como valores de entrada en el análisis de equilibrio límite. Sin embargo, recomendamos no utilizar la resistencia lateral que esté dentro de los círculos de falla potenciales.

4.3 Gráfico de comparación de resultados numérico-analítico.

En la Figura 12, la línea azul representa el análisis mediante el método de elementos finitos, que indica que el anclaje falló a una carga de 276 kN con un desplazamiento de 0.115 m (punto 3). Esta deformación no es admisible para proyectos de retención. Al ubicar en el gráfico la capacidad de carga a la tensión obtenida en el modelo de corte cilíndrico, observamos en el punto 1 de la gráfica una carga de 70.7 kN, correspondiente a una deformación de 0.028 m con un factor de seguridad de 1. Sin embargo, las referencias como la norma BS8081 (1989) recomiendan usar un factor de seguridad de 2 a 3, que da origen al punto 2 de la gráfica, donde se aprecia una carga de 35.35 kN y una deformación de 0.014m.



Figura 12. Gráfica carga – desplazamiento.

Derivado del análisis de la Figura 12 se acepta que en el diseño de estructuras de retención se utilice el modelo de corte cilíndrico y un factor de seguridad de 2.

Este gráfico muestra que la resistencia para generar una extracción del anclaje helicoidal es elevada, pero se genera ante deformaciones significativas. Por lo tanto, debemos usar cargas dentro del rango elástico y deformaciones permisibles. Es pertinente utilizar el modelo de corte cilíndrico para estimar la capacidad ante extracción, siendo conservador tanto en carga como en deformaciones.

A pesar de contar con modelaciones mediante elementos finitos, es recomendable realizar pruebas en campo para verificar la capacidad ante extracción.

5 COMPARACIÓN ANALÍTICA ENTRE ANCLAJES HELICOIDALES Y ANCLAJES PRETENSADOS

5.1 Teoría de anclajes pretensados

Existen varios tipos de anclajes pretensados y esto varía en función de la presión con la que el bulbo es inyectado. Existen bulbos por gravedad, bulbos de inyección repetitiva y de inyección única. En los bulbos que se instalan a presión dependerá del material que los rodea para elegir el método y presión correcta. En este caso la teoría va enfocada a aquellos bulbos que lleven presiones de inyección menores a 1000 kPa. Esta presión suele usarse en suelos y las presiones mayores suelen emplearse en roca. Dejando claro que los anclajes con presión de inyección son mayormente usados en la industria de la construcción, por lo que es importante evidenciar que los anclajes helicoidales compiten eficazmente en suelos (Barley y Ostermayer, 2003).

Varios autores como Barley y Ostermayer (2003) han estudiado el comportamiento de los anclajes de bulbo y han descrito una pérdida progresiva de adherencia, ya que el bulbo se deforma con el tiempo, como se muestra en la Figura 13.

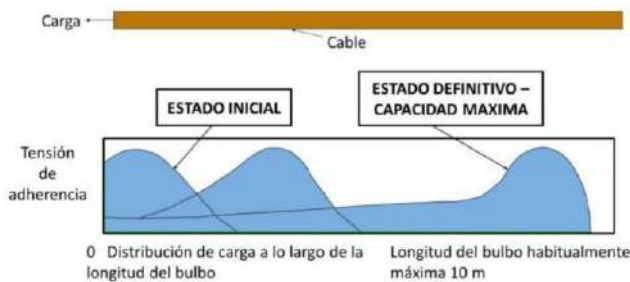


Figura 13. Pérdida progresiva de adherencia.

Debido a este fenómeno se introdujo el término de “eficiencia” por Barley en 2003. Además, se demostró que los anclajes con longitudes de bulbo mayores a 10 metros ya no tenían un aumento de capacidad debido a las bajas eficiencias que demostraban.

Para suelos no cohesivos se introdujo la siguiente ecuación

$$T_{ult} = \pi D L \tau_{ult} f_{eff} \tag{3}$$

$$f_{eff} = 1.6L^{-0.57} \tag{4}$$

donde: T_{ult} = es la carga ultima ante extracción, L = longitud de bulbo, D = diámetro de bulbo y f_{eff} = factor de eficiencia.

El valor de τ_{ult} suele determinarse mediante la adherencia lateral causada por el esfuerzo efectivo, esta fórmula es aplicable para anclajes que tienen una inyección por gravedad, es decir el bulbo adopta la forma de la perforación.

La Norma Británica BS-8081 menciona que para suelos sin cohesión con presiones de inyección bajas <1000 kPa puede emplearse la siguiente ecuación.

$$T_{ult} = L n \tan \phi' f_{eff} \tag{5}$$

donde: T_{ult} = es la carga última ante extracción, L = longitud de bulbo, n = es el valor de resistencia ante arrancamiento unitario, para arenas es de 130 a 165 kN/m, para gravas el valor es de 400 a 600 kN/m, ϕ' = es el ángulo de fricción interna y f_{eff} = factor de eficiencia. Se debe evitar ejercer presiones de inyección mayores a 1000 kPa, ya que esto puede resultar en pérdida de fluido debido a la rotura del bulbo.

5.2 Ejercicio de comparativo

Se analiza un anclaje tipo bulbo con una longitud máxima de 10 metros a una inclinación de 20° respecto a la horizontal (Figura 14).

Basados en la norma británica BS-8081 para suelos no cohesivos, usando un factor $n=165$ kN/m el resultado para la tensión última es de $T_{ult}=265$ kN, considerando las mismas propiedades geotécnicas aplicadas en la Tabla 2. La longitud libre es de 7 m y la del bulbo 10 m, longitud total de anclaje 17m.

Para resolver la misma configuración anterior, pero con un anclaje helicoidal se recurrió al modelo de corte cilíndrico, con el cual se determinó una configuración con una sección tubular de 73.023 mm, con espesor de 8.3 mm y 6 hélices con los siguientes diámetros: 203.2 mm, 254 mm, 304.8 mm, 355.6 mm, 406.4 mm y 406.4 mm; para obtener una capacidad máxima de extracción de 377.6 kN, con un torque de instalación de 15.78 kN-m. Por lo tanto, el anclaje helicoidal supera al convencional ante arrancamiento en un suelo arenoso y con una longitud total de 12m (Figura 15).

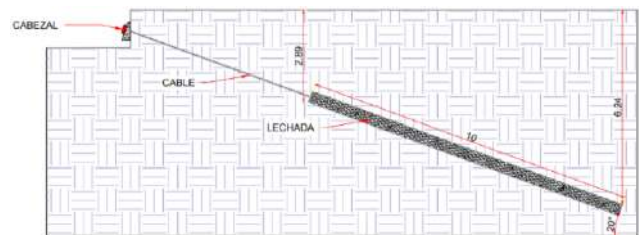


Figura 14. Esquema del anclaje tipo bulbo.

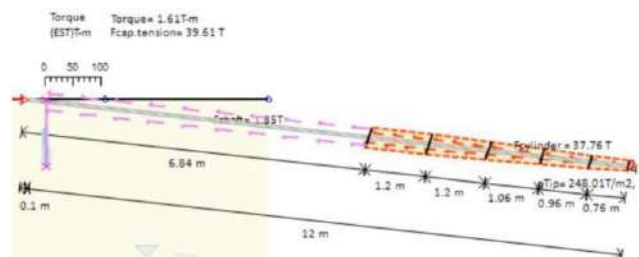


Figura 15. Tult mediante Software DeepFND.

Los resultados de este ejercicio comparativo se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de capacidad ante arrancamiento de ambos sistemas de anclaje.

	Anclaje Helicoidal	Anclaje Pretensado
Resistencia a la extracción	377 kN	265 kN
Longitud total	12m	17m

CONCLUSIONES

Este artículo demuestra que el uso del modelo de corte cilíndrico es adecuado para estimar la capacidad de carga a tensión en un anclaje helicoidal. Dicha capacidad puede emplearse en el uso de estados de equilibrio límite y estructuras de retención.

Teóricamente, los anclajes helicoidales demuestran resistir más ante arrancamiento que los anclajes pretensados de un único bulbo en materiales arenosos.

La capacidad ante arrancamiento está principalmente soportada por las hélices, sin embargo, el número de hélices que se pueden colocar en el sistema está regido por el torque de instalación de la sección tubular propuesta.

Además de ventajas en resistencia, los anclajes helicoidales presentan beneficios adicionales en tiempos de construcción y emisión de bonos de carbono, al eliminar pasos intensivos de tiempo y energía.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Bentley Software por darnos un periodo de prueba de Plaxis 3D con el cual fue posible realizar dicho artículo con fines académicos.

REFERENCIAS

- British Standard Institution (1989). Ground Anchorags. BS8081, BSI, London, England.
- Barley, A.D; Ostermayer, H. (2003), Ground Anchors, Geotechnical Handbook. Ernst & Sohn.
- Deep Foundations Institute. (2019), Helical Pile Foundations Design Guide, Hawthorne, New Jersey.
- Weerasinghe, R.B. (1993). The behaviour of Anchorages in Weak Mudstone. PhD Tesis, University of Bradford.
- Hubbell Power Systems, Inc. (2023). Chance Technical Design Manual, 5th Edition, Missouri, USA.
- Bentley Advancing Infraestructure (2003), Material Models Manual 3D, Plaxis 3D.