

# Cálculo de pilotes a tracción mediante elementos finitos en torres de líneas de transmisión

## Piles uplift resistance calculation by finite elements method for transmission line towers

**Pablo Ruiz-Terán, Belén Martínez-Bacas, José Antonio Barco y Alberto Fuentes**  
*Departamento de Geotecnia, Ferrovial Construcción, España, pruziteran@ferrovial.com*

**RESUMEN:** Tradicionalmente, en Chile, el cálculo de pilotes a tracción en torres de líneas de transmisión se realiza a través del método del cono truncado y del método de Meyerhof y Adams. El método del cono es un método empírico que supone que la superficie de rotura es un cono de tierras alrededor del pilote, según una directriz que parte de su base con un ángulo  $\theta$ . La resistencia al levantamiento está dada por el peso del pilote y del suelo dentro del cono y no tiene en cuenta la resistencia al corte del terreno a lo largo del plano de rotura. El método de Meyerhof y Adams propone una superficie de rotura curvada e incorpora la resistencia del terreno a lo largo de dicha superficie. Se propone como método alternativo a los métodos tradicionales el análisis numérico mediante el programa de elementos finitos PLAXIS 3D. Se presentan y se comparan los resultados obtenidos para dos casos concretos mediante el programa PLAXIS 3D y el método de Meyerhof y Adams. La conclusión principal es que, en la mayoría de los casos, el análisis mediante elementos finitos más restrictivo que el de Meyerhof y Adams. Adicionalmente, se concluye que la diferencia entre ambos métodos es mayor en el material granular que en el cohesivo y que aumenta al incrementar el diámetro del pilote.

**ABSTRACT:** Normally in Chile, the uplift resistance of the piles in transmission line towers is obtained with the cone method and the Meyerhof and Adams method. The cone method is an empiric one that assumes that the failure surface is a soil cone around the pile, following the line from the base with an angle  $\theta$ . The uplift resistance is given by the weight of the pile and the soil within the cone and doesn't consider the soil shear resistance along the failure surface. The Meyerhof and Adams method provides a curved failure surface and considers the soil resistance along this surface. An alternative method to the conventional methods is proposed using the finite-elements software PLAXIS 3D. Results are given and compared for two specific cases, obtained by the software PLAXIS 3D and the Meyerhof and Adams method. The main conclusion is that, in most cases, finite element analysis is more restrictive than that of Meyerhof and Adams. Additionally, it is concluded that the difference between both methods is greater in a granular material than in a cohesive material and that it is bigger when the pile diameter increases.

**PALABRAS CLAVE:** pilote, resistencia a tracción, torres de líneas de transmisión, método del cono, elementos finitos, PLAXIS.

**KEYWORDS:** pile, uplift resistance, transmission line towers, cone method, finite elements, PLAXIS.

## 1 INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, en Chile, el cálculo de pilotes a tracción en torres de líneas de transmisión se realiza a través del método del cono truncado y del método de Meyerhof y Adams 1968.

El método del cono es un método completamente empírico que supone que la superficie de rotura es un cono de tierras alrededor del pilote, según una directriz que parte de su base con un ángulo  $\theta$ . Este método supone que la resistencia al levantamiento está dada solo por el peso del pilote y del suelo dentro del cono y de la base del pilote y no tiene en cuenta la resistencia al corte del terreno a lo largo del plano de rotura.

El ángulo  $\theta$  constituye un parámetro de difícil justificación geotécnica, que varía según el tipo de suelo. Los valores se deberían elegir de acuerdo con la experiencia adquirida a través de ensayos de campo. Cuando el ángulo del cono es cero, el método se convierte en un límite inferior muy conservador de la capacidad frente a tracción ya que no tiene en cuenta las tensiones y la resistencia del suelo. Al incrementar el ángulo del cono por encima de cero lo que se hace es intentar incorporar las tensiones y la resistencia del suelo a través de una sustitución equivalente de peso de suelo. Si se pudiese hacer esta equivalencia el resultado sería idéntico.

El método de Meyerhof y Adams es un método más evolucionado que el del cono ya que propone una superficie de rotura curvada e incorpora la resistencia del terreno a lo largo de dicha superficie. Está soportado a través de modelos a escala reducida y ensayos a escala real.

Existen otros métodos de cálculo como el de superficie de rotura cilíndrica o el de una combinación de ésta con una superficie curvada.

Se propone como método alternativo para el cálculo de pilotes a tracción en torres de líneas de transmisión el análisis numérico mediante elementos finitos. Se presentan y se comparan los resultados obtenidos para dos casos concretos mediante el programa de elementos finitos PLAXIS 3D y el método de Meyerhof y Adams.

## 2 MÉTODO DEL CONO TRUNCADO

El método de cono se basa en considerar que la capacidad frente a arrancamiento se puede obtener como la suma del peso de pilote y del peso de suelo adherido a éste, definido por una superficie cuya directriz parte de la base del pilote con un ángulo  $\theta$ .

Transec 2013 propone diferentes valores del ángulo  $\theta$  (Tabla 1) para las siguientes categorías de suelos y rocas:  
Tabla 1. Parámetros de cálculo en función del tipo de roca o de suelo (Transec 2013).

Tipo de Suelo	Forma de Trabajo	Cohesión (t/m <sup>2</sup> )	Angulo de Fricción (°)	Angulo del Cono de Arrancamiento (°)	Peso Unitario del Suelo al Arrancamiento	Peso Unitario del Suelo al Aplastamiento	Peso Unitario del Hormigón al Arrancamiento	Peso Unitario del Hormigón al Aplastamiento	Presión Admisible Neta Vertical (t/m <sup>2</sup> )	Presión Admisible Neta Horizontal (t/m <sup>2</sup> )
					(t/m <sup>2</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )
1	Anclaje	-	-	30	2.0	2.3	2.3	2.4	200	150
2	C y F	6.0	35	40	2.0	2.0	2.3	2.4	60	50
3	F	0.0	35	30	2.0	2.0	2.3	2.4	40	30
4	F	0.0	30	30	1.6	2.0	2.3	2.4	20	15
	C	7.0	0	30	1.6	2.0	2.3	2.4	20	15
5	F	0.0	35	40	1.0	2.0	1.3	2.4	30	25
	C	4.0	30	40	1.0	2.0	1.3	2.4	30	25
6	F	0.0	30	30	1.0	2.0	1.3	2.4	15	-
	C	5.0	0	30	1.0	2.0	1.3	2.4	15	-
7	C	2.5	0	20	1.0	1.6	1.3	2.4	5	-

C: Cohesivo - F: Friccionante

- Suelo tipo 1: roca sana moderadamente agrietada.
- Suelo tipo 2: roca sana agrietada, roca parcialmente descompuesta firme, gravas o arenas densas cementadas. Nivel freático estático máximo bajo el nivel inferior de la cimentación.
- Suelo tipo 3: roca completamente descompuesta de consistencia firme, gravas limpias de compactidad media y alta, gravas gruesas arcillosas o limosas firmes. Nivel freático estático máximo bajo el nivel inferior de la cimentación.
- Suelo tipo 4: gravas limpias sueltas, arenas, gravas finas y arenas arcillosas o limosas, limos o arcillas de consistencia media o firme. Nivel freático estático máximo bajo el nivel inferior de la cimentación.
- Suelo tipo 5: suelo tipo 2 con nivel freático estático máximo a cota del nivel inferior de la cimentación o sobre ella.
- Suelo tipo 6: suelo tipo 3 ó 4 con nivel freático estático máximo a cota del nivel inferior de la cimentación o sobre ella.
- Suelo tipo 7: arenas arcillosas o limosas, limos o arcillas de consistencia media a blanda. Nivel freático estático máximo a cota del nivel inferior de la cimentación o sobre ella.

Este método supone que la resistencia al levantamiento está dada solo por el peso del suelo dentro del cono y de la base y no tiene en cuenta la resistencia al corte del terreno a lo largo del plano de rotura (Figura 1).

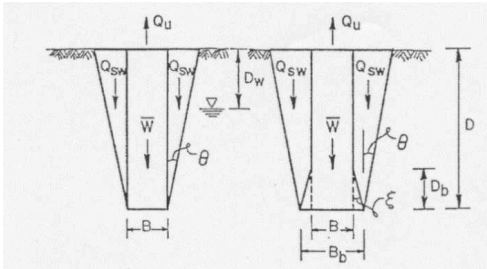


Figura 1. Pilotes a tracción (Adaptado de Engineers 2001).

En el caso de presencia de nivel freático se considera su efecto mediante el empleo de las densidades sumergidas en la zona por debajo del mismo.

Al considerar un suelo homogéneo, la capacidad máxima de arrancamiento Qu se puede calcular como:

$$Q_u = W + Q_{sw} \quad (1)$$

donde W es el peso efectivo del pilote y Qsw es el peso efectivo del cono de suelo adherido al pilote.

En el caso de presencia de nivel freático se considera su efecto mediante el empleo de las densidades sumergidas en la zona por debajo del mismo.

En el caso de un pilote de eje recto (Figura 1a), los pesos efectivos W y Qsw se pueden calcular como:

$$W = \frac{\pi * B^2}{4} * (\gamma_h * D_w + \gamma_{sum} * (D - D_w)) \quad (2)$$

17<sup>th</sup> Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (SMGE), and 2<sup>nd</sup> Latin-American Regional Conference of the International Association of Engineering Geology and the Environment (IAEG), La Serena Chile, 2024.

$$Q_{sw} = \pi * \gamma_{sum} * D * \left( \frac{B^2}{2} + \frac{B * D * \tan \theta}{2} + \frac{D^2 * \tan^2 \theta}{3} \right) \quad (3)$$

donde B es el diámetro del pilote,  $\gamma_h$  es la densidad del hormigón, Dw es la profundidad del nivel freático,  $\gamma_{sum}$  es la densidad sumergida del hormigón, D es la longitud del pilote,  $\gamma_{sum}$  es la densidad sumergida del suelo, B es el diámetro del pilote y  $\theta$  es el ángulo que forma la superficie del cono con la vertical.

En el caso de un pilote con la base ensanchada (Figura 1b), los pesos efectivos W y Qsw se pueden calcular como:

$$W = \frac{\pi * B^2}{4} * (\gamma_h * D_w + \gamma_{sum} * (D - D_w)) + \pi * (\gamma_{sum} - \gamma_{sum}) \quad (4)$$

$$Q_{sw} = \pi * \gamma_{sum} * D * \left( \frac{B_b^2}{2} + \frac{B_b * D * \tan \theta}{2} + \frac{D^2 * \tan^2 \theta}{3} + \frac{B_b^2 - B^2}{4} \right) \quad (5)$$

donde Db es la longitud de base ensanchada del pilote,  $\xi$  es el ángulo que forma la superficie de base ensanchada con la vertical y Bb es el diámetro mayor de la base ensanchada.

### 3 MÉTODO DE MEYERHOF Y ADAMS

El método de Meyerhof y Adams es un método más evolucionado que el del cono ya que propone una superficie de rotura curvada e incorpora la resistencia del terreno a lo largo de dicha superficie. Está soportado a través de modelos a escala reducida y ensayos a escala real.

Se distingue entre dos casos: pilotes someros y pilotes profundos (Figura 2).

Los pilotes someros son aquellos en los que la superficie de rotura llega hasta la superficie del terreno (Figura 2a) y los pilotes profundos son aquellos en los que dicha situación no se produce (Figura 2b). Dicha diferencia se tiene en cuenta en el análisis limitando la extensión vertical H de la superficie de rotura y considerando una sobrecarga equivalente al suelo situado por encima del nivel de la superficie de rotura.

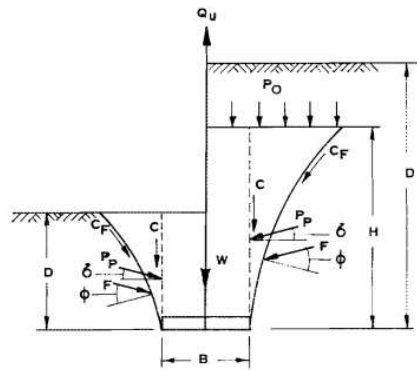


Figura 2. Cálculo de pilotes a tracción (Meyerhof y Adams 1968).

El valor de H se puede obtener en función del ángulo de rozamiento  $\phi$  del suelo (Tabla 2).

Tabla 2. Extensión vertical de la superficie de rotura en función del ángulo de rozamiento interno del suelo (Meyerhof y Adams 1968).

Friction at Depth H

En el caso de los pilotes someros, la capacidad máxima de arrancamiento  $Q_u$  se puede calcular como:

$$Q_u = \pi * c * B * D + s * \frac{\pi}{2} * \gamma_{sum} * B * D^2 * K_u * \tan \delta \quad (6)$$

$$s = 1 + m * \frac{D}{B} \leq 1 + m * \frac{H}{B} \quad (7)$$

donde  $c$  es la cohesión del suelo,  $s$  es un factor de forma,  $K_u$  es un coeficiente que es función del ángulo de rozamiento del suelo (Figura 3) y  $m$  es un factor que es función del ángulo de rozamiento  $\phi$  del suelo (Tabla 3).

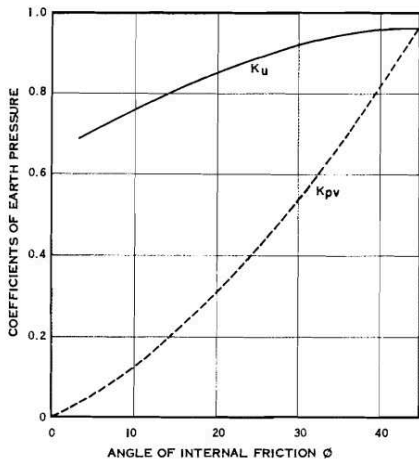
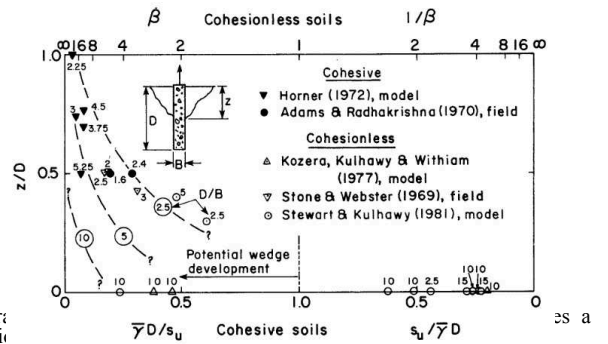


Figura 3. (Meyerhof)

Tabla 3. Factor  $m$  y máximo valor del factor de forma  $s$  en función del ángulo de rozamiento interno del suelo (Meyerhof y Adams 1968).

Figura 4. Desarrollo de la superficie de cizalla adyacente a un pilote (Kulhawy et al 1983).

Sin embargo, en algunos casos las cizallas de Riedel constituyen un modo de falla cinemáticamente posible antes de que se desarrolle una cizalla de desplazamiento continuo. En entonces cuando se produce una superficie de rotura compuesta, representada por un cono de suelo cerca de la superficie del suelo y un cilindro debajo (Figura 5).



A través de la figura anterior es posible calcular la profundidad  $z$  del cono de rotura.

En el caso de los materiales granulares, se calcula a partir de la relación  $D/B$  y del parámetro  $\beta$ :

$$\beta = K_0 * \tan \delta \quad (9)$$

donde  $K_0$  es el coeficiente de empuje al reposo y  $\delta$  es el ángulo de rozamiento suelo-pilote.

En el caso de los materiales cohesionados, se calcula a partir de la relación  $D/B$  y del parámetro  $(\gamma_{sum} * D) / S_u$ , donde  $S_u$  es la

Friction angle $\phi$	20°	25°	30°	35°	40°	45°	48°
Coefficient $m$	0.05	0.1	0.15	0.25	0.35	0.5	0.6
Max factor $s$	1.12	1.30	1.60	2.25	3.45	5.50	7.60

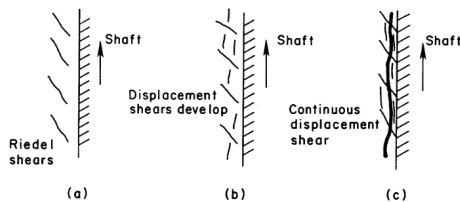
que  $l$  (Figura 6).

En el caso de los pilotes profundos, la capacidad máxima de arrancamiento  $Q_u$  se puede calcular como:

$$Q_u = \pi * c * B * H + s * \frac{\pi}{2} * \gamma * B * (2 * D - H) * H * \quad (8)$$

#### 4 MÉTODO DE KULHAWY

De acuerdo con Kulhawy et al 1983, cuando un pilote es sometido a tracción, inicialmente se desarrollan en el suelo lo que se conocen como cizallas de Riedel. Se producen a lo largo de planos en los que se alcanzan las condiciones de rotura de Mohr-Coulomb (Figura 4a). Al aumentar el desplazamiento de la cimentación y al no ser cinemáticamente posibles grandes desplazamientos a lo largo de las cizallas de Riedel, el suelo se ve obligado a desarrollar cizallas de desplazamiento (Figura 4b), lo que resulta en una cizalla de desplazamiento continuo (Figura 4c), definiendo una superficie de corte cilíndrica.



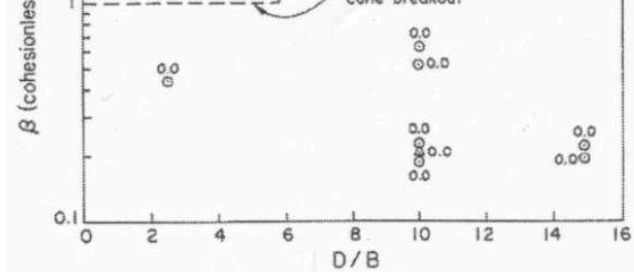


Figura 6. Límites orientativos para que se genere rotura de cono (IEEE Power Engineering Society y American Society of Civil Engineers 2001).

De acuerdo con Kulhawy et al 1983, la capacidad máxima de arrancamiento  $Q_u$  se puede calcular como:

$$Q_u = W + Q_{tu} + Q_{su} \quad (10)$$

donde  $Q_{tu}$  es la capacidad a tracción en la punta del pilote y  $Q_{su}$  es la capacidad a lo largo de la superficie de rotura.

Normalmente se asume que la capacidad a tracción en la punta es nula, aunque puede resultar conservador en determinadas ocasiones.

La resistencia de la punta puede desarrollarse tanto por tensión como por succión, siendo este un último un fenómeno que únicamente se puede dar en situaciones no drenadas.

Se podría desarrollar una tensión en la punta del pilote si el hormigón del pilote se adhiriese al suelo en la punta. En ese caso, la resistencia a la tracción del suelo se movilizaría sobre el área de la punta del pilote.

Sin embargo, generalmente y como consecuencia de los procedimientos de ejecución más habituales, lo que se tiene es una zona alterada y delgada de muy baja resistencia a la tracción en la punta. Por otra parte, la resistencia a la tracción del suelo normalmente es baja, siendo un porcentaje muy reducido de la resistencia a compresión. Ambas razones hacen que se entienda como prudente el asumir que la capacidad a tracción en la punta sea nula.

Por el contrario, si se realizase una limpieza muy cuidadosa de la punta del pilote y si el suelo tuviese una resistencia a tracción significativa, se podrían desarrollar tensiones en la punta que aumentarían la capacidad máxima de arrancamiento.

Cuando se genera una superficie de rotura compuesta, representada por un cono de suelo cerca de la superficie del suelo y un cilindro debajo, es necesario tener en cuenta que la capacidad lateral se reducirá porque el cono de suelo levantado con el pilote ya no ejerce una resistencia al corte con la superficie lateral del pilote. Por tanto, la capacidad lateral a tracción será inferior a la capacidad lateral a compresión.

De acuerdo con Kulhawy 1985, en el caso de los materiales granulares, la capacidad lateral a tracción  $Q_u$  se puede calcular como:

$$Q_{su} = \frac{2+\beta}{3\beta} * Q_{cu} \quad (11)$$

donde  $Q_{cu}$  es la capacidad a lateral compresión del pilote.

En el caso de los materiales cohesivos, se podría hacer un planteamiento similar sustituyendo  $\beta$  por  $S_u/(\gamma_{sum} * D)$ .

## 5 CÁLCULO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Se analizan dos casos prácticos concretos (Tabla 4), el primero correspondiente a un suelo granular y el segundo a un suelo cohesivo:

Tabla 4. Parámetros de cálculo Factor m y máximo valor del factor de forma s en función del ángulo de rozamiento interno del suelo (Meyerhof y Adams 1968).

Considerando diferentes diámetros de pilote y diferentes longitudes de empotramiento, se realiza el cálculo de la tracción admisible, considerando un coeficiente de seguridad de 1.65,

mediante el método de Meyerhof y Adams y mediante el programa de elementos finitos PLAXIS 3D y se comparan los resultados.

El modelo 3D generado corresponde a un cubo de 40 m de lado en cuyo centro se coloca el pilote con su interfaz.

El pilote se modeliza con un material elástico y lineal de densidad 24 kN/m<sup>3</sup>, módulo de deformación 30 GPa y coeficiente de Poisson 0.20.

El terreno se modeliza con un modelo de Mohr Coulomb empleando los parámetros de la Tabla 4.

El pilote se somete a un incremento de tracción hasta llegar a su tracción última y una vez obtenida ésta se aplica el factor de seguridad de 1.65 como minoración de los parámetros resistentes de cálculo del terreno para obtener la tracción admisible del pilote.

### 5.1 Suelo granular (B2, C2 y D2)

Se presentan a continuación las curvas que relacionan la capacidad máxima de arrancamiento de los pilotes con la longitud de empotramiento, para diferentes diámetros de pilote, obtenidas mediante el método de Meyerhof y Adams (Figura 7):



Figura 7. Capacidad máxima de arrancamiento ( $Q_u$ ) en función del diámetro de pilote (B) y de la longitud de empotramiento (D) para un suelo granular (B2, C2 y D2) obtenida con Meyerhof y Adams.

En el cálculo con PLAXIS 3D se obtienen superficies de rotura compuestas por un cono de rotura desarrollado cerca de la superficie y un cilindro de cortante desarrollado bajo el cono (Figura 8).

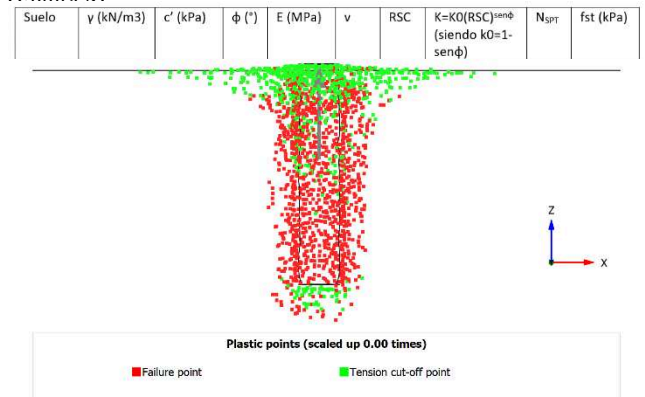


Figura 8. Superficie de rotura en un suelo granular (B2, C2 y D2) obtenida con PLAXIS 3D.

Esta forma de las superficies de rotura coincide con la indicada por Kulhawy et al 1983.

A modo de ejemplo se muestra el desarrollo de la resistencia por fuste desarrollada a lo largo de un pilote de 8.0 m de longitud y 1.5 m de diámetro (Figura 9):

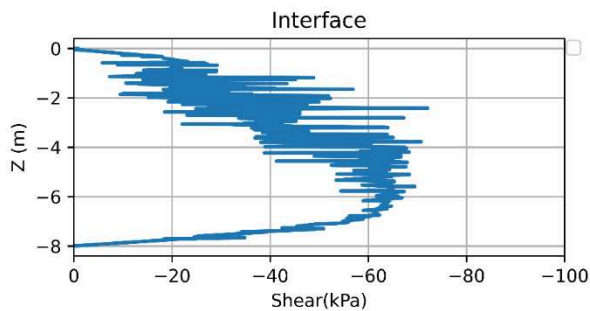


Figura 9. Resistencia por el fuste en un suelo granular (B2, C2 y D2) obtenida con PLAXIS 3D.

Se presentan a continuación las curvas que relacionan la capacidad máxima de arrancamiento de los pilotes con la longitud de empotramiento, para diferentes diámetros de pilote, obtenidas mediante PLAXIS 3D (Figura 10):

Figura 10. Capacidad máxima de arrancamiento ( $Q_u$ ) en función del diámetro de pilote (B) y de la longitud de empotramiento (D) para un suelo granular (B2, C2 y D2) obtenida con PLAXIS 3D.

Se puede ver que el cálculo mediante elementos finitos es más restrictivo que con Meyerhof y Adams, a excepción de longitudes de empotramiento muy reducidas. Además, se puede ver que al incrementar el diámetro del pilote la diferencia entre ambos métodos aumenta.

### 5.2 Suelo cohesivo (B1 y C1)

Se presentan a continuación las curvas que relacionan la capacidad máxima de arrancamiento de los pilotes con la longitud de empotramiento, para diferentes diámetros de pilote, obtenidas mediante el método de Meyerhof y Adams (Figura 11):

Figura 11. Capacidad máxima de arrancamiento ( $Q_u$ ) en función del diámetro de pilote (B) y de la longitud de empotramiento (D) para un suelo cohesivo (B1 y C1) obtenida con Meyerhof y Adams.

En el cálculo con PLAXIS 3D de nuevo se obtienen superficies de rotura compuestas por un cono de rotura desarrollado cerca de la superficie y un cilindro de cortante desarrollado bajo el cono (Figura 12):

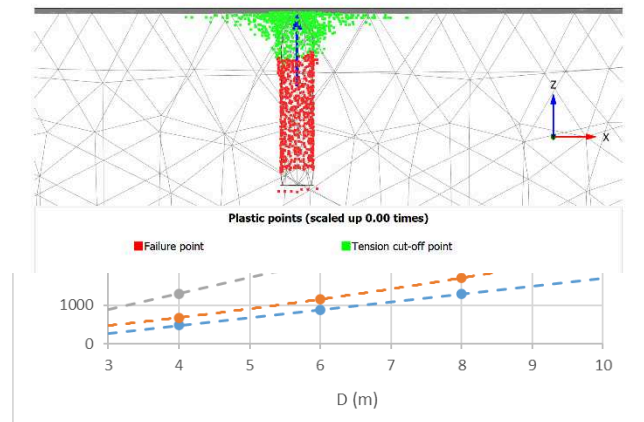


Figura 12. Superficie de rotura en un suelo cohesivo (B1 y C1) obtenida con PLAXIS 3D.

Esta forma de las superficies de rotura coincide con la indicada por Kulhawy et al 1983.

A modo de ejemplo se muestra el desarrollo de la resistencia por fuste desarrollada a lo largo de un pilote de 8.0 m de longitud y 1.5 m de diámetro (Figura 13):

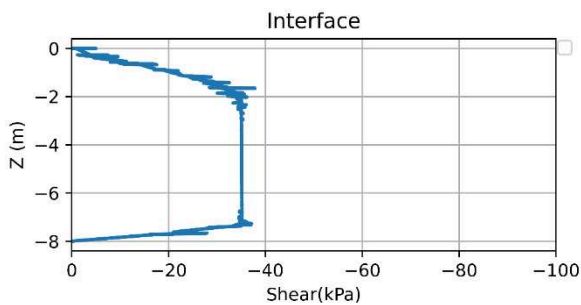


Figura 13. Resistencia por el fuste en un suelo cohesivo (B1 y C1) obtenida con PLAXIS 3D.

Se puede ver como la resistencia por fuste del pilote alcanza el límite fst entre los 2.0 y 7.3 metros de profundidad.

Se presentan a continuación las curvas que relacionan la capacidad máxima de arrancamiento de los pilotes con la longitud de empotramiento, para diferentes diámetros de pilote, obtenidas mediante PLAXIS 3D (Figura 14):

Figura 14. Capacidad máxima de arrancamiento ( $Q_u$ ) en función del diámetro de pilote ( $B$ ) y de la longitud de empotramiento ( $D$ ) para un suelo cohesivo (B1 y C1) obtenida con PLAXIS 3D.

Se puede ver que para diámetros de 0.8 y 1.0 m los resultados con ambos métodos son prácticamente idénticos. En cambio, para un diámetro de 1.5 m el cálculo mediante elementos finitos es algo más restrictivo que con Meyerhof y Adams, a excepción de con longitudes de empotramiento muy reducidas.

## 6 CONCLUSIONES

Tradicionalmente, en Chile, el cálculo de pilotes a tracción en torres de líneas de transmisión se realiza a través del método del cono truncado y del método de Meyerhof y Adams 1968.

Existen otros métodos de cálculo como el de Kulhawy et al 1983 en el que la superficie de rotura está compuesta por un cono de rotura desarrollado cerca de la superficie y un cilindro de cortante desarrollado bajo el cono.

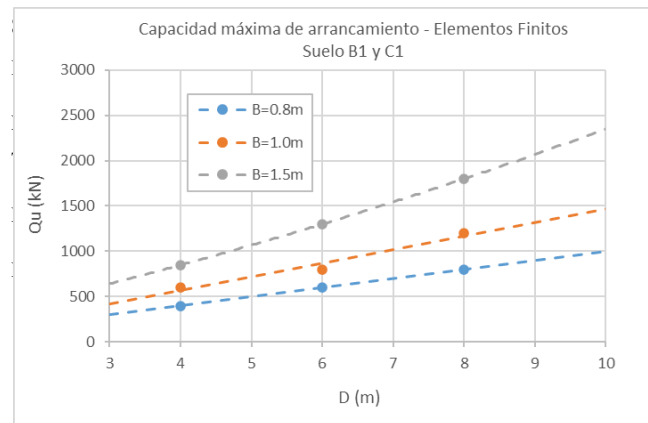
Se propone como método alternativo el análisis numérico mediante el programa de elementos finitos PLAXIS 3D.

Se presentan los resultados obtenidos para dos casos concretos y se comparan con los obtenidos mediante el método de Meyerhof y Adams. En el caso del material granular, el cálculo mediante elementos finitos es más restrictivo que con Meyerhof y Adams, a excepción de longitudes de empotramiento muy reducidas. Además, se puede ver que al incrementar el diámetro del pilote la diferencia entre ambos métodos aumenta. En el caso del material cohesivo, para diámetros de 0.8 y 1.0 m los resultados con ambos métodos son prácticamente idénticos. En cambio, para un diámetro de 1.5 m el cálculo mediante elementos finitos es algo más restrictivo que con Meyerhof y Adams, excepto para longitudes de empotramiento muy reducidas.

En ambos casos se puede ver que la forma de la curva de rotura obtenida coincide con la indicada por Kulhawy et al 1983.

## 7 AGRADECIMIENTOS

A D. Arturo Goldsack por compartir su sabiduría en el campo de las cimentaciones de torres para líneas de transmisión.



# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup> 2024 in Chile.*