

# Herramienta digital para análisis y diseño geotécnico de cimentaciones profundas y semiprofundas



# Abstract

In the present paper is presented in detail, how a digital tool developed with the help of Microsoft Excel 2007®, to facilitate analysis and geotechnical design of deep foundations and semi-deep based on data from a study of soils prior foundation types were analyzed: rigid block, short pile and pile length.

It was possible that the application takes into account the current regulations in the Code of Foundations of Costa Rica and the best option for the given conditions from the 19 cases analyzed fairly quickly, can review the case is chosen as better able to verify that the proposed dimensions are adequate, in addition to being able to create a report of such analysis to be delivered to the customer.

It was created with a simple interface, so it is easy to use, as only follow the steps that will do the same tool as you go asking for analysis, but do require basic knowledge of the subject matter as the following terminology: specific weight, cohesion, angle of internal friction, friction and adhesion to vertical loads.

Keywords: foundations, deep, semi-deep, piles, pile short, rigid shaft, foundations, sizing, digital tool, ultimate capacity, dynamic piling.

# Resumen

En el presente escrito se presenta de manera detallada, la forma en que se desarrolló una herramienta digital con ayuda del programa Microsoft Excel 2007®, para facilitar el análisis y diseño geotécnico de cimentaciones profundas y semiprofundas con base a los datos de un estudio de suelos previo, los tipos de cimentación analizados fueron: bloque rígido, pilote corto y pilote largo.

Se logró que la aplicación tome en consideración la normativa vigente en el Código de Cimentaciones de Costa Rica y que dé la mejor opción para las condiciones dadas a partir de los 19 casos que analiza de manera bastante rápida, permite revisar el caso que se elige como más apto para verificar que las dimensiones propuestas son adecuadas, además de ser capaz de crear un reporte de dicho análisis para ser entregado al cliente.

Fue creada con una interface sencilla, de manera que sea de fácil manejo, ya que solo se deben seguir los pasos que la misma herramienta le irá pidiendo conforme avanza el análisis, pero sí requiere de conocimientos básicos en el tema tratado como la siguiente terminología: peso específico, cohesión, ángulo de fricción interna, rozamiento, esfuerzos verticales y adherencia.

Palabras claves: cimentaciones, profundas, semiprofundas, pilotes, pilote corto, pozo rígido, fundaciones, dimensionamiento, herramienta digital, capacidad última, hinca dinámica.

# **Herramienta digital para análisis y diseño geotécnico de cimentaciones profundas y semiprofundas**

GEINER ANDREY UREÑA PADILLA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Febrero del 2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN



# Contenido

Prefacio .....	1
Resumen ejecutivo.....	2
Introducción.....	4
Objetivos .....	5
Alcance y limitaciones.....	6
Metodología .....	8
Resultados .....	35
Análisis de los resultados .....	80
Conclusiones.....	84
Recomendaciones .....	85
Apéndices .....	86
Anexos .....	90
Referencias .....	92



# Índice de cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Coeficiente adimensional $n_c$ para compresión (Jiménez J, 1996).....	14
<b>Cuadro 2.</b> Relación de la adherencia con la resistencia a la compresión simple de la arcilla (Jiménez J, 1996).....	16
<b>Cuadro 3.</b> Tipos de pilotes hincados y sus características (Jiménez J, 1996).....	17
<b>Cuadro 4.</b> Tipos de pilotes de reposición y sus características (Jiménez J, 1996).....	18
<b>Cuadro 5.</b> Influencia de la topografía en la selección del pilote (Jiménez J, 1996) .....	19
<b>Cuadro 6.</b> Influencia del tipo de suelo en la selección del pilote (Jiménez J, 1996) .....	20
<b>Cuadro 7.</b> Influencia de la estructura en la selección del pilote (Jiménez J, 1996) .....	21
<b>Cuadro 8.</b> Valores recomendados para el coeficiente de empuje (Jiménez J, 1996).....	22
<b>Cuadro 9.</b> Ángulo de fricción entre suelos granulares y pilotes (Jiménez J, 1996) .....	22
<b>Cuadro 10.</b> Valores del coeficiente $f$ para el método práctico (Jiménez J, 1996).....	28
<b>Cuadro 11.</b> Relación del módulo de elasticidad del terreno para pilote inclinado y pilote vertical (Jiménez J, 1996).....	29
<b>Cuadro 12.</b> Valores propuestos por bjerrum para rozamiento negativo (Jiménez J, 1996).....	32
<b>Cuadro 13.</b> Factores de reducción para capacidad soportante de los suelos (CFIA, 2003) .....	34
<b>Cuadro 14.</b> Factores de seguridad tradicionales para capacidad de soporte (ACG, 2009) .....	34
<b>Cuadro 15.</b> Factores de seguridad para cargas excéntricas (ACG, 2009) .....	34

# Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Bloque rígido para pozo rectangular en terreno granular. (Jiménez J, 1996) .....	8
<b>Figura 2.</b> Pozo rectangular con $K_H$ variable. ....	9
<b>Figura 3.</b> Pozo rectangular con $K_H$ constante. ....	10
<b>Figura 4.</b> Pozo circular con $K_H$ variable.....	11
<b>Figura 5.</b> Pozo circular con $K_H$ constante.....	11
<b>Figura 6.</b> Método del cono invertido para pozos acampanados en terreno granular. (Jiménez J, 1996) .....	15
<b>Figura 7.</b> Pozo acampanado en arcilla. (Jiménez J, 1996).....	15
<b>Figura 8.</b> Armadura para momento y tracción. (Jiménez J, 1996).....	16
<b>Figura 9.</b> Factor de capacidad de carga $Nq *$ para cimentaciones profundas según criterio de Meyerhof. 23	
<b>Figura 10.</b> Sombbrero para hinca de pilotes. (Jiménez J, 1996) .....	24
<b>Figura 11.</b> Coeficientes adimensionales A y B para el cálculo de desplazamientos y momentos. (Jiménez J, 1996).....	27
<b>Figura 12.</b> Pieza prismática empotrada equivalente al pilote. (Jiménez J, 1996).....	28
<b>Figura 13.</b> Diagrama para el cálculo del momento máximo de servicio. (Jiménez J, 1996) .....	29
<b>Figura 14.</b> Valores del coeficiente $\alpha$ para la determinación del empotramiento ficticio en grupos de pilotes. (Jiménez J, 1996).....	30
<b>Figura 15.</b> Método de Blum. a) Cuña prismática pasiva supuesta en el método de Blum y fuerzas actuantes. b) Deformada, reacciones y momentos flectores según el método de Blum. (Jiménez J, 1996) .....	31
<b>Figura 16.</b> Esquema de rotura del terreno al paso entre dos pilotes. (Jiménez J, 1996) .....	33
<b>Figura 17.</b> Hoja de Inicio (parte 1): introducción sobre las capacidades y limitaciones de la herramienta. ..	35
<b>Figura 18.</b> Hoja de Inicio (parte 2): introducción sobre las capacidades y limitaciones de la herramienta. ..	36
<b>Figura 19.</b> Hoja de Datos (parte 1): ingreso de datos generales del cimientto y su contorno. ....	36
<b>Figura 20.</b> Hoja de Datos (parte 2): cálculo de cargas últimas y tipo de suelos.....	37
<b>Figura 21.</b> Hoja de Datos (parte 3): cálculo de coeficientes de balasto, relación de rigidez y elección de mejor cimientto. ....	38
<b>Figura 22.</b> Hoja de Datos (parte 4): hipervínculos que llevan a las hojas de análisis de cada caso.....	39
<b>Figura 23.</b> Hoja BRRG (parte 1): pozo rígido rectangular con terreno lateral granular. ....	40
<b>Figura 24.</b> Hoja BRRG (parte 2): pozo rígido rectangular con terreno lateral granular. ....	41
<b>Figura 25.</b> Hoja CRFNC (parte 1): consideración de la resultante vertical fuera del núcleo central. ....	42
<b>Figura 26.</b> Hoja CRFNC (parte 2): consideración de la resultante vertical fuera del núcleo central. ....	43
<b>Figura 27.</b> Hoja BRCAG (parte 1): pozo rígido circular acampanado con terreno lateral granular. ....	44
<b>Figura 28.</b> Hoja BRCAG (parte 2): pozo rígido circular acampanado con terreno lateral granular. ....	45
<b>Figura 29.</b> Hoja PCCCTGATG: Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral granular apoyado en terreno granular.....	46
<b>Figura 30.</b> Hoja PCCCTGATA: Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral granular apoyado en terreno arcilloso.....	47
<b>Figura 31.</b> Hoja PCCATTA: Pilote Corto circular acampanado a tracción en terreno arcilloso. ....	48
<b>Figura 32.</b> Hoja PCTAHCT: pilote corto a tracción en terreno arcilloso. ....	49
<b>Figura 33.</b> Hoja APTM: acero longitudinal de un pozo sometido a tracción y momento a la vez.....	50
<b>Figura 34.</b> Hoja PILOTES: selección de parámetros para la elección de un tipo de pilote. ....	51
<b>Figura 35.</b> Hoja PILOTES: tipo de pilote seleccionado y sus características. ....	52
<b>Figura 36.</b> Hoja PILOTES: datos generales para pilote aislado. ....	53
<b>Figura 37.</b> Hoja PILOTES: situación de servicio para pilote aislado y en grupo con carga lateral.....	54
<b>Figura 38.</b> Hoja PILOTES: situación de rotura para pilote aislado y en grupo con carga lateral. ....	55

<b>Figura 39.</b> Hoja PILOTES: consideración del rozamiento negativo de estratos compresibles. ....	56
<b>Figura 40.</b> Hoja PILOTES: estabilidad estructural, pilotes en terreno en falla, estribos de puente y tabla para fricción. ....	57
<b>Figura 41.</b> Hoja PILOTES: ingreso de datos por estrato que contribuye a la resistencia por fricción. ....	58
<b>Figura 42.</b> Hoja PILOTES: comprobación de la capacidad admisible y crear reporte. ....	59
<b>Figura 43.</b> Hoja HDP: consideración del efecto producido por el martinete al hincar un pilote. ....	60
<b>Figura 44.</b> Hoja EP: análisis de estribos de puentes que tienen un relleno de aproximación sobre un estrato arcilloso. ....	61
<b>Figura 45.</b> Hoja FI: fenómeno de inestabilidad en pilotes ocasionado por el terreno en deslizamiento progresivo. ....	62
<b>Figura 46.</b> Hoja GP (parte 1): ingreso de datos y cálculo del efecto de grupo en arcillas, considerando rotura de bloque. ....	63
<b>Figura 47.</b> Hoja GP (parte 2): cálculo del efecto de grupo en arenas y tabla para distribuir cargas externas. ....	64
<b>Figura 48.</b> Hoja GP (parte 3): ingreso de datos para cada pilote que compone el grupo para ser guardados en la tabla de distribución de fuerzas externas. ....	65
<b>Figura 49.</b> Hoja Fact: factores de reducción y de seguridad necesarios para el cálculo de la capacidad admisible de pilotes. ....	66
<b>Figura 50.</b> Hoja Reporte (parte 1): resumen del análisis realizado y representación general del tipo de cimiento. ....	67
<b>Figura 51.</b> Hoja Reporte (parte 2): presentación de las tablas de rozamiento negativo y fricción por estratos, solo para pilotes. ....	68
<b>Figura 52.</b> Hoja Reporte (parte 3): barra desplegable para ingresar imagen del tipo de cimiento y botones para dar formato, borrar y copiar tablas para pilotes. ....	68



# Prefacio

Para facilitar el análisis de cimentaciones profundas y semiprofundas, y de paso, conocer las dimensiones que debe tener la estructura soportante introducida en el suelo, se creó una herramienta que realiza, de manera bastante rápida, el cálculo de fórmulas grandes y, al final, le da a conocer al usuario cuál opción de las tomadas en consideración será mejor para las condiciones de un proyecto dado.

Apegándose a la normativa vigente en el país y en el libro español "Geotecnia y Cimientos III" de José Antonio Jiménez Salas, se desarrolló una herramienta en Microsoft Excel 2007® capaz de analizar 3 tipos de cimiento que son: bloque rígido, pilote corto y pilote largo, además de facilitar su dimensionamiento.

Se agradece al profesor Ing. Mauricio Carranza Solano por hacer posible el desarrollo de esta investigación y por haber facilitado la instalaciones de su empresa y la información, tanto documentada como intelectual, para llevar a herramienta antes comentada.

# Resumen ejecutivo

En el presente informe se muestra el desarrollo de una aplicación en la herramienta Microsoft Excel 2007® que busca la selección de un tipo de cimiento respecto a las dimensiones propuestas y las condiciones del terreno adyacente. También se buscó analizar, en cada caso revisado, el cumplimiento de los parámetros que rigen el comportamiento del suelo ante la presencia de este elemento y las cargas externas aplicadas.

Se debe tener muy claro que no se pretende el diseño del cimiento como elemento estructural con características particulares, sino elegir el más adecuado dentro una serie de posibilidades de manera automática.

Los tipos de fundación considerados fueron: Bloque Rígido, Pilote Corto y Pilote Largo. Se analizaron un total de 23 casos posibles de combinaciones entre los tres tipos de sección transversal: circular, rectangular o circular acampanado; el tipo de suelo o suelos en que se soporta y la relación entre su longitud y su sección transversal.

Se logró desarrollar una herramienta que haga el trabajo pesado de calcular fórmulas grandes y que evite la posibilidad de arrastrar errores en dichos cálculos.

Se hizo uso de literatura nacional e internacional para tomar lo más valioso de cada una, pero siempre que hubo discrepancia en las fórmulas de cálculo, se eligió obedecer la normativa vigente en nuestro país, regida especialmente por el Código de Cimentaciones.

Se presentan, seguidamente, los casos analizados, en base al libro Geotecnia y Cimientos III de José Antonio Jiménez Salas:

1. Bloque Rígido rectangular en terreno granular.
2. Bloque Rígido circular en terreno granular.
3. Bloque Rígido rectangular en terreno arcilloso.
4. Bloque Rígido circular en terreno arcilloso.
5. Bloque Rígido circular acampanado en terreno granular.
6. Bloque Rígido circular acampanado en terreno arcilloso.
7. Pilote corto circular a compresión en terreno granular.
8. Pilote corto circular a compresión en terreno arcilloso.
9. Pilote corto rectangular a compresión en terreno granular.
10. Pilote corto rectangular a compresión en terreno arcilloso.
11. Pilote corto circular a compresión con terreno lateral granular y empotrado en terreno granular.
12. Pilote corto circular a compresión con terreno lateral arcilloso y empotrado en terreno granular.
13. Pilote corto rectangular a compresión con terreno lateral granular y empotrado en terreno granular.
14. Pilote corto rectangular a compresión con terreno lateral arcilloso y empotrado en terreno granular.
15. Pilote corto circular a compresión con terreno lateral granular y empotrado en terreno arcilloso.
16. Pilote corto circular a compresión con terreno lateral arcilloso y empotrado en terreno arcilloso.
17. Pilote corto rectangular a compresión con terreno lateral granular y empotrado en terreno arcilloso.
18. Pilote corto rectangular a compresión con terreno lateral arcilloso y empotrado en terreno arcilloso.
19. Pilote corto cilíndrico acampanado a tracción en terreno granular.
20. Pilote corto cilíndrico acampanado a tracción en terreno arcilloso.

21. Pilote corto en terreno granular hormigonado contra el terreno.

22. Pilote corto en terreno arcilloso hormigonado contra el terreno.

23. Pilotes Largo.

Como se puede observar, se contó con una amplia gama de posibilidades y por eso, la selección es bastante útil, ya que permite elegir la más adecuada de las anteriores.

Para el uso de la herramienta se deben considerar algunas limitaciones, entre las que destacan: necesidad de contar con un estudio de suelos previo, conocimientos básicos de mecánica de suelos y geotecnia, además de que se hace un análisis del suelo en condición de esfuerzos totales.

Se consiguió que la herramienta sea bastante autosuficiente, ya que hace varios cálculos con los valores que se ingresan en la hoja de datos generales y que además, se rige bajo los lineamientos de análisis representados por el Código Sísmico y el de Cimentaciones de Costa Rica.

Se creó una hoja de salida, de modo que el usuario pueda entregar un reporte al cliente y documenta, de esta manera, lo que se hizo con ayuda del programa, para que no todo quede en la máquina.

También se logró incluir una pequeña guía de usuario con la que se puede entender mejor cómo hacer un uso adecuado y eficiente de la herramienta desarrollada.

# Introducción

Se presenta a continuación la manera en que se logró desarrollar una herramienta para el análisis y diseño geotécnico de cimentaciones profundas y semiprofundas, esto como respuesta a querer mejorar el rendimiento que puede tener una persona al calcular fórmulas largas y a tratar de minimizar la posibilidad de error en los cálculos.

Para lograr comprender la funcionalidad y los requerimientos de estos elementos estructurales, se acudió a un libro español llamado Geotecnia y Cimientos III de José Antonio Jiménez Salas, además de apoyarse en la normativa nacional comprendida por el Código de Cimentaciones y el Sísmico.

Se pretendió que el usuario, aún sin ser un experto en geotecnia, pudiera lograr obtener resultados con la aplicación, teniendo tan solo un estudio de suelos con datos básicos de los ensayos de laboratorio, pero que obviamente requerirá de conocer conceptos muy generales relacionados con la mecánica de suelos como: cohesión, ángulo de fricción interna, peso específico, momento, cortante, carga axial, etc.

Algunas consideraciones deben ser tomadas al usar la herramienta y por eso se incluyen en el apartado de alcance y limitaciones.

# Objetivos

## Objetivo general:

1. Desarrollar una herramienta digital que facilite el análisis y optimización de cimentaciones profundas y semiprofundas.

## Objetivos específicos:

1. Desarrollar una herramienta que considere la normativa vigente en el Código de Cimentaciones de Costa Rica.
2. Desarrollar una herramienta que considere la normativa vigente en el Código Sísmico de Costa Rica.
3. Crear una aplicación con la capacidad de señalar al usuario el tipo de cimentación que debe usar con base en los datos que se obtienen de un estudio de suelos y las dimensiones propuestas.
4. Hacer que la herramienta sea de fácil comprensión de manera que el usuario solo tenga que seguir el procedimiento que se le plantea.
5. Crear una guía de usuario para facilitar el uso de la aplicación.

# Alcance y limitaciones

En el presente trabajo se pretende el desarrollo de una hoja electrónica que facilite el análisis y dimensionamiento de las cimentaciones profundas y semiprofundas, de manera que permita al usuario determinar cuál es la mejor opción de cimentación para un proyecto dado.

Existen varias limitaciones que se deben considerar para el uso de la herramienta que fueron asumidos en el análisis:

- ✓ Se cuenta como mínimo con un estudio de suelos en el que contenga, para cada estrato: clasificación SUCS, ángulo de fricción interna, peso específico, cohesión (arcillas), resistencia al esfuerzo vertical y espesor.
- ✓ Los estratos son horizontales, isotrópicos y homogéneos en todo su espesor.
- ✓ Para arcillas el coeficiente de balasto permanece constante en todo el estrato, mientras que en los demás suelos aumenta de manera proporcional con la profundidad.
- ✓ Únicamente se analiza el comportamiento del suelo adyacente ante la acción del elemento de fundación, de manera que se establecen las dimensiones mínimas para que el terreno no falle ni provoque desplazamientos excesivos.
- ✓ Se supone que no se provocarán afectaciones en obras subterráneas existentes como túneles, fundaciones, taludes cercanos, piscinas, etc.
- ✓ Las capas más profundas que la base del cimiento son de mayor resistencia, por lo que no se provocarán asentamientos por lo consolidación de una capa profunda.
- ✓ Los pilotes son verticales y paralelos cuando están en grupo, para pilotes individuales sí se considera el efecto de estar inclinado respecto a la vertical.
- ✓ Para la división de carga axial, momentos y fuerza cortante, el elemento que une los pilotes es infinitamente rígido, de manera que se puede hacer una distribución por rigideces relativas.
- ✓ Solo en caso de pilote corto circular sometido a tensión y momento a la vez se presenta la distribución y cantidad de acero longitudinal requerido, esto porque el diseño estructural del cimiento no es parte del alcance del proyecto pero se considera que es un caso muy especial.
- ✓ La cantidad máxima de estratos que se pueden analizar, para efectos de pilotes por fricción, es de 10, pero existe posibilidad de ampliarlo con facilidad.
- ✓ La cantidad máxima de estratos que se pueden analizar, para efectos de rozamiento negativo, es de 5, pues se considera que es difícil que se presenten muchos estratos con esta condición.
- ✓ En caso de rellenos, el pilote atraviesa todo su espesor y se apoya en un estrato más fuerte.
- ✓ Se utilizó la interpolación lineal para determinar valores intermedios de cuadros y figuras, lo que provoca pequeña desviaciones del comportamiento original.
- ✓ No se considera el efecto de grupo en arenas debido a que Jiménez J, 1996, establece que se puede despreciar este aumento en la eficiencia.
- ✓ El método de análisis de la condición de servicio y rotura por carga lateral, en pilotes, solo se puede utilizar para suelos no estratificados.
- ✓ La capacidad por fricción en arcillas asume que están preconsolidadas.

- ✓ El suelo se encuentra en condición no drenada y, por tanto, se trabaja con esfuerzos totales.
- ✓ En caso de que se recomiende una cimentación semiprofunda, solo se consideran 2 estratos como máximo (el lateral y el de empotramiento). Para pilotes se puede llegar hasta 10.

# Metodología

La forma en que se llevó a cabo la herramienta requerida se irá describiendo conforme se avanza en este apartado.

Lo primero fue una amplia investigación bibliográfica.

Se trabajó en Microsoft Excel 2007®, haciendo uso de las funciones básicas que en él se tienen, tales como; si, o, y. Además, se empleó el programador de Visual Basic que posee el programa antes mencionado para lograr insertar algunas tablas de extensión variable y lograr que, al final, el usuario pueda crear un reporte del trabajo realizado.

Se requieren los datos generales del problema a resolver, entre los que se pueden destacar: características típicas del suelo que rodeará el cimienta (coeficientes de balasto, ángulo de fricción interna, cohesión y peso específico), características y dimensiones propuestas para el elemento estructural (peso específico, longitud, diámetro o largo y ancho), además de las cargas externas consideradas (momento, carga axial y fuerza cortante).

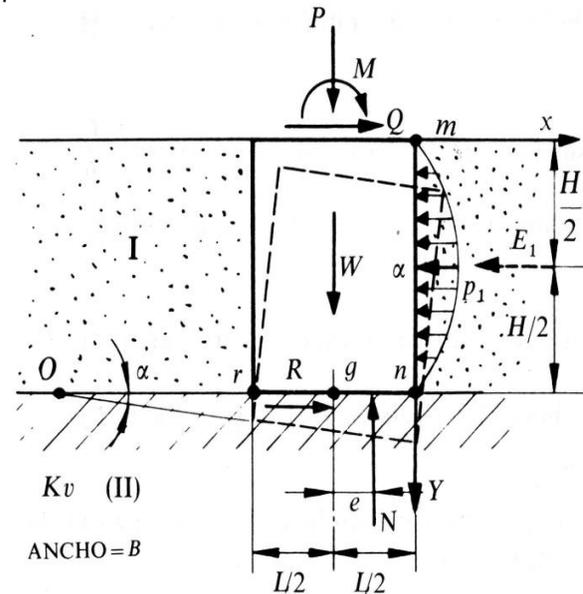
Para empezar la selección de la fundación más apta se debe conocer la forma en que se analiza cada tipo. A continuación se muestran las diferentes clases de cimentación tomadas en cuenta y la manera en que fueron consideradas para poder dar al usuario la mejor opción y las dimensiones que la caracterizan.

## Cimentaciones semiprofundas

Se consideraron los dos tipos de cimientos semiprofundos que analiza y desarrolla J. Jiménez en su libro Geotecnia y Cimientos III, los cuales se explican seguidamente y que además presentan las diferentes hipótesis consideradas en cada caso.

## Teoría del Bloque Rígido

Para facilitar la comprensión de este método se presenta esta ilustración:



**Figura 1.** Bloque rígido para pozo rectangular en terreno granular. (Jiménez J, 1996)

Esta teoría se basa en las siguientes hipótesis: (tomadas de Jiménez J, 1996)

**1<sup>era</sup>.** La fuerza "R" que se genera en la base del apoyo no debe ser superior al valor:

$$R_{m\acute{a}x} = N * \tan \delta + S * a \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde N: resultante vertical;  $\delta$ : ángulo de rozamiento del concreto y terreno; S: área de la superficie del apoyo y a: adherencia.

**2<sup>nda</sup>.** Se desprecian las fuerzas verticales de rozamiento que actúan en las caras frontales del pozo, así como las fuerzas y momentos de fricción que actúan en las laterales.

**3<sup>era</sup>.** Se supone, en un estrato granular, una ley de crecimiento del coeficiente de balasto horizontal lineal a la profundidad. Siendo  $K_H$  el valor que toma este coeficiente a la profundidad H se tiene que:

$$K_I = K_H * \frac{y}{H} \quad (\text{Ecuación 2})$$

En un estrato cohesivo, se supone un coeficiente de balasto vertical uniforme de valor  $K_V$ .

4<sup>ta</sup>. El pozo, al ser rígido y girar alrededor de un punto "O" del plano de la base, el movimiento puede descomponerse en la cara frontal "mn" en un giro alrededor de "n" y en la traslación vertical.

El valor de la presión en la cara "mn" será:

$$p = K_I * x = K_H * \frac{y}{H} * (H - h) \tan \alpha$$

(Ecuación 3)

Que resulta ser la parábola con flecha máxima en  $H/2$ , de valor  $p_1$ .

5<sup>ta</sup>. En la base de la zapata actúan la resultante vertical "N" y la reacción horizontal "R", a determinar. Siempre que el punto "O" se mantenga fuera de la base, la excentricidad "e" de la resultante será inferior a  $L/6$  o  $D/8$  y, el reparto de las presiones bajo la zapata, de forma trapezoidal o triangular cuando el giro se produce alrededor de "r".

Además, la resultante vertical será:

$$N = P + W \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde  $P$ : carga axial sobre la cabeza del pozo y  $W$ : peso del pozo.

También se emplea en las fórmulas la relación de rigidez entre estratos:

$$\eta = \frac{K_H}{K_V} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:  $K_H$ : coeficiente de balasto horizontal y  $K_V$ : coeficiente de balasto vertical. (Ver sección de determinación de coeficientes de balasto para saber cómo se calculan)

De esta manera se tiene que se debe contar con los siguientes datos: (Jiménez J, 1996)

- ✓ Dimensiones del pozo: altura ( $H$ ), largo ( $L$ ) y ancho ( $B$ ) o diámetro ( $D$ ). Además del peso.
- ✓ Cargas en la cabeza del pozo: axial ( $P$ ), cortante ( $Q$ ) y momento ( $M$ ).
- ✓ Características del terreno: coeficientes de balasto horizontal y vertical ( $K_H$  y  $K_V$ ).

Entonces se pueden determinar las incógnitas que serán:

- ✓  $e$ : excentricidad de la resultante en la base ( $\leq L/6$  para rectangulares y  $\leq D/8$  para circulares).
- ✓  $p_1$ : presión horizontal máxima en el estrato superior ( $\leq p_{adm.}$ ).

- ✓  $x_m$ : desplazamiento máximo horizontal en la superficie ( $\leq 1"$ ).

- ✓  $\alpha$ : ángulo de giro del bloque.

Las fórmulas para determinar las anteriores incógnitas dependen tanto de la sección del cimiento como del terreno lateral, es por esta razón que se tienen varios casos para los cuales se muestran sus respectivas ecuaciones.

La manera de tomar en consideración lo antes mencionado al hacer la herramienta fue considerar trabajar cada caso en hojas de Microsoft Excel 2007®, enlazadas a la primera, en la que se pusieron los datos generales, esto con el fin de que al modificar dichos datos cambien en las diferentes hojas y no se requiera estar ingresando siempre los mismos valores.

Lo primero que se debe determinar es que se cumpla con la relación de esbeltez límite porque de lo contrario no se puede usar este tipo de cimiento, es por esta razón que este es el primer criterio de elección entre diferentes opciones.

## Pozo rectangular con terreno lateral granular

La manera de representarlo se ve seguidamente:

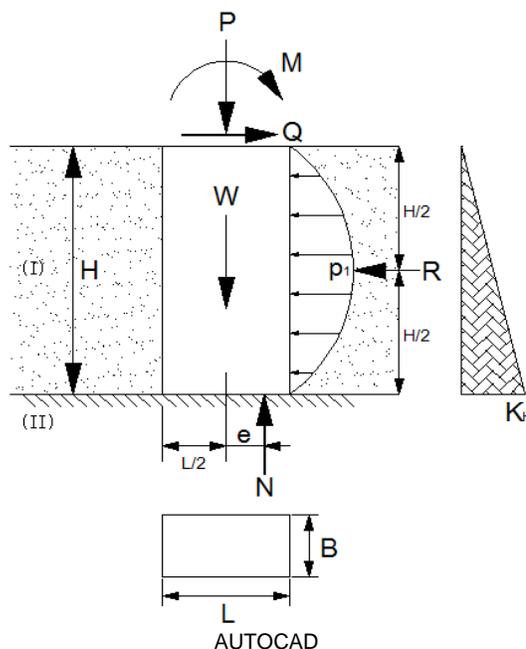


Figura 2. Pozo rectangular con  $K_H$  variable.

La relación de esbeltez límite se calcula considerando que un aporte de la base de tan solo el 10% es despreciable para todos los casos.

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{lim} = \sqrt[3]{\frac{0,9}{0,1\eta}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Además se presentan las ecuaciones que permiten calcular las incógnitas del método (tomadas de Jiménez J, 1996):

$$R = (M + QH) * \frac{2H^2\eta}{L^3 + \eta H^3} - Q \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$e = \frac{M+QH}{N} * \frac{L^3}{L^3 + \eta H^3} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$\tan \alpha = \frac{M+QH}{K_V \left( \frac{BL^3}{12} + \eta \frac{BH^3}{12} \right)} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$x_m = H \tan \alpha \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$p_1 = \frac{\eta(M+QH)H}{4 \left( \frac{BL^3}{12} + \eta \frac{BH^3}{12} \right)} \quad (\text{Ecuación 11})$$

## Resultante fuera de núcleo central

En caso de que la resultante tenga una excentricidad mayor a los límites establecidos, las fórmulas anteriores no aplican, lo que se puede hacer es cambiar las dimensiones del cimiento de forma que se reduzca esa excentricidad o resolver el siguiente sistema de ecuaciones: (tomadas de Jiménez J, 1996)

$$\tan \alpha = \frac{2N}{9 \left( \frac{L}{2} - e \right)^2 BK_V} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$Q + R = \frac{\eta NH^2}{27 \left( \frac{L}{2} - e \right)^2} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$M + QH = \frac{\eta NH^3}{54 \left( \frac{L}{2} - e \right)^2} + eN \quad (\text{Ecuación 14})$$

Para la solución a estas ecuaciones se puede consultar la parte de apéndices en donde se detalla cómo se resolvió.

## Pozo rectangular con terreno lateral cohesivo

En este caso, al tener un suelo con coeficiente de balasto constante alrededor, la situación varía.

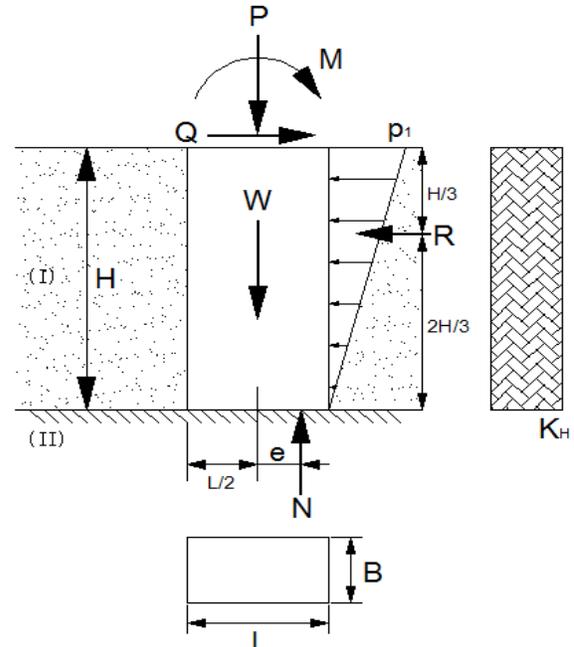


Figura 3. Pozo rectangular con  $K_H$  constante.

Al cambiar el tipo de suelo también varía la relación de esbeltez límite un poco:

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{lim} = \sqrt[3]{\frac{0,9}{0,4\eta}} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Las incógnitas se averiguan con: (tomadas de Jiménez J, 1996)

$$R = (M + QH) * \frac{6\eta H^2}{L^3 + 4\eta H^3} - Q \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$e = \frac{M+QH}{N} * \left( \frac{1}{1+4\eta(H/L)^3} \right) \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$\tan \alpha = \frac{M+QH}{K_V \left( \frac{BL^3}{12} + 4\eta \frac{BH^3}{12} \right)} \quad (\text{Ecuación 18})$$

“ $x_m$ ” se calcula con la ecuación 10.

$$p_1 = \frac{\eta(M+QH)H}{\frac{BL^3}{12} + 4\eta \frac{BH^3}{12}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

## Pozo circular con terreno lateral granular

La interpretación es muy similar a la figura 2, con la salvedad que la sección transversal varía:

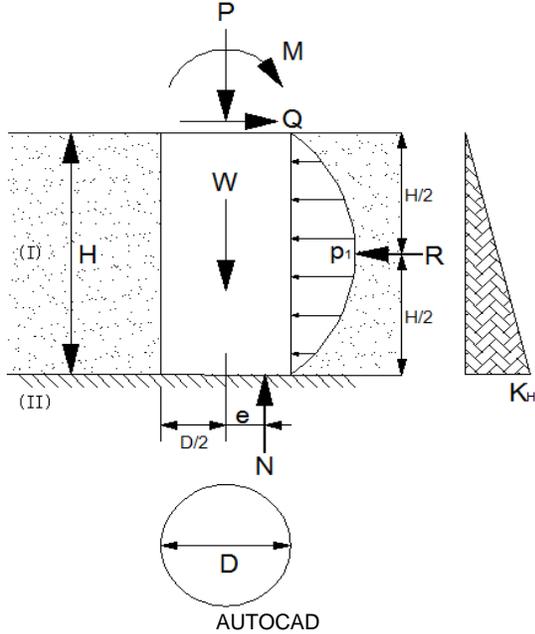


Figura 4. Pozo circular con  $K_H$  variable.

Relación de esbeltez límite:

$$\left(\frac{H}{D}\right)_{lim} = \sqrt[3]{\frac{27\pi}{16\eta}} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Ecuaciones propuestas para esta condición: (tomadas de Jiménez J, 1996)

$$R = (M + QH) * \frac{32H^2\eta}{3\pi D^3 + 16\eta H^3} - Q \quad (\text{Ecuación 21})$$

$$e = \frac{M+QH}{N} * \frac{1}{1 + \frac{16}{3\pi}\eta\left(\frac{H}{D}\right)^3} \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$\tan \alpha = \frac{M+QH}{K_V\left(\frac{\pi D^3}{64} + \eta\frac{DH^3}{12}\right)} \quad (\text{Ecuación 23})$$

“ $x_m$ ” se calcula con la ecuación 10.

$$p_1 = \frac{\eta(M+QH)H}{4\left(\frac{\pi D^3}{64} + \eta\frac{DH^3}{12}\right)} \quad (\text{Ecuación 24})$$

## Pozo circular con terreno lateral arcilloso

Se considera el efecto del terreno con coeficiente de balasto constante y la sección circular.

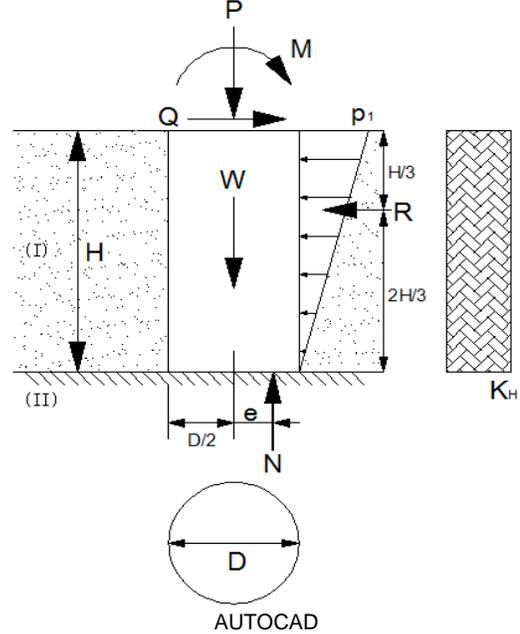


Figura 5. Pozo circular con  $K_H$  constante.

Relación de esbeltez límite:

$$\left(\frac{H}{D}\right)_{lim} = \sqrt[3]{\frac{27\pi}{64\eta}} \quad (\text{Ecuación 25})$$

Ecuaciones para determinar incógnitas: (tomadas de Jiménez J, 1996)

$$R = (M + QH) * \frac{96H^2\eta}{3\pi D^3 + 64\eta H^3} - Q \quad (\text{Ecuación 26})$$

$$e = \frac{M+QH}{N} * \frac{1}{1 + \frac{64}{3\pi}\eta\left(\frac{H}{D}\right)^3} \quad (\text{Ecuación 27})$$

$$\tan \alpha = \frac{M+QH}{K_V\left(\frac{\pi D^3}{64} + 4\eta\frac{DH^3}{12}\right)} \quad (\text{Ecuación 28})$$

“ $x_m$ ” se calcula con la ecuación 10.

$$p_1 = \frac{\eta(M+QH)H}{\frac{\pi D^3}{64} + 4\eta\frac{DH^3}{12}} \quad (\text{Ecuación 29})$$

## Pozo circular acampanado con terreno lateral granular

Con la intención de mejorar el comportamiento por punta del elemento, se ensancha en la base, esto causa que se aumente la relación de esbeltez en una magnitud proporcional a la raíz cúbica de la relación entre el diámetro de la base y el del fuste.

$$\left(\frac{H}{D}\right)_{lim} = \sqrt[3]{\frac{27\pi D}{16d\eta}} \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde  $d$ : diámetro del pozo en el fuste y  $D$ : diámetro del pozo en la base.

Jiménez propone las siguientes ecuaciones para calcular la excentricidad de la resultante vertical y la  $\tan \alpha$ , que sirve para determinar el desplazamiento horizontal máximo del elemento estructural:

$$e = \frac{M+QH}{N} * \frac{1}{1 + \frac{16}{3\pi}\eta\frac{d}{D}\left(\frac{H}{D}\right)^3} \quad (\text{Ecuación 31})$$

$$\tan \alpha = \frac{M+QH}{K_V\left(\frac{\pi D^3}{64} + \eta\frac{dH^3}{12}\right)} \quad (\text{Ecuación 32})$$

Debido a que no se presentan ecuaciones para el cálculo de la resultante horizontal ni para la presión máxima en el estrato superior, se tomó la condición más crítica, es decir, se consideró para estas dos variables que no existe mejoría al aumentar el área en la base. Esto provoca que se hayan empleado las ecuaciones 21 y 24 para los cálculos antes mencionados.

## Pozo circular acampanado con terreno lateral cohesivo

El efecto que producido al ensanchar la base es similar al del caso anterior. En la relación de esbeltez límite se refleja como sigue:

$$\left(\frac{H}{D}\right)_{lim} = \sqrt[3]{\frac{27\pi D}{64d\eta}} \quad (\text{Ecuación 33})$$

De manera paralela al caso de pozos acampanados en terreno granular se cuenta con solo las siguientes ecuaciones para determinar las variables del caso, de modo que se actuó de la misma manera que en el caso anterior, utilizando las ecuaciones 26 y 29.

$$e = \frac{M+QH}{N} * \frac{1}{1 + \frac{64}{3\pi}\eta\frac{d}{D}\left(\frac{H}{D}\right)^3} \quad (\text{Ecuación 34})$$

$$\tan \alpha = \frac{M+QH}{K_V\left(\frac{\pi D^3}{64} + 4\eta\frac{dH^3}{12}\right)} \quad (\text{Ecuación 35})$$

## Estimación de los coeficientes de balasto

Los coeficientes de balasto son la manera de medir la respuesta del suelo ante la aplicación de cargas externas, por lo que se vuelven indispensable al momento de analizar el comportamiento de un cimiento que estará rodeado de este material.

Las que se presentan a continuación son fórmulas aproximadas de los coeficientes de balasto vertical según Vogt y los coeficientes de balasto horizontal según Terzaghi y Broms. (Tomadas de Jiménez J, 1996)

Para cimientos rectangulares:

$$K_V = 1,33 * \frac{E_0}{\sqrt[3]{LB^2}} \quad (\text{Ecuación 36})$$

$$K_H = 0,75 * \frac{E_0}{B} \quad (\text{Ecuación 37})$$

Para cimientos circulares:

$$K_V = 1,57 * \frac{E_0}{D} \quad (\text{Ecuación 38})$$

$$K_H = 0,75 * \frac{E_0}{D} \quad (\text{Ecuación 39})$$

Con  $E_0$ : modulo de deformación del suelo;  $L$ : largo;  $B$ : ancho; y  $D$ : diámetro de la sección transversal.

# Teoría del Pilote Corto

En caso de que no se cumpla con las relaciones de esbeltez límite para pozos rígidos antes vistas, se debe proceder a revisar este tipo de fundación y verificar que se cumpla con el límite de esbeltez superior para ellas.

Al igual que para bloques rígidos, en este tipo de cimiento se necesita analizar por separado los diferentes casos que se pueden presentar al combinar el tipo de carga (compresión o tensión) con el o los tipos de estrato con que interactúa el elemento de soporte.

Este método también considera que los estratos son horizontales y sus características generales no varían a lo largo del estrato, excepto por el coeficiente de balasto en el caso de suelos granulares.

## Límite superior de esbeltez

El límite máximo, a partir del cual el pozo es tan flexible que conviene tratarlo como un pilote de gran longitud, puede ser fijado de la siguiente manera: (tomadas de Jiménez J, 1996)

- ✓ En terrenos granulares:  $H/L \leq 2$

Donde la longitud elástica suelo-pozo:

$$L = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{0,75 E_0}} \quad (\text{Ecuación 49})$$

- ✓ En terrenos cohesivos:  $H/L \leq 1,5$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 E_p I_p}{0,75 E_0}} \quad (\text{Ecuación 50})$$

Seguidamente se muestra la manera en que se debe actuar para calcular las variables que serán: desplazamiento horizontal máximo ( $x_m$ ), presiones laterales máximas ( $p_1$  y  $p_2$ ), carga de hundimiento o carga neta ( $q_h$  o  $q_n$ ) para el caso de compresión y tensión admisible ( $T_{adm}$ ) si la carga es de extracción.

## Pozo circular en terreno granular

Se deberá comprobar que las presiones laterales " $p_1$ " y " $p_2$ " se mantengan alejadas de los valores de rotura pasivos (Broms supone que la presión

de rotura puede alcanzar un valor de tres veces la presión pasiva de Rankine) y que el desplazamiento máximo horizontal " $x_m$ " en la superficie sea menor a una pulgada. (Jiménez J, 1996)

Para calcular la presión pasiva de Rankine se tiene que:

$$P_r = \frac{3\gamma H K_p}{FS} \quad (\text{Ecuación 51})$$

Siendo  $P_r$ : presión de rotura;  $\gamma$ : peso específico del suelo;  $H$ : espesor del estrato;  $K_p$ : coeficiente de empuje pasivo de Rankine; y  $FS$ : factor de seguridad empleado.

El coeficiente de empuje pasivo de Rankine, despejado a partir del activo que viene en el Código de Cimentaciones de Costa Rica, se toma como:

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2) \quad (\text{Ecuación 52})$$

Con  $\phi$ : ángulo de fricción interna del suelo.

De manera que lo que se debe calcular principalmente son los tres datos antes mencionados para así comprobar que cumplan, esto se logra con las ecuaciones siguientes: (tomadas de Jiménez J, 1996)

$$x_m = \frac{6Q}{DH^2} * \frac{4e+3H}{K_H} \quad (\text{Ecuación 53})$$

$$p_1 = \frac{0,75Q}{DH} * \frac{(4e+3H)^2}{3e+2H} \quad (\text{Ecuación 54})$$

$$p_2 = \frac{6Q(2e+H)}{DH^2} \quad (\text{Ecuación 55})$$

## Pozo circular en terreno cohesivo

De manera semejante al caso anterior, se requiere el cálculo de las presiones y del desplazamiento máximo horizontal en la superficie. (Ecuaciones tomadas de Jiménez J, 1996)

$$x_m = \frac{2Q}{DH^2} * \frac{3e+2H}{K_H} \quad (\text{Ecuación 56})$$

$$p_1 = \frac{2Q(3e+2H)}{DH^2} \quad (\text{Ecuación 57})$$

$$p_2 = \frac{2Q(3e+H)}{DH^2} \quad (\text{Ecuación 58})$$

Ahora lo que queda es determinar la capacidad a compresión o tensión dependiendo del caso que corresponda.

## Cálculo de pozos a compresión

Para calcular la capacidad a compresión del suelo se necesita conocer el factor  $N_c$ . En caso de que el área transversal sea rectangular se emplea la ecuación siguiente:

$$N_c = 5 \left(1 + 0,2 \frac{H_2}{B}\right) \left(1 + 0,2 \frac{B}{L}\right) \quad (\text{Ecuación 59})$$

Donde  $H_2$ : longitud de empotramiento del cimiento en el estrato 2;  $L$ : largo; y  $B$ : ancho del cimiento.

Para los que son circulares o cuadrados se tiene el cuadro que sigue del que se interpola el valor buscado:

<b>CUADRO 1. COEFICIENTE ADIMENSIONAL <math>N_c</math> PARA COMPRESIÓN</b>	
<b><math>H_2/B</math> o <math>H_2/D</math></b>	<b><math>N_c</math></b>
0,00	6,20
0,25	6,70
0,60	7,10
0,75	7,40
1,00	7,70
1,60	8,10
2,00	8,40
2,50	8,60
3,00	8,80
>=4.00	9,00

Fuente: Jiménez J., 1996.

Las subdivisiones que se presentan a continuación se relacionan con el estrato en el cual se apoya la base del pilote corto.

## Pozo apoyado en terreno cohesivo

Suponiendo que la carga "N" actúa centrada y aplicando la ecuación 59 o el cuadro 1, si el segundo estrato es arcilloso saturado será preciso determinar la carga de hundimiento a corto plazo que se supone equivalente a la mitad de la resistencia a la compresión simple:

$$S_u = \frac{q_u}{2} \quad (\text{Ecuación 60})$$

La presión neta que el suelo puede resistir es de:

$$\frac{S_u N_c}{F} = q_n \text{ adm} \quad (\text{Ecuación 61})$$

La carga que se aplica al suelo es de:

$$q_n = \frac{P+W-G}{A} \quad (\text{Ecuación 62})$$

Siendo  $W$ : peso del concreto;  $G$ : peso de las tierras extraídas;  $P$ : carga axial aplicada; y  $A$ : área transversal de fundación.

## Pozo apoyado en terreno granular

Se requiere analizar el hundimiento a largo plazo o en terreno granular, la fórmula general es:

$$q_h = cN_c^* + (\sum \gamma_1 H)N_q^* + B\gamma_2^0 N_\phi^* \quad (\text{Ecuación 63})$$

Donde  $N_c^*$ ,  $N_q^*$ ,  $N_\phi^*$  son los factores de capacidad de carga en función del ángulo de fricción y afectados por los términos correctores de profundidad, inclinación y forma. Dicha fórmula entre el factor de seguridad dará la carga admisible sobre el pilote corto.

$$N_\phi^* = \frac{1+\text{sen } \phi}{1-\text{sen } \phi} \quad (\text{Ecuación 64})$$

$$N_q^* = N_\phi^{*2} \quad (\text{Ecuación 65})$$

$$N_c^* = 2 * \left( \sqrt{N_\phi^*} + \sqrt{N_\phi^{*3}} \right) * \left( 1 + 0,2 \frac{B}{L} \right) \quad (\text{Ecuación 66})$$

## Cálculo de pozos a tracción

### Pozo cilíndrico acampanado en terreno granular

Para pozos de este tipo en terrenos poco cohesivos se emplea el método del cono invertido que, haciendo referencia a su nombre, supone que el peso de un cono invertido de tierras, además del propio peso del cemento, será el que soporte la fuerza de extracción, además, se hacen de forma acampanada para que sea más difícil que la carga que lo hala consiga extraerlo.

Lo anterior se representa en la siguiente figura 7 que esquematiza el método del cono invertido antes mencionado:

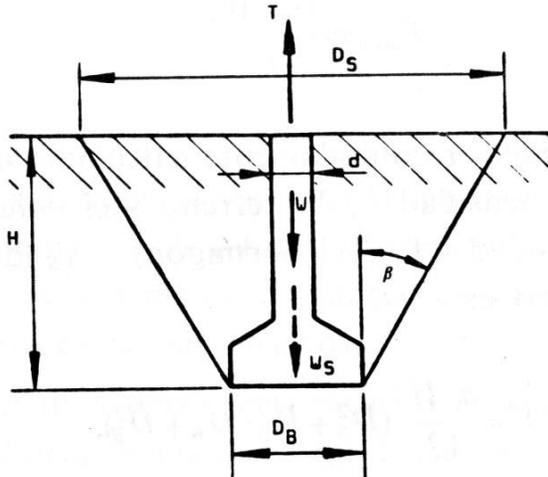


Figura 6. Método del cono invertido para pozos acampanados en terreno granular. (Jiménez J, 1996)

Para el método del cono de tierras se tiene: (tomado de Jiménez J, 1996)

El ángulo  $\beta$  se puede tomar como:

$$\beta \cong \frac{2}{3} \phi \leq 30^\circ \quad (\text{Ecuación 67})$$

De esta manera, la tensión admisible para este tipo de fundación será:

$$T_{adm} = \frac{W+W_S}{F} \quad (\text{Ecuación 68})$$

Donde  $W$ : peso del concreto;  $W_S$ : peso del cono de tierras y  $F$ : factor de seguridad.

Para determinar el peso del cono de tierras, se averigua su volumen:

$$V = \frac{\pi H}{12} (D_S^2 + D_S * D_B + D_B^2) \quad (\text{Ecuación 69})$$

Siendo  $D_B$ : diámetro del cono de tierras en la base;  $D_S$ : diámetro del cono de tierras en la superficie y  $H$ : altura del cono de tierras.

Ahora bien, como este volumen representa inclusive el ocupado por el concreto, el cálculo de los pesos se hace así:  $W_S$  es el volumen anterior multiplicado por la densidad del suelo y  $W$  es el volumen de concreto por una densidad equivalente de:

$$\gamma'_C = \gamma_C - \gamma_S \quad (\text{Ecuación 70})$$

Con  $\gamma_C$ : peso específico de cemento y  $\gamma_S$ : peso específico del suelo.

De esta manera se cuenta con las herramientas necesarias para calcular si el peso propio del cemento unido al del cono de tierras sobre él, soporta la carga que trata de sacar la fundación.

### Pozo cilíndrico acampanado en terreno arcilloso

Se presenta la siguiente figura ilustrativa:

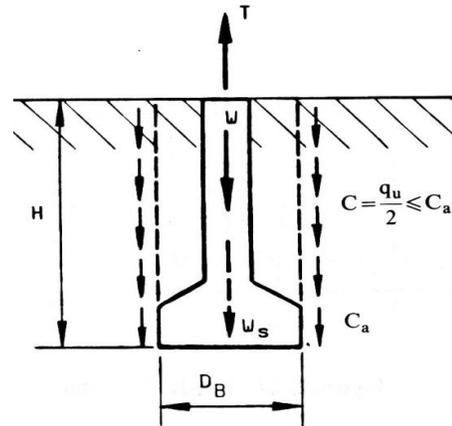


Figura 7. Pozo acampanado en arcilla. (Jiménez J, 1996)

Debido a la cohesión y a que el coeficiente de balasto del suelo arcilloso no varía, no se usa el método del cono invertido, sino que se plantea una situación como la mostrada en la figura anterior.

Para obtener el valor de la adherencia “ $C_a$ ” entre la arcilla y el concreto se utiliza este cuadro del que se puede interpolar el valor:

<b>CUADRO 2. RELACIÓN DE LA ADHERENCIA CON LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE LA ARCILLA</b>	
$q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$C_a$ (t/m <sup>2</sup> )
0,1	0,5
0,2	1,0
0,3	1,5
0,5	2,3
0,7	2,9
1,0	3,5
1,5	4,1
2,0	4,5
4,0	6,0
>=10	10,0

Fuente: Jiménez J., 1996.

La tensión admisible en este caso es de:

$$T_{adm} = \frac{W + W_s + \pi D_B H C_a}{F} \quad (\text{Ecuación 71})$$

Si es arcilla de alta plasticidad conviene desprestigiar los primeros dos o tres metros del valor de  $H$  y considerar un mínimo de medio metro a un metro como terreno que no colabora para efectos de resistencia por fuste.

### Pozo cilíndrico o rectangular en terreno arcilloso, hormigonado contra terreno

La tensión admisible, en este caso, es de:

$$T_{adm} = \frac{W + A_{fuste} C_a}{F} \quad (\text{Ecuación 72})$$

Donde  $A_{fuste}$ : área lateral del pozo en contacto con el terreno, tomando en consideración los descartes de longitud antes mencionados;  $F$ : factor de seguridad;  $W$ : peso del elemento; y  $C_a$ : adherencia. La adherencia se determina a través del cuadro 2.

### Pozo cilíndrico acampanado en terreno granular, hormigonado contra terreno

La tensión admisible es:

$$T_{adm} = \frac{2W + A_{fuste} \gamma_c H \tan \phi}{2F} \quad (\text{Ecuación 73})$$

Con  $W$ : peso del elemento;  $A_{fuste}$ : área de fuste;  $\gamma_c$ : peso específico del concreto;  $H$ : profundidad del elemento; y  $F$ : factor de seguridad.

### Armado de pozo sometido a tracción y momento

Se presenta este cálculo ya que según Jiménez es muy difícil encontrarlo y por tanto es muy especial.

La cantidad total de acero a disponer (en un mínimo de 8 barras) será:

$$A_s = \frac{T}{f_s} * \frac{1-K}{0,5-K} \quad (\text{Ecuación 74})$$

Siendo  $A_s$ : área total de acero en la sección [cm<sup>2</sup>];  $T$ : esfuerzo a tracción real [kg] y  $f_s$ : tensión de trabajo del acero [kg/cm<sup>2</sup>].

$$K = 0,5 - \frac{0,125}{\frac{e}{D'}} \quad (\text{Ecuación 75})$$

$$e = \frac{M}{T} \quad (\text{Ecuación 76})$$

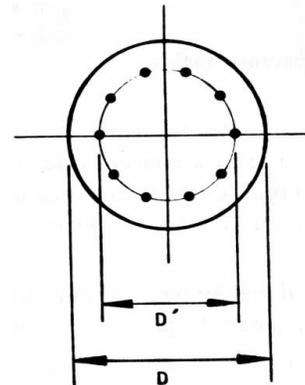


Figura 8. Armadura para momento y tracción. (Jiménez J, 1996)

# Cimentaciones profundas

Si se revisaron todos los posibles casos que dan las teorías de pozos semiprofundos y ninguno cumple por esbeltez, se debe analizar como pilote largo. Para comprender el comportamiento del suelo ante la acción de este elemento, se deben tomar varias consideraciones, que a lo largo de este apartado serán explicadas y entre las que se

puede mencionar: la capacidad por punta y por fricción, el efecto de grupo, la acción de cargas laterales, fenómenos de inestabilidad e inestabilidad estructural.

Ahora bien, es muy importante conocer el tipo de pilote que se empleará en el proyecto. Para esto se tomaron en cuenta los quince tipos que propone Armstrong y que se presentan en las siguientes tablas que, además, sirve para la elección del tipo que más se adapte a las condiciones requeridas para un proyecto específico.

<b>CUADRO 3. TIPOS DE PILOTES HINCADOS Y SUS CARACTERÍSTICAS</b>					
Tipo de pilote	N°	Dimensiones nominales		Cargas normales (t)	
		Sección	Longitud (m)		
Madera	1	Hasta 0,4 x 0,4 m	≤ 20	≤ 60	
Concreto	H. armado normal	2	Hasta 0,45 x 0,45 m	≤ 27	≤ 100
	Pretensado	3	Hasta 0,4 x 0,4 m Hasta Ø 0,75 m (Huecos)	≤ 27	≤ 100
Acero	Cajón	4	Tablestacas soldadas	≤ 36	≤ 150
	Tubo	5	Hasta Ø 0,9 m	≤ 36	≤ 150
	Viga H	6	De 0,2 x 0,2 hasta 0,3 x 0,3 m	≤ 36	≤ 170
	Rosca	7	Hélice de Ø 0,6 a 2,4 m	≤ 24	≤ 250
Concreto prefabricado + in situ	8	De Ø 0,45 a 0,6 m	≤ 50	≤ 200	
Concreto in situ + acero	9	De Ø 0,25 a 0,5 m	≤ 18	≤ 80	
Concreto	10	De Ø 0,25 a 0,6 m	≤ 24	≤ 150	

Fuente: Jiménez J., 1996.

**CUADRO 4. TIPOS DE PILOTES DE REPOSICIÓN Y SUS CARACTERÍSTICAS**

Tipo de pilote	N°	Dimensiones nominales		Cargas normales (t)		
		Sección	Longitud (m)			
Sondeado a percusión	Pequeño diámetro	11	De $\varnothing$ 0,45 a 0,6 m	$\leq 24$	$\leq 120$	
Sondeado	Gran diámetro	12	$\varnothing > 0,6$ m	$\leq 45$	$\leq 1000$	
Sondeado a rotación	Gran diámetro	Fuste cilíndrico	13	De $\varnothing$ 0,6 a 1,8 m	$\leq 45$	$\leq 1000$
		Base ensanchada	14	Como arriba pero $\varnothing$ base $\leq 3 \cdot \varnothing$ fuste	$\leq 45$	Muy altas
	Pequeño diámetro	15	De $\varnothing$ 0,225 a 0,55 m	$\leq 36$	$\leq 1000$	

Fuente: Jiménez J., 1996.

Los pilotes de reposición son los sondeados, pero no siempre con concreto in situ, a veces se usan en forma parcial o total piezas prefabricadas.

<b>CUADRO 5. INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFÍA EN LA SELECCIÓN DEL PILOTE</b>		
Condición topográfica:	Tipos de pilote apropiados	Observaciones
<b>I. Geometría de la superficie:</b>		
Llano (pendiente < 15%)	11, 12. Con material sobre orugas también 13, 14 y 15.	Todos son adecuados si se hace un movimiento de tierras que allane el terreno.
Con varios niveles	Todos los pilotes.	Depende de la dificultad de acceso a los diferentes niveles.
<b>II. Drenaje:</b>		
Inundado	11	El movimiento del equipo pesado puede ser difícil.
Nivel freático alto (prof. < 1,5 m)	Todos los pilotes.	Los de reposición pueden necesitar estibación en toda su altura.
Bien drenado	Todos los pilotes.	
Corrientes de agua subterránea	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.	
<b>III. Obstrucciones:</b>		
Altura disponible pequeña (<6 m)	8 y 11.	También puede usarse pilotes empalmados
Altura disponible media (6 - 8 m)	8, 11, 12 y 15	También puede usarse pilotes empalmados
Espacio limitado en horizontal < 4,5 m alrededor del pilote	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 15.	
Cimentaciones antiguas	4, 5, 6, 9, 11, 13, 14 y 15.	Puede hacer falta trépano.
Conducciones (agua, electricidad, etc.)	11, 12, 13, 14 y 15.	Los pilotes de reposición producen nuevas vibraciones.
<b>IV. Estructuras próximas:</b>		
Sensibles a vibraciones, por sí, o por su contenido.	8, 12, 13, 14 y 15.	Los tipo 8 pueden ser los mejores.
Que no aceptan asentamiento alguno.	13, 14 y 15.	Estibados para evitar socavación.
Cimentaciones superficiales	13, 14 y 15.	Estibados para evitar socavación.
<b>V. Estructuras marítimas:</b>		
Sin acceso terrestre (golfines, plataformas, etc.)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9.	
Con acceso terrestre (muelles, pantalanes, etc.)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14 y 15.	

Fuente: Jiménez J., 1996.

<b>CUADRO 6. INFLUENCIA DEL TIPO DE SUELO EN LA SELECCIÓN DEL PILOTE</b>		
Tipo de suelo:	Tipos de pilote apropiados	Observaciones
<b>I. Rocas:</b>		
Duras (granito, caliza, mármoles, pizarras)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 13, 14 y 15.	Considerar la influencia de la estratificación. Cavernas. Fallas.
Blandas (creta, esquistos arcillosos, cayuelas, areniscas blandas).	4, 5, 6, 10, 11, 13 y 15.	Los dilatómetros pueden ser útiles en estos casos.
<b>II. Suelos granulares:</b>		
Arenas bien graduadas y zahorras, ambas compactadas.	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11 y 12.	Los de reposición pueden necesitar estibación en toda su altura.
Arenas bien graduadas y zahorras, ambas flojas.	1, 2, 3, 7, 8, 9 y 10.	En altamar, los pilotes de rosca pueden ser solución muy apropiada con material a flote.
Arena uniforme compactada.	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10.	
Arena uniforme floja.	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 y 10.	Las arenas que fluyen no permiten pilotes hincados de concreto in situ.
<b>III. Suelos cohesivos:</b>		
Arcillas muy firmes. Arcillas esquistosas.	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 13, 14 y 15.	Si hay muchos bolos o son muy grandes, los tipo 11, 13 y 14 son preferibles.
Acillas firmes y medias. Arcillas arenosas.	4, 5, 6, 9, 11, 12, 13, 14 y 15.	Una hinca cerrada de pilotes de desplazamiento puede producir un levantamiento fuerte del terreno.
Limos y arcillas blandas.	7, 10, 11, 12, 13, 14 y 15.	Puede hacer falta estibación en toda su altura.
<b>IV. Varios:</b>		
Capas de carbón (alternancias con areniscas, arcillas y otras rocas blandas).	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 13 y 14.	Importante sondear hasta al menos 6 m bajo la punta.
Rellenos.	Todos	Generalmente se atraviesan hasta terreno firme. Investigar la posible corrosión.

Fuente: Jiménez J., 1996.

Zahorra: material formado por áridos no triturados, suelos granulares, o mezcla de ambos, cuya granulometría es de tipo continua.

<b>CUADRO 7. INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA EN LA SELECCIÓN DEL PILOTE</b>		
Tipo de estructura:	Tipos de pilote apropiados	Observaciones
<b>I. Por las cargas:</b>		
Ligeras (habitación o escuela de 1 o 2 pisos).	1, 2, 10, 11, 12 y 13.	
Medias (habitación hasta 8 pisos, hospitales, oficinas hasta 7 pisos).	Todos	
Pesadas (edificios de más de 8 pisos, almacenes pesados, talleres).	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 13 y 14.	
<b>II. Número de soportes:</b>		
< 20	2, 3, 11, 12 y 15.	Los prefabricados, si pueden comprarse hechos.
20 - 200	Todos	
> 200	Todos	
<b>III. Sensibilidad al asentamiento:</b>		
Muy sensibles.	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14 y 15.	
Normales (estructuras reticuladas de 1 o 2 pisos, puentes, flexibles: estructuras industriales ligeras).	Todos	

Fuente: Jiménez J., 1996.

En la herramienta, se tomaron todas las influencias mencionadas en las tablas anteriores y se colocaron en barras desplegadas, de manera que el analista pueda elegir las diferentes condiciones que se presentan en su proyecto específicamente, de este modo, el programa será capaz de mostrarle cual o cuales pilotes son los más adecuados para dicho proyecto.

Una vez elegido el que más le parezca de los sugeridos por Microsoft Excel 2007®, aparecen las características principales del elemento como un resumen de los cuadros 3 y 4.

Lo que queda es, entonces analizar el comportamiento del suelo ante la presencia de este pilote.

## **Capacidad de carga axial última de un pilote**

En este estudio se considera como la capacidad soportante del suelo, ya que no se está analizando el pilote como elemento estructural a diseñar y en la mayoría de los casos se pide ya prefabricado para que soporte la carga que se requiere trasladar al subsuelo.

Es por ello que solo se revisa el comportamiento del material que soportará las cargas en última instancia.

Cabe destacar que los estratos se siguen considerando horizontales y con propiedades

semejantes en todo su espesor y que además, se analiza para una condición en la que se supone que el elemento no provocará daños a estructuras subterráneas existentes.

Debido a que en el libro Geotecnia y Cimientos III no se menciona cómo calcular la capacidad axial de un pilote, esta parte de la investigación fue hecha a través del Código de Cimentaciones de Costa Rica, en el que sí se considera este apartado, por esta razón, las ecuaciones que a continuación se presentan están tomadas de este código.

## Cálculo elástico de la capacidad soportante del suelo

Existen varios métodos para su determinación.

Este en particular expresa que: “la capacidad de carga última de un pilote ( $Q_{ult}$ ) es la suma de la fricción entre el fuste y el suelo que le rodea ( $Q_{fricción}$ ) y la carga resistida en la base o punta ( $Q_{punta}$ )”. (Asociación Costarricense de Geotecnia, 2009)

$$Q_{ult} = Q_{fricción} + Q_{punta} \quad (\text{Ecuación 77})$$

## Capacidad de carga en suelos granulares

Calculada por:

$$Q_{fricción} = \sum_{i=0}^L K \sigma_{oi}' \tan \delta P^* \Delta l_i \quad (\text{Ecuación 78})$$

Con  $K$ : coeficiente de empuje lateral;  $\sigma_{oi}'$ : esfuerzo vertical efectivo promedio en el tramo  $\Delta l_i$  [kPa];  $\delta$ : ángulo de fricción entre pilote y suelo [°];  $P^*$ : perímetro [m];  $\Delta l_i$ : longitud del tramo analizado [m]; y  $f_s$ : fricción suelo-pilote [kPa].

Esta ecuación analiza solo una parte de la longitud del pilote, la razón por la cual se hace de esta manera es que el suelo que atraviesa el pilote está dividido en varios estratos y esta es la manera de analizar cada uno.

La herramienta da la posibilidad de analizar hasta diez estratos diferentes, ya sean granulares o cohesivos para efectos de fricción

Los siguientes cuadros dan una guía sobre los valores del coeficiente de empuje y el ángulo de fricción entresuelo y pilote que se deben usar en relación al coeficiente de empuje pasivo de Rankine ( $K_0$ ) y el ángulo de fricción interna del estrato granular.

<b>CUADRO 8. VALORES RECOMENDADOS PARA EL COEFICIENTE DE EMPUJE</b>	
Tipo de pilote	$K / K_0$
Perforado con chorro	0,5 a 0,67
Preexcavado	0,67 a 1
Bajo desplazamiento	0,75 a 1,25
Alto desplazamiento	1 a 2

Fuente: Jiménez J., 1996.

<b>CUADRO 9. ÁNGULO DE FRICCIÓN ENTRE SUELOS GRANULARES Y PILOTES</b>	
Material	$\delta$
Madera	0,8Ø a 0,9Ø
Concreto rugoso, colado en sitio	1,0Ø
Concreto liso, prefabricado	0,8Ø a 1,0Ø
Acero liso	0,5Ø a 0,7Ø
Acero corrugado	0,7Ø a 0,9Ø

Fuente: Jiménez J., 1996.

Estos valores solo son apropiados para fundaciones con longitud no mayor a 15 veces el diámetro. Para longitudes mayores, la fricción no continúa aumentando sino que alcanza un valor máximo.

Además, la resistencia en la base se puede expresar como:

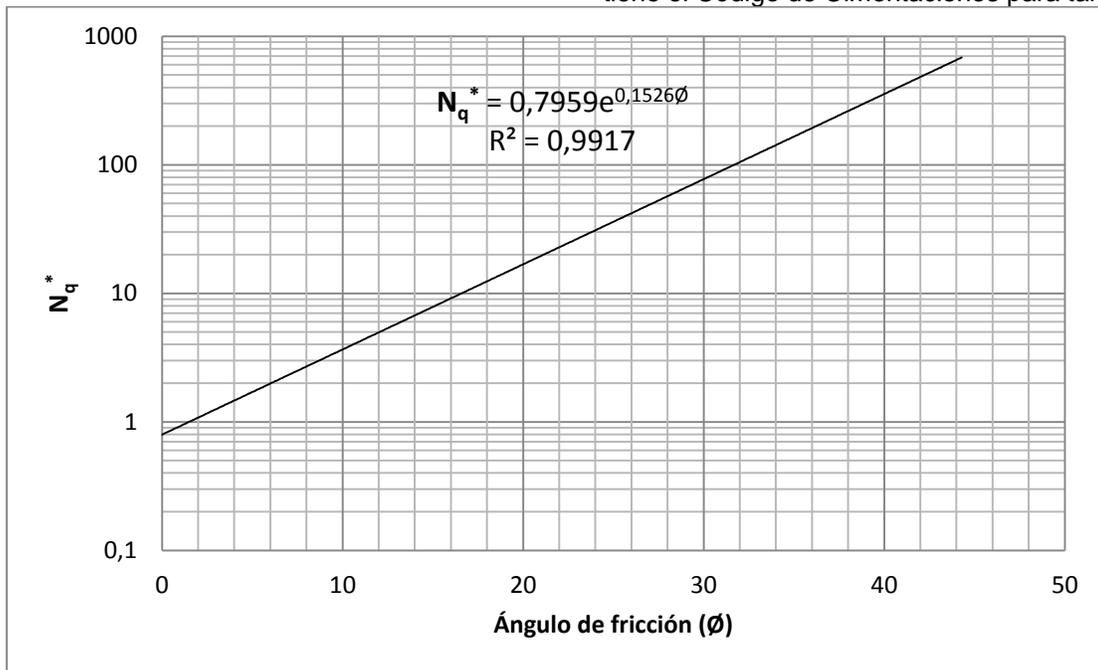
$$Q_{punta} = q_b A_b = (\sigma' N_q^*) A_b \leq q_{lim} A_b \quad (\text{Ecuación 79})$$

$$q_{lim} = 50 N_q^* \tan \phi \quad (\text{Ecuación 80})$$

Donde  $\sigma'$ : esfuerzo vertical efectivo a nivel de la base [kPa];  $N_q^*$ : factor de capacidad de carga para un fundación profunda;  $A_b$ : área

transversal del pilote en la base [m<sup>2</sup>]; y  $q_b$ : capacidad de soporte del suelo a nivel de punta [kPa].

La siguiente figura sirve para determinar el valor del factor de capacidad de carga para una fundación profunda y se basa en el gráfico que tiene el Código de Cimentaciones para tal fin:



MICROSOFT EXCEL 2007®

**Figura 9.** Factor de capacidad de carga  $N_q^*$  para cimentaciones profundas según criterio de Meyerhof.

Para el uso adecuado de la anterior figura debe garantizarse que el pilote quede empotrado dentro de la capa de apoyo una distancia  $D$  definida por:

$$D = 4B \tan(45^\circ + \phi'/2) \quad (\text{Ecuación 81})$$

Siendo  $B$ : ancho o diámetro del cimientado [m]; y  $\phi'$ : ángulo de fricción efectiva del suelo [°].

### Capacidad de carga en suelos cohesivos (condición no drenada)

Las componentes se calculan, en este caso, como:

$$Q_{fricción} = 0,3 * P * \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}' \Delta l_i \quad (\text{Ecuación 82})$$

$$Q_{punta} = q_b A_b = C_u N_c^* A_b \quad (\text{Ecuación 83})$$

Con  $C_A$ : adherencia suelo-pilote;  $C_u$ : resistencia al corte no drenada promedio del suelo (para  $Q_{fricción}$ , usarse el valor ponderado de  $C_u$  a lo largo del fuste. Para  $Q_{punta}$ , considerarse el valor ponderado a una profundidad bajo la base de 1,5 a 2 m);  $A_f$ : área de fuste [m<sup>2</sup>];  $A_b$ : área de la base del pilote [m<sup>2</sup>]; y  $N_c^*$ : factor de capacidad de carga para pilotes en arcilla (tomado como 9).

### Pilotes sobre roca

Las cimentaciones profundas apoyadas o empotradas en roca generalmente pueden soportar grandes cargas.

### Capacidad de carga por punta en roca

Se aplican los mismos principios generales que para capacidad de carga por punta de pilotes en suelos.

## Capacidad de carga por fricción entre concreto y roca

En caso de que la carga se transmita lateralmente a lo largo de la longitud empotrada en roca:

$$Q_{ult} = \pi D H_s \tau_a \quad (\text{Ecuación 84})$$

Siendo  $D$ : diámetro del pilote [m];  $H_s$ : profundidad del empotramiento en roca sana [m]; y  $\tau_a$ : resistencia por fricción entre concreto y roca [kPa].

## Pilotes sometido a fuerzas de extracción

La resistencia última a la extracción será:

$$Q_{tu} = Q_{fricción} + W \quad (\text{Ecuación 85})$$

Con  $W$ : peso del pilote.

En este caso es obvio que la punta no contribuye a sostener el pilote, ya que no está anclado al mismo.

## La hincada dinámica de pilotes

Este procedimiento es el más antiguo para la colocación de pilotes.

La presión máxima que el mazo produce sobre la cabeza está dada por:

$$\sigma^* = K_{V0} \sqrt{h_e} \quad (\text{Ecuación 86})$$

Donde  $h_e$ : altura de caída libre del mazo, en cm y  $K_{V0}$ : constante que vale 30 para concreto y madera, 120 para acero con sufridera de madera y 180 para acero con cabeza desnuda.

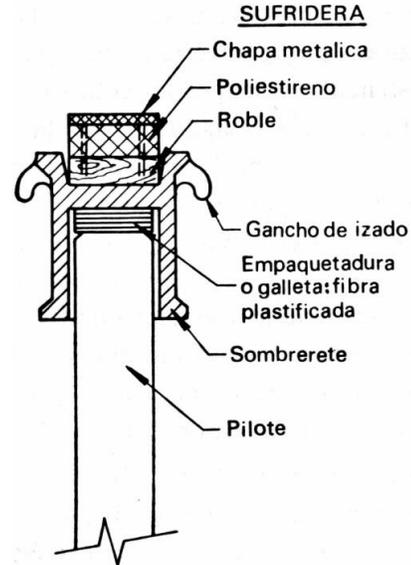


Figura 10. Sombrero para hincada de pilotes. (Jiménez J, 1996)

La tracción máxima en la cabeza suponiendo que no se amortigua la onda será:

$$\sigma_t^* = 8\sigma^* \left( \frac{L}{L_{onda}} \right)^3 \quad (\text{Ecuación 87})$$

$$L_{onda} = \frac{e\pi}{\sqrt{p^2 - n^2}} \quad (\text{Ecuación 88})$$

$$p^2 = \frac{C_s P_p c^2}{E A L P_m} \quad (\text{Ecuación 89})$$

$$n = \frac{C_s c}{2EA} \quad (\text{Ecuación 90})$$

$$C_s = \frac{E_{sf} E_g}{E_{sf} h_g + E_g h_{sf}} A \quad (\text{Ecuación 91})$$

$$c = \sqrt{\frac{Eg}{\gamma}} \quad (\text{Ecuación 92})$$

Con  $L$ : longitud del pilote;  $L_{onda}$ : longitud de onda;  $C_s$ : coeficiente de rigidez del sombrero;  $E_{sf}$ : módulo de elasticidad de la sufridera;  $h_{sf}$ : espesor de la sufridera;  $E_g$ : módulo de elasticidad de la galleta;  $h_g$ : espesor de la galleta;  $A$ : área de sección del pilote;  $g$ : aceleración de la gravedad;  $\gamma$ : peso específico del concreto;  $E$ : módulo de rigidez del concreto; y  $c$ : velocidad de propagación de onda.

## Fórmula de Janbú

Existen una gran cantidad de métodos para determinar la carga de hundimiento y en comportamiento, en general, del pilote ante la aplicación de una carga que lo golpea, sin embargo, entre las fórmulas más recientes, está la de Janbú que es una de las que está respaldada por mucha experimentación y que no es tan complicada como otros métodos que requieren análisis exhaustivos.

La fórmula de Janbú es la siguiente:

$$Q_h = \frac{1}{K_u} \frac{\eta P_m H}{\delta_r} \quad (\text{Ecuación 93})$$

$$K_u = C_d \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda_e}{C_d}} \right) \quad (\text{Ecuación 94})$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 \frac{P_p}{P_m} \quad (\text{Ecuación 95})$$

$$\lambda_e = \frac{P_m L H}{A E \delta_r^2} \quad (\text{Ecuación 96})$$

Siendo  $P_m$ : peso de la maza;  $P_p$ : peso del pilote;  $\delta_r$ : Rechazo medido en hinca;  $\eta = 0,55$ ; y  $H$ : altura de caída de la maza

## Efecto de grupo de pilotes verticales

La capacidad de un grupo de pilotes se ve afectada por la acción combinada de cada pilote individual. Es por esta razón que se emplea el término "eficiencia" para medir la relación entre la capacidad del grupo y la suma de capacidades de todos los pilotes que lo componen.

Este efecto es diferente en terrenos cohesivos que en granulares, por lo general, en arcillas la capacidad del grupo es menor a la suma de capacidades individuales, por lo contrario, en arenas la eficiencia suele ser superior a la unidad, es decir, mejora el terreno, sin embargo se considerará el caso más crítico que es tomar la resistencia del grupo igual a la suma de las de los pilotes que forman parte de este.

El Código de Cimentaciones de Costa Rica usa la siguiente fórmula para calcular la eficiencia de un grupo de pilotes en arcilla:

$$\varepsilon = 1 - \frac{[\arctan(D/S)](n-1)m + (m-1)n}{90mn} \quad (\text{Ecuación 97})$$

Donde  $D$ : diámetro del pilote [m];  $S$ : separación centro a centro de pilotes [m];  $m$ : número de hileras de pilotes en grupo; y  $n$ : número de pilotes por hilera.

La carga de hundimiento de un grupo de  $N$  pilotes ( $Q_{hg}$ ) en base a la de un pilote aislado ( $Q_{ha}$ ) se determina con la expresión:

$$Q_{hg} = \varepsilon N Q_{ha} \quad (\text{Ecuación 98})$$

Además se tiene la fórmula de acción de Los Ángeles, que según Jiménez es muy aceptable:

$$\varepsilon = 1 - \frac{D}{\pi S m n} [(n-1)m + (m-1)n + \sqrt{2}(m-1)(n-1)] \quad (\text{Ecuación 99})$$

## Pilotes en grupo sometidos a momento y cortante

Suponiendo que los pilotes están unidos por una placa de amarre que es un elemento rígido a flexión y a carga axial.

La manera de distribuir la carga vertical y saber la que corresponde a cada pilote se muestra a continuación:

$$P_i = \frac{P k_i}{K_T} \pm \frac{P e_x d_{xi} k_i}{k_{\theta y}} \pm \frac{P e_y d_{yi} k_i}{k_{\theta x}} \quad (\text{Ecuación 100})$$

$$e_x = \frac{M_{x0}}{P} \quad (\text{Ecuación 101})$$

$$e_y = \frac{M_{y0}}{P} \quad (\text{Ecuación 102})$$

$$k_i = \frac{A_i E}{L_i} \quad (\text{Ecuación 103})$$

$$K_T = \sum k_i \quad (\text{Ecuación 104})$$

$$k_{\theta y} = \sum k_i d_{xi}^2 \quad (\text{Ecuación 105})$$

$$k_{\theta x} = \sum k_i d_{yi}^2 \quad (\text{Ecuación 106})$$

Con  $P_i$ : carga axial del pilote  $i$ ;  $P$ : carga axial del grupo;  $k_i$ : rigidez axial del pilote;  $L_i$ : longitud de apoyo puntual del pilote (Para pilote por punta es igual a su longitud y para pilotes por fricción igual a la mitad);  $M_{x0}$  y  $M_{y0}$ : momentos respecto al punto  $O$  que es el centro de rigidez del grupo; y  $d_{xi}$  y  $d_{yi}$ : posición del pilote respecto a los ejes generales.

La carga lateral se distribuye entre los pilotes según su rigidez lateral:

$$V_i = V \frac{K_{Li}}{\sum K_{Li}} \quad (\text{Ecuación 107})$$

$$K_{Li} = \frac{E_i I_p}{L_i^3} \quad (\text{Ecuación 108})$$

Siendo  $V$ : cortante en el grupo de pilotes;  $V_i$ : cortante en el pilote  $i$ ;  $K_{Li}$ : rigidez lateral relativa del pilote; e  $I_p$ : momento de inercia del pilote.

## Efecto de grupo en arcillas

Para considerar el fenómeno de rotura en bloque, la capacidad soportante de un grupo cuadrado ( $m \times m$  pilotes), suponiendo un coeficiente en la punta de 9, sería: (Jiménez J, 1996)

$$Q_{hg} = 4C_u L[(m-1)S + D] + 9C_u [(m-1)S + D]^2 \quad (\text{Ecuación 109})$$

$C_u$ : resistencia al corte sin denar.

Para espaciamientos menores al espaciamiento crítico habrá que considerar la rotura en bloque y por encima despreciar la influencia de la placa de amarre.

El espaciamiento crítico será:

$$S_c = 1,1 + 0,4N^{0,4} \quad (\text{Ecuación 110})$$

Además, la eficiencia crítica se calcula como:

$$\varepsilon_c = 0,5 + \frac{0,4}{(N-0,9)^{0,1}} \quad (\text{Ecuación 111})$$

## Efecto de grupo en arenas

Debido a que no se considerará el aumento de la eficiencia del grupo producto del mejoramiento que tiene el suelo al hincarle un elemento rígido, solo se toman en cuenta los asentamientos, tanto del grupo como individual.

Pilote aislado:

$$w_1 = \frac{D}{30F}; F \geq 3 \quad (\text{Ecuación 112})$$

Grupo de pilotes:

$$w_g = \frac{2p\sqrt{B}}{N} I \quad (\text{Ecuación 113})$$

$$I = 1 - \frac{L}{8B} \geq 0,5 \quad (\text{Ecuación 114})$$

Donde  $w_g$ : asiento del grupo [mm];  $N$ : número de pilotes del grupo;  $p$ : presión neta que transmite el grupo [kN/m<sup>2</sup>]; y  $B$ : anchura del grupo [m].

## Interacción pilote - terreno: acciones laterales exteriores

Cuando una fuerza es aplicada lateralmente y de manera externa al pilote, provoca presiones y momentos en el suelo adyacente, estos fenómenos pueden llevar a que el suelo se deforme en gran medida y falle.

Para valorar la condición del suelo y limitar la carga lateral que se puede colocar a cada pilote, se revisa tanto la condición de servicio como la de rotura.

## Métodos de cálculo en servicio

En cada punto del pilote existe una relación directa del terreno,  $p$ , y el desplazamiento del pilote,  $y$ , a través de un coeficiente,  $K$ , denominado "de reacción del terreno" o "de balasto":  $p = K * y$ . Con dicha hipótesis la ecuación diferencial que rige el problema de flexión del pilote es: (Jiménez J, 1996)

$$E_p I_p (d^4 y / dZ^4) + K B y = 0 \quad (\text{Ecuación 115})$$

Siendo  $E_p l_p$ : la rigidez del pilote;  $B$ : su anchura transversal a la carga aplicada; e  $y$ : el desplazamiento de un punto del pilote situado a una distancia  $Z$  de la superficie del terreno.

En caso de suelos arcillosos (balasto constante), se tiene la siguiente solución analítica para una carga  $H$  aplicada a nivel del terreno: (Jiménez J, 1996)

$$y_z = \frac{2H}{K\lambda} [e^{-Z/\lambda} \cos(Z/\lambda)] \quad (\text{Ecuación 116})$$

Con:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{4EI}{KB}} \quad (\text{Ecuación 117})$$

En suelos granulares ( $K_Z = n_h \frac{Z}{B}$ ), se tiene:

$$y_z = A_y \frac{HT^3}{E_p l_p} + B_y \frac{HT^2}{E_p l_p} \quad (\text{Ecuación 118})$$

$$M_z = A_m \frac{HT^3}{E_p l_p} + B_m \frac{HT^2}{E_p l_p} \quad (\text{Ecuación 119})$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} \quad (\text{Ecuación 120})$$

Donde  $M$ : momento a nivel del terreno;  $H$ : fuerza a nivel del terreno;  $A$  y  $B$ : coeficientes de desplazamiento, según la siguiente figura:

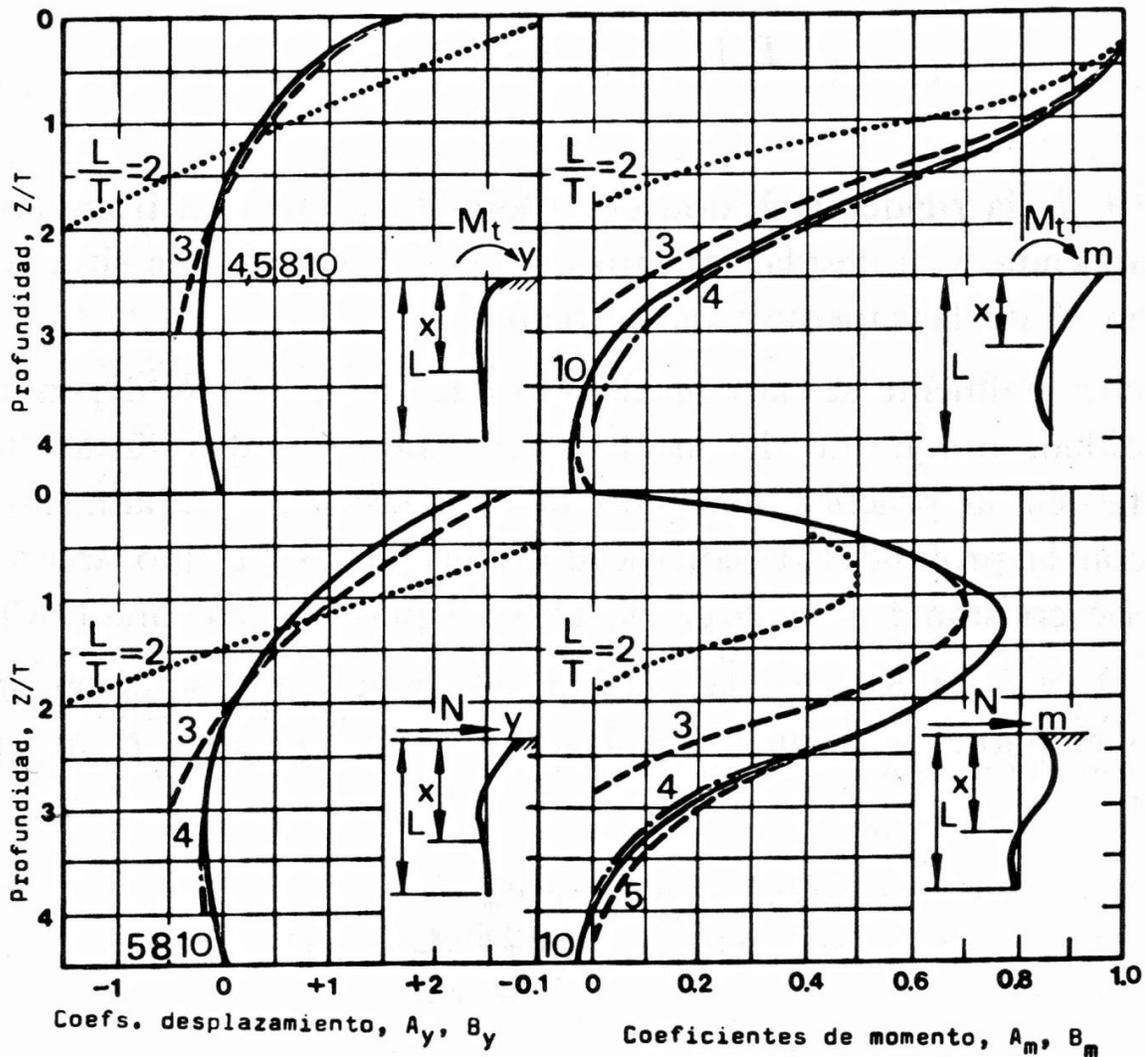
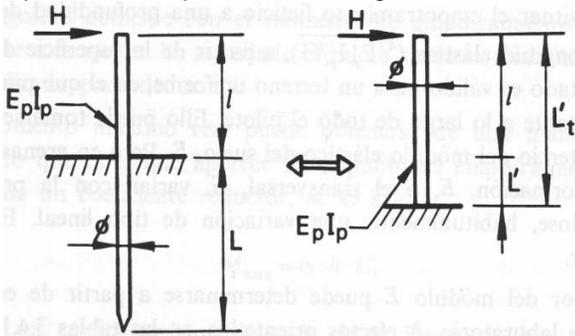


Figura 11. Coeficientes adimensionales A y B para el cálculo de desplazamientos y momentos. (Jiménez J, 1996)

Como la figura 12 es bastante extensa, para facilitar el trabajo, se tomó cada línea por separado y se sacaron varios puntos para que Microsoft Excel 2007® sea capaz de interpolar su comportamiento, de manera que solo se requiere conocer las relaciones Z/T y L/T para que se generen los valores requeridos.

### Método práctico de cálculo en servicio

Con el objetivo de evitar el empleo de soluciones muy extensas para estimar las deformaciones y esfuerzos en pilotes aislados en situación de servicio, en los últimos años se han desarrollado diversos procedimientos simplificados que tienen equivalencia al pilote como el siguiente:



**Figura 12.** Pieza prismática empotrada equivalente al pilote. (Jiménez J, 1996)

Tomando  $G = E/3$ , se puede determinar la longitud de empotramiento ficticio a través de estas ecuaciones:

a) Arcillas:

$$L' = 1,2 * \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{E/3}} \quad (\text{Ecuación 121})$$

b) Arenas y suelos preconsolidados:

$$L' = 1,2 * f * \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{E_L/3}} \quad (\text{Ecuación 122})$$

$E_L$ : módulo elástico en la punta del pilote.

$$X = E_0/E_L \quad (\text{Ecuación 123})$$

<b>CUADRO 10. VALORES DEL COEFICIENTE <math>f</math> PARA EL MÉTODO PRÁCTICO</b>	
$X$	$f$
1,70	0,0
1,25	0,5
1,00	1,0

Fuente: Jiménez J., 1996.

El máximo momento real será:

$$M_{m\acute{a}x} = mHL_T' \quad (\text{Ecuación 124})$$

Donde  $m$ : coeficiente reductor tomado de la figura 17.

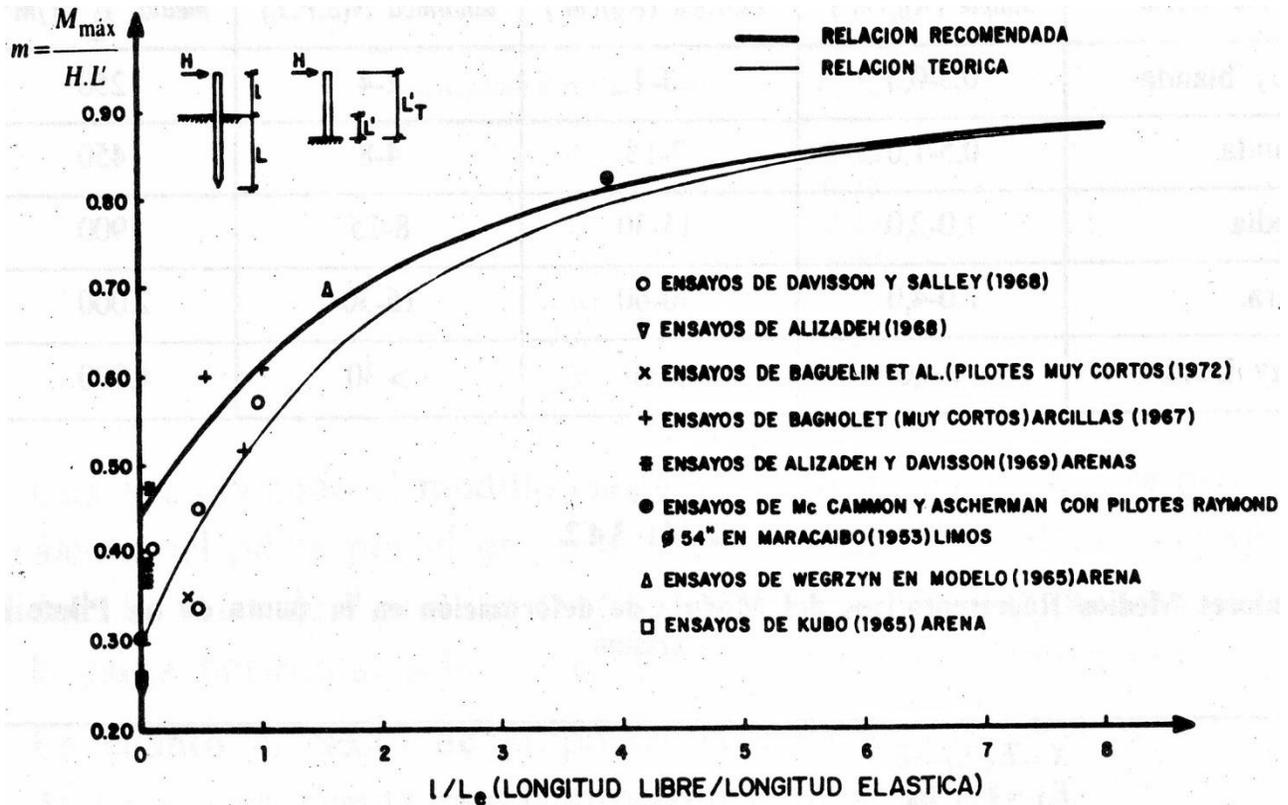


Figura 13. Diagrama para el cálculo del momento máximo de servicio. (Jiménez J, 1996)

Si el pilote tiene su extremo superior empotrado:

$$M_{m\acute{a}x} = mH \left( \frac{l+L'}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 125})$$

NOTA: estas ecuaciones son válidas cuando  $L \geq (2,5 \text{ o } 3) * L_{e \text{ media}}$

Si un pilote se encuentra inclinado, su comportamiento frente a esfuerzos horizontales se hace notoriamente distinto. El siguiente cuadro permite evaluar la relación del módulo de elasticidad aparente del terreno para el cálculo del pilote inclinado ( $E_s$ ) y del pilote vertical ( $E_{so}$ ) en función del ángulo de inclinación del pilote ( $\varphi$ ).

CUADRO 11. RELACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL TERRENO PARA PILOTE INCLINADO Y PILOTE VERTICAL	
$\varphi$ (°)	$E_s / E_{so}$
30	0,60
20	0,77
10	0,90
0	1,00
-10	1,16
-20	1,25
-30	1,30

Fuente: Jiménez J., 1996.

El efecto de grupo tiene como consecuencia el que los pilotes se comporten como si el empotramiento ficticio equivalente se encontrase situado a una mayor profundidad que la estimada para pilote aislado, debido a que en algunos casos el efecto de uno de ellos se traslapa con el

de otro y provoca un comportamiento diferente en el terreno.

Esto se considera con:

$$L_g = L' * \alpha$$

(Ecuación 126)

Con  $L_g$ : longitud de empotramiento equivalente para un pilote en grupo;  $\alpha$ : coeficiente de efecto del grupo (tomado de la figura 18).

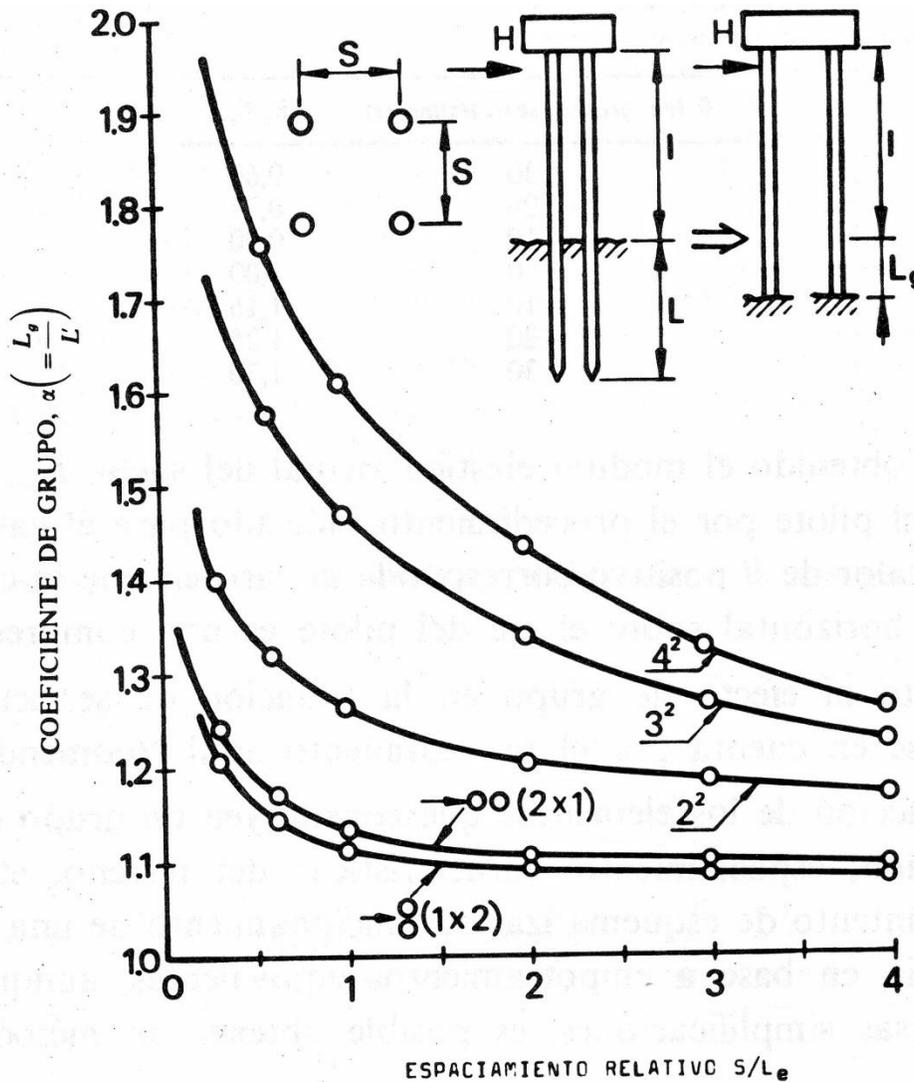


Figura 14. Valores del coeficiente  $\alpha$  para la determinación del empotramiento ficticio en grupos de pilotes. (Jiménez J, 1996)

El momento máximo de un pilote en grupo debe calcularse multiplicando el máximo para un pilote aislado por 1,1.

### Situación de rotura

Es preciso conocer la seguridad de la cimentación frente al agotamiento de la capacidad resistente del terreno.

Para pilotes hincados en terrenos granulares puede utilizarse el método de Blum para establecer la fuerza horizontal que agota la capacidad resistente del terreno.

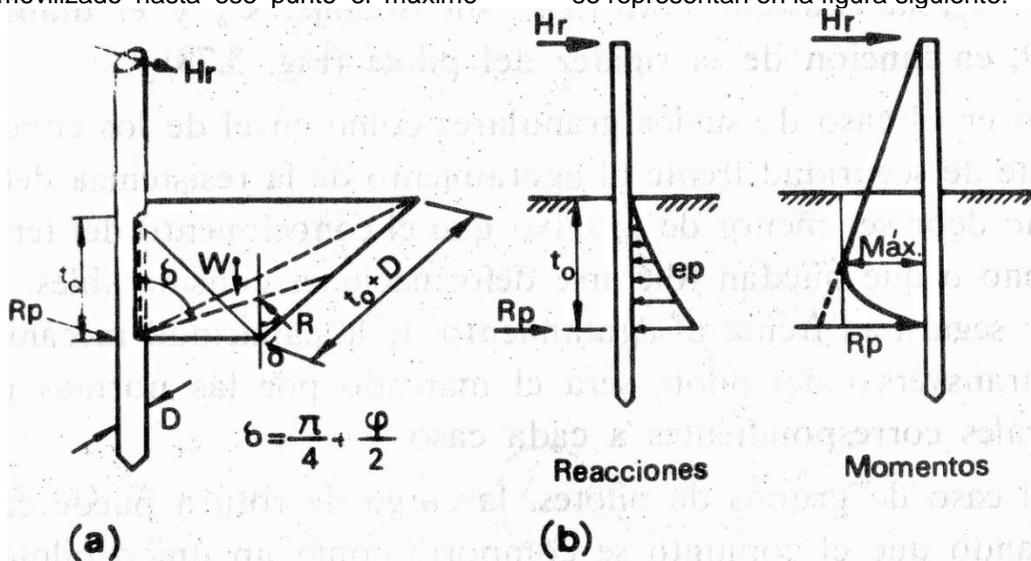
Jiménez explica el método de Blum así:

Se supone la formación de una cuña prismática que resiste pasivamente el esfuerzo exterior y que alcanza hasta la profundidad en que se anula el momento flector sobre el pilote denominada  $t_0$ .

En ese punto se sustituye la acción del terreno inmediatamente inferior por la fuerza

concentrada equivalente,  $R_p$ . Dicha fuerza representa la acción del terreno en la zona inferior del pilote y compensa el hecho de suponer movilizado hasta ese punto el máximo

empuje pasivo. Los empujes unitarios del terreno son los correspondientes a un estado Rankine. Las leyes de reacciones y momentos supuestos se representan en la figura siguiente:



**Figura 15.** Método de Blum. a) Cuña prismática pasiva supuesta en el método de Blum y fuerzas actuantes. b) Deformada, reacciones y momentos flectores según el método de Blum. (Jiménez J, 1996)

La fuerza de rotura  $H_r$  para un pilote libre en la cabeza resulta ser:

$$H_r = \frac{t_0^3(t_0+4D) K_p \gamma'}{24(t_0+l)} \quad (\text{Ecuación 127})$$

Siendo  $t_0$ : profundidad de la cuña;  $\gamma'$ : densidad efectiva del terreno;  $K_p$ : coeficiente de empuje pasivo de Rankine.

Si el pilote puede considerarse empotrado en la cabeza:

$$H_r = K_p \gamma' \left[ \frac{t_0^3(t_0+4D)}{12(t_0+l)} - \frac{Dt_0^4}{12(t_0+l)^2} - \frac{Dt_0^5}{60(t_0+l)^2} \right] \quad (\text{Ecuación 128})$$

Para terrenos cohesivos la reacción del suelo no debe superar el valor de  $(8 \text{ a } 12) * C_u * D$ , siendo  $C_u$  la cohesión no drenada del suelo y  $D$  el diámetro del pilote.

Tanto en suelos granulares como cohesivos, el coeficiente de seguridad ( $H_r/H$ ) no debe ser menor a 2.

En grupos de pilotes, la carga de rotura puede calcularse considerando que el conjunto se comporta como un único pilote de ancho igual a la frontal del grupo. Este procedimiento resulta,

en muchos casos, muy conservador debido a que ignora la contribución de las filas de pilotes frontales.

## Interacción pilote - terreno: acciones internas

### Rozamiento negativo

Un pilote que atraviesa una capa de terreno que se ve sometida a un proceso de consolidación debido de una carga externa cercana, se producirá un descenso del suelo próximo al fuste de los pilotes con respecto a estos. Como los pilotes se moverán menos que el terreno circundante, éste tenderá a adherirse a su fuste, provocando unas tensiones.

El rozamiento negativo se calcula con:

$$f_n = K_s * \sigma'_v * \tan \delta \quad (\text{Ecuación 129})$$

Con  $\delta$ : ángulo de rozamiento suelo-pilote movilizado a largo plazo;  $\sigma'_v$ : esfuerzo vertical

efectivo promedio a lo largo del tramo que genera fricción negativa.

CUADRO 12. VALORES PROPUESTOS POR BJERRUM PARA ROZAMIENTO NEGATIVO	
Tipo de suelo	$f_n/\sigma_v' = K_s \tan \delta$
Arcilla limosa	0,25
Arcilla poco plástica	0,20
Arcilla plástica	0,15
Arcilla muy plástica	0,10

Fuente: Jiménez J., 1996.

En suelos arenosos puede usarse la misma fórmula anterior, donde  $K_s$  puede tomarse como el coeficiente de empuje en reposo y  $\delta = 2\varphi/3$ , con  $\varphi$ : ángulo de fricción interna de la arena.

En este aspecto, se consideran hasta 5 estratos que puedan tener este efecto y que pueden irse guardando dependiendo de las condiciones de cada uno.

## Empujes laterales

Cuando el movimiento del terreno es perpendicular al pilote, cualquiera que sea la magnitud del movimiento, tenderá a originar un cierto nivel de empuje.

El valor unitario máximo  $P_H$  del empuje debe tomarse como:

$$P_H = \beta K_0 \Delta \sigma_z' b \quad (\text{Ecuación 130})$$

Siendo  $b$ : anchura del pilote para perfiles metálicos;  $K_0$ : coeficiente de empuje en el equilibrio (igual a 0,4);  $\Delta \sigma_z'$ : incremento de la tensión vertical efectiva en el punto que se determina  $P_H$ ;  $\beta$ : coeficiente de concentración de tensiones (igual a 1).

NOTA: para cimientos circulares, la anchura será  $2b$ .

Los momentos máximos serán:

$$M_{emp.} = -0,45 \frac{(L^2 - a^2) a^2 p_H}{L^2} \quad (\text{Ecuación 131})$$

$$M_{centro\ estrato} = 0,45 a^2 \left( 2 - \frac{3a}{L} + \frac{a^3}{L^3} \right) p_H \quad (\text{Ecuación 132})$$

$$p_H = p_v - 2C_u \quad (\text{Ecuación 133})$$

El empuje por unidad de longitud,  $p_p$ , que actúa sobre los pilotes, se obtendrá de la siguiente manera:

$$p_p = \min \begin{cases} (p_v - 2C_u)S \\ (p_v - 2C_u)3b \\ (p_v - 2C_u)H \\ (p_v - 2C_u) \frac{B_c}{n} \end{cases} \quad (\text{Ecuación 134})$$

Con  $S$ : espaciamiento entre pilotes;  $H$ : espesor de estrato blando;  $B_c$ : anchura del pilote en la dirección del movimiento y  $n$ : número de filas en esa dirección.

## Empujes horizontales debidos a fenómenos de inestabilidad

“Un caso particular de interacción pilote-terreno y del problema de empujes laterales “internos” lo constituye el que se presenta cuando una serie de pilotes atraviesan una zona de terreno inestable, por ejemplo, un talud en deslizamiento progresivo.” (Jiménez J, 1996)

“Los movimientos del terreno son muy grandes y puede suponerse que se desarrollan los máximos empujes posibles. Ello supone que no solo será necesario conocer los esfuerzos originados en los pilotes, sino que resulta conveniente estimar cuál es su efecto sobre el terreno en deslizamiento.” (Jiménez J, 1996)

“Para determinar la resistencia al esfuerzo cortante desarrollada por los pilotes de una fila en la superficie de rotura, por unidad de anchura, puede usarse.” (Jiménez J, 1996)

$$V_p = \frac{A_p F_v}{S} n \quad (\text{Ecuación 135})$$

Con  $A_p$ : sección transversal del pilote;  $F_v$ : tensión tangencial admisible en los pilotes;  $S$ : espaciamiento entre pilotes y  $n$ : número de pilotes en la fila.

En cuanto al momento máximo en el pilote, por unidad de anchura, será:

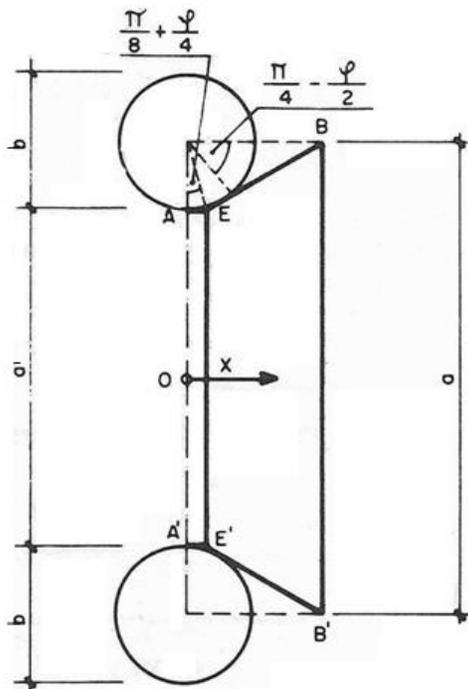
$$M_{m\acute{a}x} = \frac{4ShP_R \cos \alpha}{n} \quad (\text{Ecuación 136})$$

Siendo  $h$ : longitud de pilote por encima de la superficie de rotura;  $P_R$ : empuje total sobre el pilote y  $\alpha$ : ángulo que forma la tangente a la superficie de rotura en su contacto con el pilote con la horizontal.

Admitiendo como válido el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, se tiene que la presión que reciben los pilotes vendrá dada por:

$$p = \frac{\gamma Z}{2} * \frac{1 - \text{sen } \phi}{1 + \text{cos } \phi} \left( 1 - \frac{1 - \text{sen}^2 \phi}{1 + \text{sen } \phi} \right) * \left[ a \left( \frac{a}{a'} \right)^{2 \text{sen } \phi} * e^{\frac{b}{a'} * \frac{\text{sen } \phi * \text{cos } \phi}{1 - \text{sen } \phi} \tan \left( \frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) - a'} \right] \quad (\text{Ecuación 137})$$

Donde  $\phi$ : ángulo de fricción interna y  $Z$ : profundidad.



**Figura 16.** Esquema de rotura del terreno al paso entre dos pilotes. (Jiménez J, 1996)

## Problemas de inestabilidad estructural

“Otro problema de interacción suelo-pilote es el que se presenta en cimentaciones esbeltas sometidas a fuertes compresiones. En este caso, el elemento estructural puede sufrir una flexión lateral a la que se opondría el terreno en la zona de pilote hincada. Si esta reacción no es suficiente la pieza puede ser inestable y pandear.” (Jiménez J, 1996)

Casos por los que se presenta inestabilidad:

a) Pilotes verticales totalmente enterrados, muy largos y con poca rigidez a flexión.

Carga crítica de pandeo:

$$P_{cr} = 2\sqrt{KbE_pI_p} \quad (\text{Ecuación 138})$$

Donde  $K$ : coeficiente de reacción lateral del terreno y  $b$ : anchura del pilote.

Para que el pilote pandee se debe cumplir que:

$$\sigma_{m\acute{a}x} * A_p \geq P_{cr} \quad (\text{Ecuación 139})$$

Con  $\sigma_{m\acute{a}x}$ : tensión de rotura del material del pilote.

b) Pilotes parcialmente enterrados, con longitud libre importante. Suponiendo que el pilote es equivalente a una pieza prismática empotrada a una profundidad  $L_f$ , la carga de pandeo será:

$$P_{cr} = \pi^2 \frac{E_p I_p}{(l + L_f)^2} A \quad (\text{Ecuación 140})$$

$$A = \begin{cases} \text{si cabeza articulada} \therefore 2,04 \\ \text{si cabeza libre} \therefore 0,25 \\ \text{si cabeza empotrada} \therefore 4 \\ \text{si cabeza sin giro, con desplazamiento} \therefore 1 \end{cases} \quad (\text{Ecuación 141})$$

Para arcillas:

$$L_f = 1,4 * \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{Kb}} \quad (\text{Ecuación 142})$$

Para arenas:

$$L_f = 1,8 * \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}} \quad (\text{Ecuación 143})$$

Como se podrá notar, se analizaron en total diez y nueve casos de cimentación que resultan de los tres tipos mencionados.

En el caso de pilotes, no se toman los datos provenientes de la hoja de entrada "Datos" porque se puede considerar un grupo de pilotes que soporte las cargas externas y entonces se dividen las cargas generales entre cada pilote y estas son las que irán a la hoja de pilotes.

## Aspectos generales

Se emplearon las combinaciones de carga que el Código Sísmico presenta para determinar carga última dependiendo la participación de las diferentes acciones.

$$[6 - 1] CU = 1,4CP \quad (\text{Ecuación 144})$$

$$[6 - 2] CU = 1,2CP + 1,6CT + 1,6CE \quad (\text{Ecuación 145})$$

$$[6 - 3] CU = 1,05CP + f_1 CT \pm CS + CE \quad (\text{Ecuación 146})$$

$$[6 - 4] CU = 0,95CP \pm CS + CE \quad (\text{Ecuación 147})$$

Con *CU*: carga última; *CP*: carga permanente; *CT*: carga temporal; *CS*: carga sísmica; *CE*: carga por empuje; y *f<sub>1</sub>*: factor de participación de la carga temporal según ocupación de la estructura.

Para calcular la capacidad del suelo para resistir esas cargas últimas, se aplica una reducción a la capacidad del mismo que depende del siguiente cuadro:

<b>CUADRO 13. FACTORES DE REDUCCIÓN PARA CAPACIDAD SOPORTANTE DE LOS SUELOS</b>	
Combinaciones 6-1 y 6-2	∅
$q_{\min} / q_{\max} \geq 0,25$	0,50
$q_{\min} / q_{\max} < 0,25$	0,60
Combinaciones 6-3 y 6-4	∅
$q_{\min} / q_{\max} \geq 0,25$	0,67
$q_{\min} / q_{\max} < 0,25$	0,83

Fuente: CFIA, 2003

Para bloques rígidos, se calcula la presión máxima y la mínima mediante la siguiente ecuación:

$$q_{\min}^{max} = \frac{P}{A} \left( 1 \pm \frac{6e}{L} \right) \quad (\text{Ecuación 148})$$

Siendo *q<sub>max</sub>*: presión máxima; *q<sub>min</sub>*: presión mínima; *P*: carga axial; *A*: área de sección transversal; *e*: excentricidad de la resultante vertical en la base; y *L*: largo o diámetro del cimiento.

Para la determinación del factor de seguridad a usar se puede acudir a alguno de los siguientes cuadros:

<b>CUADRO 14. FACTORES DE SEGURIDAD TRADICIONALES PARA CAPACIDAD DE SOPORTE</b>	
Condición de carga	FS
Estática	3
Estática + Dinámica	2

Fuente: Asoc. Costarricense de Geotecnia, 2009.

<b>CUADRO 15. FACTORES DE SEGURIDAD PARA CARGAS EXCÉNTRICAS</b>		
Combinación de carga	$q_{\min} / q_{\max}$	FS
Estática	$\geq 0,25$	3,0
	$< 0,25$	2,5
Estática + Dinámica	$\geq 0,25$	2,0
	$< 0,25$	1,6

Fuente: Asoc. Costarricense de Geotecnia, 2009.

# Resultados

A continuación se presenta la herramienta desarrollada, por facilidad las hojas desarrolladas en Microsoft Excel 2007® fueron copiada como imagen.

En algunos casos requieren ser cortadas por su extensión, pero se presentan en orden para mejorar la comprensión.

## **HERRAMIENTA DIGITAL PARA ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DE CIMENTACIONES PROFUNDAS Y SEMIPROFUNDAS**

### **Alcance:**

La presente aplicación sirve para optimizar el tipo de cimiento a utilizar en base a la esbeltez y las condiciones del suelo que lo rodea. Además, permite hacer un análisis del comportamiento, no solo del tipo de fundación recomendado sino el de todos los casos tomados en cuenta, por si el usuario elige otro que no sea el que se le presenta como mejor opción.

No se pretende diseñar el elemento, sino elegir de una serie de cimientos el más conveniente para el proyecto que se desea desarrollar.

### **Limitaciones de uso:**

- 1. Se debe contar, como mínimo, con un estudio de suelos que contenga, para cada estrato considerado: clasificación SUCS, ángulo de fricción interna, peso específico, cohesión (arcillas), módulo de deformación, resistencia al esfuerzo vertical y espesor.**
- 2. Los estratos se consideran horizontales, isotrópicos y homogéneos en todo su espesor.**
- 3. Se asume que para arcillas el coeficiente de balasto permanece constante en todo el estrato, mientras que en los demás suelos aumenta de manera proporcional con la profundidad.**
- 4. Se supone que no se provocarán afectaciones en obras subterráneas existentes como túneles, fundaciones, taludes cercanos, piscinas, etc.**

**Figura 17.** Hoja de Inicio (parte 1): introducción sobre las capacidades y limitaciones de la herramienta.

5. La fundación es completamente vertical.
6. En caso de que se recomiende una cimentación semiprofunda, solo se consideran 2 estratos como máximo (el lateral y el de empotramiento). Para pilotes se puede llegar hasta 10.
7. En caso de rellenos, el cimiento debe atravesar todo su espesor y se apoya en un estrato más fuerte.
8. Se trabaja con esfuerzos totales, es decir, los parámetros del suelo deben ingresar en condición no drenada.



Figura 18. Hoja de Inicio (parte 2): introducción sobre las capacidades y limitaciones de la herramienta.

## DATOS GENERALES PARA ELECCIÓN DE UN TIPO DE CIMIENTO

**Ingrese los siguientes datos:**

$H_L =$	3	m	(longitud del cimiento)
$H_e =$	0,25	m	(longitud de empotramiento)
$\gamma_c =$	2400	kg/m <sup>3</sup>	(densidad del concreto a usar)
$f'_c =$	210	kg/cm <sup>2</sup>	(resistencia a los 28 días del concreto a usar)
$\gamma_L =$	1700	kg/m <sup>3</sup>	(densidad del suelo lateral)
$C_L =$	5000	kg/m <sup>2</sup>	(cohesión del suelo lateral)
$\phi_L =$	15	°	(ángulo de fricción del suelo lateral)
$E_0 =$	20	kg/cm <sup>2</sup>	(módulo de deformación del suelo lateral)

**NOTA:** se entiende por suelo lateral el que se encuentra rodeando al cimiento. En caso de estar representado por varios estratos, se puede considerar un estrato equivalente y calcular sus parámetros por el método que se considere más conveniente, ejemplo: raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del parámetro de cada estrato; esta consideración permitirá optimizar el tipo de fundación, pero se debe acudir a otro tipo de metodología para analizar el efecto de cada estrato.

Figura 19. Hoja de Datos (parte 1): ingreso de datos generales del cimiento y su contorno.

Como se puede observar, las celdas que están hechas para el ingreso de datos tienen un formato diferente para evitar que se modifique contenido necesario.

Se incluyen comentarios para aclarar la forma en que se requieren los datos o en que caso es necesario llenar el espacio.

Los comentarios indican que: si hay dos estratos, H será el espesor del primero; el ángulo de fricción interna se puede suponer como igual a cero para arcillas; y que las cargas axiales se deben colocar como negativas si están en tensión.

**Ingrese las cargas externas que se solicitan:**

$M_{CP} =$	3556,00	kg-m	(momento carga permanente)
$M_{CT} =$	2432,00	kg-m	(momento carga temporal)
$M_{CS} =$	5907,00	kg-m	(momento carga sísmica)
$Q_{CP} =$	3456,00	kg	(Fuerza cortante por carga permatente)
$Q_{CT} =$	245,00	kg	(Fuerza cortante por carga temporal)
$Q_{CS} =$	1897,00	kg	(Fuerza cortante por carga sísmica)
$P_{CP} =$	2207,00	kg	(Carga axial por carga permanente)
$P_{CT} =$	1575,00	kg	(Carga axial por carga temporal)
$P_{CS} =$	2378,00	kg	(Carga axial por carga sísmica)
$f_1 =$	0,50	adim	(factor de participación de la carga temporal)
$q_{ult} =$	3200,00	kg/cm <sup>2</sup>	(presión última que resiste el estrato en que queda la base)

**Tipo de combinación de carga que se quiere aplicar:**

**NOTA:** las 6 primeras combinaciones son las que toma en cuenta el CSCR para la filosofía de resistencia última y la séptima es para la filosofía de esfuerzos de trabajo.

**Cargas externas combinadas:**

$M_u =$  8158,4 kg-m (momento último en la cabeza)  
 $P_u =$  4539,2 kg (carga axial última en la cabeza)  
 $Q_u =$  5168,4 kg (cortante último en la cabeza)

**Tipo de suelo del estrato lateral:**

**Tipo de suelo del estrato de empotramiento:**

**NOTAS:**

1. Los tipos de suelo presentados corresponden a los símbolos de la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
2. Si no existe estrato de empotramiento, ambos serán iguales.

**Figura 20.** Hoja de Datos (parte 2): cálculo de cargas últimas y tipo de suelos.

Se incluyen todas las combinaciones de Código Sísmico, hasta las que llevan la carga sísmica negativa y una séptima que considera la condición de servicio por si se quiere analizar por la filosofía de esfuerzos de trabajo. Con base a la elección de combinación se calculan las cargas últimas que afectarán la cabeza del cimiento.

Para el tipo de suelo de cada estrato se presentan las listas desplegadas que incluyen todos los símbolos de la clasificación según SUCS.

Tipo de sección de cimentación a analizar:

Rectangular o cuadrada

De acuerdo a la selección anterior, ingrese los datos necesarios:

$L =$	2,50	m	(largo de la base del cimiento propuesto)
$B =$	2,00	m	(ancho de la base del cimiento propuesto)
$D =$	2,00	m	(diámetro de la base del cimiento propuesto)
$d =$	1,00	m	(diámetro de la cabeza del cimiento propuesto)

Coefficientes de balasto del estrato lateral:

$$K_V = 12 \text{ kg/cm}^3$$

$$K_H = 8 \text{ kg/cm}^3$$

Relación de rigidez entre coeficientes de balasto ( $\eta$ ):

$$\eta = 0,61 \text{ adim.}$$

TIPO DE CIMENTACIÓN SUGERIDO:

**Bloque Rígido para cimiento rectangular en terreno arcilloso**

Figura 21. Hoja de Datos (parte 3): cálculo de coeficientes de balasto, relación de rigidez y elección de mejor cimiento.

Se puede elegir entre los siguientes tres tipos de sección transversal: rectangular (incluye la cuadrada), circular o circular acampanada.

Los comentarios en las celdas de dimensiones especifican que no se deben dejar

los valores en cero para evitar que se indefinan algunos valores requeridos en la selección del mejor cimiento.

A continuación se presenta una tabla en la que están los hipervínculos para ir a cada caso de análisis, se resalta el recomendado de manera que no cuesta encontrarlo, tenga cuidado al elegir un caso, ya que si elige uno equivocado, será enviado a una hoja no deseada.

<b>CASOS ANALIZADOS POR LA HERRAMIENTA</b>
<b>Bloque Rígido para cimiento rectangular en terreno granular</b>
<b>Bloque Rígido para cimiento rectangular en terreno arcilloso</b>
<b>Bloque Rígido para cimiento circular en terreno granular</b>
<b>Bloque Rígido para cimiento circular en terreno arcilloso</b>
<b>Bloque Rígido para cimiento circular a campanado en terreno granular</b>
<b>Bloque Rígido para cimiento circular a campanado en terreno arcilloso</b>
<b>Pilote corto circular a compresión en terreno granular</b>
<b>Pilote corto circular a compresión en terreno arcilloso</b>
<b>Pilote corto rectangular a compresión en terreno granular</b>
<b>Pilote corto rectangular a compresión en terreno arcilloso</b>
<b>Pilote corto circular a compresión con terreno lateral granular y empotrado en terreno granular</b>
<b>Pilote corto circular a compresión con terreno lateral arcilloso y empotrado en terreno granular</b>
<b>Pilote corto rectangular a compresión con terreno lateral granular y empotrado en terreno granular</b>
<b>Pilote corto rectangular a compresión con terreno lateral arcilloso y empotrado en terreno granular</b>
<b>Pilote corto circular a compresión con terreno lateral granular y empotrado en terreno arcilloso</b>
<b>Pilote corto circular a compresión con terreno lateral arcilloso y empotrado en terreno arcilloso</b>
<b>Pilote corto rectangular a compresión con terreno lateral granular y empotrado en terreno arcilloso</b>
<b>Pilote corto rectangular a compresión con terreno lateral arcilloso y empotrado en terreno arcilloso</b>
<b>Pilote corto cilíndrico acampanado a tracción en terreno granular</b>
<b>Pilote corto cilíndrico acampanado a tracción en terreno arcilloso</b>
<b>Pilote corto en terreno granular hormigonado contra el terreno</b>
<b>Pilote corto en terreno arcilloso hormigonado contra el terreno</b>
<b>Pilotes</b>

**Ver reporte**

**Figura 22.** Hoja de Datos (parte 4): hipervínculos que llevan a las hojas de análisis de cada caso.

Cada uno de estos hipervínculos representa un caso analizado y únicamente cambia de formato el que cumple con la relación de esbeltez y condiciones de suelo seleccionadas.

El botón “Ver reporte” se usará después, sin embargo se puede verificar que no exista un reporte anterior.

Cabe mencionar que los botones negros son hipervínculos que llevan a otras hojas y los grises son botones programados.

## POZO RECTANGULAR CON TERRENO LATERAL GRANULAR

Ingrese los siguientes datos:

$\sigma =$	2500	kg/m <sup>2</sup>	(adherencia entre concreto y terreno)
$\delta =$	30	°	(ángulo de rozamiento entre concreto y terreno)

Relación H/L:

$$\begin{aligned} (H/L)_{lim} &= 2,46 \text{ adim.} \\ H/L &= 1,30 \text{ adim.} < (H/L)_{lim} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

Presión máxima y mínima:

$$\begin{aligned} q_{umax} &= 1370,45 \text{ kg/m}^2 \\ q_{umin} &= 445,23 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

Relación de presiones:

$$q_{umin} / q_{umax} = 0,32 \text{ adim}$$

Coefficiente de reducción a usar:

$$\phi = 0,67 \text{ adim}$$

Revisión de capacidad soportante del suelo:

Cumple

Fuerza cortante en el apoyo:

$$\begin{aligned} N &= 47739 \text{ kg} \\ R_{m\acute{a}x} &= 42562 \text{ kg} \\ R &= 2911 \text{ kg} \\ R &< R_{m\acute{a}x} * \phi \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

Figura 23. Hoja BRRG (parte 1): pozo rígido rectangular con terreno lateral granular.

Se verifica que la presión ejercida al suelo y la fuerza cortante en la base se mantengan alejadas de los máximos valores permitidos.

#### Excentricidad de la resultante en la base:

$$\begin{aligned} e_{max} &= 0,417 \text{ m} \\ e &= 0,212 \text{ m} \\ e &< e_{max} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

#### Si la excentricidad no cumple, tiene 2 opciones:

- Opción 1* → Considerar la resultante fuera del núcleo central
- Opción 2* → Modificar dimensiones de sección para que cumpla

#### Desplazamiento horizontal en la superficie:

$$\begin{aligned} x_{max} &= 0,025 \text{ m} \\ \tan \alpha &= 0,000 \text{ adim.} \\ x_m &= 0,001 \text{ m} \\ x_m &< x_{max} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

#### Presión horizontal máxima en el estrato I:

$$\begin{aligned} p_p &= 25985 \text{ kg/m}^2 \\ p_1 &= 3279 \text{ kg/m}^2 \\ p_1 &< p_p / FS \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

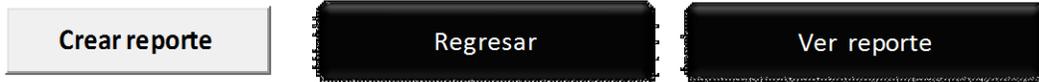


Figura 24. Hoja BRRG (parte 2): pozo rígido rectangular con terreno lateral granular.

Se revisan los valores de la excentricidad de la resultante vertical, el desplazamiento horizontal máximo y la presión lateral máxima, estén alejados del límite permitido.

Para este caso se permite analizar la condición de que la excentricidad de la resultante no quede dentro del núcleo central, por eso aparece un botón que lleva a dicho análisis.

El botón “Crear reporte” hace un resumen de los resultados obtenidos en una hoja aparte,

de manera que pueda ser entregada al dueño del proyecto.

En este caso, el análisis fue por resistencia última, por eso se aplica el coeficiente de reducción a la capacidad última y no un factor de seguridad. Excepto para el desplazamiento horizontal, esto porque se analiza su cumplimiento en servicio (con el método de esfuerzos de trabajo).

No se explicarán las demás hojas de bloque rígido porque son muy semejantes, lo que varían

son las fórmulas para determinar los parámetros, como se explica en la metodología.

### CONSIDERACIÓN DE LA RESULTANTE FUERA DEL NÚCLEO CENTRAL

**Cálculo de los parámetros de la ecuación de tercer grado:**

$$\begin{aligned} a &= 41791 \\ b &= -105982 \\ c &= 86591 \\ d &= -19442 \end{aligned}$$

**Dividiendo todos los parámetros entre "a":**

$a'$	$b'$	$c'$	$d'$
1	-2,54	2,07	-0,47

**Sustituyendo "e = y - b'/3" y reacomodando, se tiene que:**

$$y^3 + (c' - b'^2/3)y + (27d' - 9b'c' + 2b'^3) / 27$$

**Con los cambios de variable:**

$$p = c' - (b'^2/3) \quad \text{y} \quad q = (27d' - 9b'c' + 2b'^3) / 27$$

**Tenemos que:**

$$y^3 + py + q = 0$$

**Calculamos:**

$$\begin{aligned} p &= -0,07 \\ q &= 0,08 \\ A &= -0,06 \\ B &= -0,43 \\ D &= 0,00 \end{aligned}$$

**Figura 25.** Hoja CRFNC (parte 1): consideración de la resultante vertical fuera del núcleo central.

**Soluciones:**

$$\begin{aligned} y_1 &= -0,740 \\ y_2 &= 0,370 + 0,542 i \\ y_3 &= 0,370 - 0,542 i \end{aligned}$$

**Soluciones de la ecuación inicial:** (Seleccione la que sea real y le parezca razonable)

<input checked="" type="checkbox"/>	$e_1 = 0,313$	<i>Solución real</i>		
<input type="checkbox"/>	$e_2 = 1,423 + 0,542 i$			<b>Solución irracional</b>
<input type="checkbox"/>	$e_3 = 1,423 - 0,542 i$			<b>Solución irracional</b>

**Cálculos:**

$$\therefore e = 0,313 \text{ m}$$

**Fuerza cortante en el apoyo:**

$$\begin{aligned} R_{\text{máx}} &= 42562 \text{ kg} \\ R &= 5830 \text{ kg} \\ R &< R_{\text{máx}} * \emptyset \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Desplazamiento horizontal en la superficie:**

$$\begin{aligned} x_{\text{máx}} &= 0,025 \text{ m} \\ \tan \alpha &= 0,489 \text{ adim.} \\ x_m &= 0,000 \text{ m} \\ x_m &< x_{\text{máx}} / \text{FS} \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Presión horizontal máxima en el estrato I:**

$$\begin{aligned} p_{\text{adm}} &= 25985 \text{ kg/m}^2 \\ p_1 &= 2750 \text{ kg/m}^2 \\ p_1 &< p_p * \emptyset \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

Regresar

Figura 26. Hoja CRFNC (parte 2): consideración de la resultante vertical fuera del núcleo central.

Se aplica la solución que aparece en apéndices para resolver la ecuación de tercer grado resultante de intento por solucionar las ecuaciones un poco complejas que rigen este fenómeno.

El comentario solo indica que se tomó el valor antes calculado porque no varía respecto al de la hoja BRRG.

Los demás casos analizados para pozo rígido, que no se presentan por ser iguales en aspecto al

primero son: rectangular con terreno lateral arcilloso, circular con terreno lateral granular y circular con terreno lateral arcilloso.

Se debe recordar que aunque tengan el mismo aspecto a simple vista, cada una de las hojas que analizan los casos antes mencionados, tiene diferentes ecuaciones para calcular cada parámetro en función del tipo de terreno y tipo de sección transversal.

### POZO CIRCULAR ACAMPANADO CON TERRENO LATERAL GRANULAR

**Ingrese los siguientes datos:**

$\alpha =$	2500	$\text{kg/m}^2$	(adherencia entre concreto y terreno)
$\delta =$	30	$^\circ$	(ángulo de rozamiento entre concreto y terreno)
$r =$	0,25	m	(distancia desde la base al sitio de cambio de sección)

**Revisión de la relación H/D:**

$$(H/D)_{lim} = 2,59 \text{ adim.}$$

$$H/D = 1,63 \text{ adim.} < (H/L)_{lim} \quad \therefore \text{Cumple}$$

**Presión máxima y mínima:**

$$q_{umax} = 1794,61 \text{ kg/m}^2$$

$$q_{umin} = 21,067 \text{ kg/m}^2$$

**Relación de presiones:**

$$q_{umin} / q_{umax} = 0,01 \text{ adim}$$

**Coefficiente de reducción a usar:**

$$\emptyset = 0,67 \text{ adim}$$

**Figura 27.** Hoja BRCAG (parte 1): pozo rígido circular acampanado con terreno lateral granular.

**Revisión de capacidad soportante del suelo:**

**Cumple**

**Revisión de la fuerza cortante en el apoyo:**

$$N = 22623 \text{ kg}$$

$$R_{max} = 25561 \text{ kg}$$

$$R = 4937 \text{ kg}$$

$$R < R_{max} * \phi \quad \therefore \text{Cumple}$$

**Revisión de la excentricidad de la resultante en la base:**

$$e_{max} = 0,250 \text{ m}$$

$$e = 0,326 \text{ m}$$

$$e > e_{max} \quad \therefore \text{No cumple}$$

**Revisión del desplazamiento horizontal en la superficie:**

$$x_{max} = 0,025 \text{ m}$$

$$\tan \alpha = 0,001 \text{ adim.}$$

$$x_m = 0,003 \text{ m}$$

$$x_m < x_{max} \quad \therefore \text{Cumple}$$

**Revisión de la presión horizontal máxima en el estrato I:**

$$p_{adm} = 25985 \text{ kg/m}^2$$

$$p_1 = 7340 \text{ kg/m}^2$$

$$p_1 < p_p / FS \quad \therefore \text{Cumple}$$

Crear reporte

Regresar

Ver reporte

**Figura 28.** Hoja BRCAG (parte 2): pozo rígido circular acampanado con terreno lateral granular.

Para bloque rígido circular acampanado se debe agregar la altura, medida desde la base, a la que se da el cambio de sección, esto para calcular el peso del pozo y el de las tierras que

pondrán su peso en la parte ensanchada del pozo.

De la misma manera, no se presenta el pozo rígido circular acampanado con terreno lateral arcilloso por ser muy parecido a este.

En pilotes cortos, se revisa el desplazamiento horizontal, la carga de hundimiento y las presiones laterales.

Cuando el pilote corto está sometido a compresión se requieren los datos característicos del estrato de empotramiento.

**PILOTE CORTO CIRCULAR A COMPRESIÓN**  
con terreno lateral granular y empotrado en terreno granular

**Relación  $H/\mathcal{L}$ :**

$$\begin{aligned} (H/\mathcal{L})_{max} &= 2,000 \text{ adim.} \\ I_p &= 0,250 \text{ m}^4 \\ \mathcal{L} &= 4,048 \text{ m} \\ H/\mathcal{L} &= 0,803 \text{ adim.} < (H/\mathcal{L})_{max} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Desplazamiento horizontal en la superficie:**

$$\begin{aligned} x_{max} &= 0,025 \text{ m} \\ x_m &= 0,004 \text{ m} < x_{max} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Ingrese los siguientes datos:**

$\gamma_e =$	3000	kg/m <sup>3</sup>	(densidad del estrato de empotramiento)
$\phi_e =$	20	°	(ángulo de fricción interna del estrato de empotramiento)

**Carga de hundimiento:**

$$\begin{aligned} N_{\phi}^* &= 2,04 \text{ adim.} \\ N_c^* &= 8,68 \text{ adim.} \\ N_q^* &= 4,16 \text{ adim.} \\ q_h &= 13844 \text{ kg/m}^2 \\ q &= 8708 \text{ kg/m}^2 < q_{adm.} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Presiones laterales:**

$$\begin{aligned} p_{adm.} &= 8662 \text{ kg/m}^2 \\ p_1 &= 4704 \text{ kg/m}^2 < p_{adm.} \quad \therefore \text{Cumple} \\ p_2 &= 10607 \text{ kg/m}^2 > p_{adm.} \quad \therefore \text{No cumple} \end{aligned}$$

Crear reporte
Regresar
Ver reporte

Figura 29. Hoja PCCCTGATG: Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral granular apoyado en terreno granular.

**PILOTE CORTO CIRCULAR A COMPRESIÓN**  
con terreno lateral granular y empotrado en terreno arcilloso

**Relación  $H/\mathcal{L}$  :**

$$\begin{aligned} (H/\mathcal{L})_{max} &= 2,000 \text{ adim.} \\ I_p &= 0,250 \text{ m}^4 \\ \mathcal{L} &= 4,048 \text{ m} \\ H/\mathcal{L} &= 0,803 \text{ adim.} < (H/\mathcal{L})_{max} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Desplazamiento horizontal en la superficie:**

$$\begin{aligned} x_{max} &= 0,025 \text{ m} \\ x_m &= 0,004 \text{ m} < x_{max} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Ingrese los siguientes datos:**

$\gamma_e =$	1800	kg/m <sup>3</sup>	(densidad del estrato de empotramiento)
$q_u =$	0,5	kg/cm <sup>2</sup>	(resistencia a la compresión simple del estrato empotramiento)

**Carga de hundimiento:**

$$\begin{aligned} S_u &= 0,25 \text{ kg/cm}^2 = 2500 \text{ kg/m}^2 \\ N_c &= 6,45 \text{ adim.} \\ q_{n adm.} &= 5375 \text{ kg/cm}^2 \\ q_n &= 3158 \text{ kg/m}^2 < q_{n adm.} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Presiones laterales:**

$$\begin{aligned} p_{adm.} &= 8662 \text{ kg/m}^2 \\ p_1 &= 4704 \text{ kg/m}^2 < p_{adm.} \quad \therefore \text{Cumple} \\ p_2 &= 10607 \text{ kg/m}^2 > p_{adm.} \quad \therefore \text{No cumple} \end{aligned}$$

Crear reporte

Regresar

Ver reporte

**Figura 30.** Hoja PCCCTGATA: Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral granular apoyado en terreno arcilloso.

Otros casos revisados para pilotes cortos a compresión fueron: circular en terreno granular, circular en terreno arcilloso, rectangular en terreno granular, rectangular en terreno

arcilloso, circular con terreno lateral arcilloso apoyado en terreno arcilloso, circular con terreno lateral arcilloso apoyado en terreno granular, rectangular con terreno lateral arcilloso apoyado en terreno arcilloso, rectangular con terreno lateral arcilloso apoyado en terreno granular, rectangular con terreno lateral granular apoyado

en terreno granular y rectangular con terreno lateral granular apoyado en terreno arcilloso.

Para pilote corto a tensión no se calcula la carga de hundimiento, sino la capacidad ante la extracción y se requiere conocer la altura a la que se da el cambio de sección, en caso de hacerlo acampanado para aumentar su eficiencia.

**PILOTE CORTO CILÍNDRICO ACAMPANADO  
A TRACCIÓN EN TERRENO COHESIVO**

**Ingrese la siguiente información:**

$r =$	0,25	m	(distancia desde la base al sitio de cambio de sección)
$q_u =$	10	kg/cm <sup>2</sup>	(resistencia a la compresión simple del suelo)

**Relación  $H/\mathcal{L}$ :**

$$(H/\mathcal{L})_{max} = 1,500 \text{ adim.}$$

$$I_p = 0,250 \text{ m}^4$$

$$\mathcal{L} = 6,170 \text{ m}$$

$$H/\mathcal{L} = 0,486 \text{ adim.} < (H/\mathcal{L})_{max} \therefore \text{Cumple}$$

**Datos del cono invertido:**

$$\beta = 10^\circ$$

$$D_B = 2,000 \text{ m}$$

$$D_S = 3,058 \text{ m}$$

$$V = 15,289 \text{ m}^3$$

$$W_S = 25991,96 \text{ kg}$$

**Tensión:**

$$W = 2061,67 \text{ kg}$$

$$T_{adm} = 9414,04 \text{ kg}$$

$$T = -4539,20 \text{ kg} < T_{adm} \therefore \text{Cumple}$$

**Desplazamiento horizontal en la superficie:**

$$x_{max} = 0,025 \text{ m}$$

$$x_m = 0,001 \text{ m} < x_{max} \therefore \text{Cumple}$$

**Presiones laterales:**

$$p_{adm.} = 8662 \text{ kg/m}^2$$

$$p_1 = 6165 \text{ kg/m}^2 < p_{adm.} \therefore \text{Cumple}$$

$$p_2 = 4442 \text{ kg/m}^2 < p_{adm.} \therefore \text{Cumple}$$

Crear reporte	Regresar	Ver reporte
---------------	----------	-------------

Figura 31. Hoja PCCATTA: Pilote Corto circular acampanado a tracción en terreno arcilloso.

**PILOTE CORTO CILÍNDRICO O RECTANGULAR A TRACCIÓN  
EN TERRENO COHESIVO HORMIGONADO CONTRA EL TERRENO**

**Relación  $H/L$  :**

$$\begin{aligned} (H/L)_{max} &= 1,500 \text{ adim.} \\ I_p &= 0,250 \text{ m}^4 \\ L &= 6,170 \text{ m} \\ H/L &= 0,486 \text{ adim.} < (H/L)_{max} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Ingrese lo siguiente:**

$q_u = 10 \text{ kg/cm}^2$  (resistencia a la compresión simple suelo)

**Tensión:**

$$\begin{aligned} W &= 36000,00 \text{ kg} \\ A_{fuste} &= 27,00 \text{ m}^2 \\ T_{adm} &= 12090,00 \text{ kg} \\ T &= -4539,20 \text{ kg} < T_{adm} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Desplazamiento horizontal en la superficie:**

$$\begin{aligned} x_{max} &= 0,025 \text{ m} \\ x_m &= 0,001 \text{ m} < x_{max} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

**Presiones laterales:**

$$\begin{aligned} p_{adm.} &= 8662 \text{ kg/m}^2 \\ p_1 &= 6165 \text{ kg/m}^2 < p_{adm.} \quad \therefore \text{Cumple} \\ p_2 &= 4442 \text{ kg/m}^2 < p_{adm.} \quad \therefore \text{Cumple} \end{aligned}$$

Armado de pozos sometidos a M y T

Regresar

Ver reporte

Crear reporte

Figura 32. Hoja PCTAHCT: pilote corto a tracción en terreno arcilloso.

En lo único que cambian los dos casos adicionales de pilotes cortos a tensión en terreno granular, ya sea acampanado o no, es que no se requiere ingresar la resistencia a la compresión

simple, ya que no hay adherencia, ni tampoco el ángulo de fricción interna, porque se toma el de la hoja de inicio ya ingresado.

## ARMADO DE POZO CIRCULAR SOMETIDO A FLEXIÓN Y TENSION A LA VEZ

Ingrese los siguientes datos:

$f_s =$	2400	kg/cm <sup>2</sup>	(Tensión de trabajo del acero a utilizar)
$Rec. =$	5	cm	(Recubrimiento de las barras de acero)

Cálculo de la dimensión D':

$$D' = 1,900 \text{ m}$$

Cálculo de la expresión K:

$$K = 0,368 \text{ adim.}$$

Área de acero requerida:

$$A_s = 9,048 \text{ cm}^2$$

Recomendaciones:

Para cumplir con el área anterior la opción que más se ajusta es:

**4 varillas # 8**

Que tienen un área de acero de:

$$A_s = 9,067 \text{ cm}^2$$

Sin embargo, se debe considerar que por facilidad de armado se recomienda utilizar como mínimo 8 varillas; por lo que la mejor opción desde este punto de vista es:

**8 varillas # 4**

Que tienen un área de acero de:

$$A_s = 9,267 \text{ cm}^2$$

Regresar

Figura 33. Hoja APTM: acero longitudinal de un pozo sometido a tracción y momento a la vez.

## CIMENTACIONES PROFUNDAS (PILOTES)

### Seleccione los parámetros para la elección de un tipo de pilote:

#### **1) Influencia de la topografía:**

- a) Geometría de la superficie:
- b) Drenaje:
- c) Obstrucciones:
- d) Estructuras próximas:
- e) Estructuras marítimas:

#### **2) Influencia del tipo de suelo:**

- a) Rocas:
- b) Suelos granulares:

Zahorra es un material formado por áridos no triturados, suelos granulares, o una mezcla de ambos, cuya granulometría es de tipo continuo. Los materiales usados para su elaboración son áridos no triturados procedentes de graveras o depósitos naturales, o bien suelos granulares, o una mezcla de ambos.

- c) Suelos cohesivos:
- d) Varios:

#### **3) Influencia de la estructura:**

- a) Por cargas:
- b) Número de soportes:
- c) Sensibilidad al asentamiento:

Figura 34. Hoja PILOTES: selección de parámetros para la elección de un tipo de pilote.

#### 4) Pilotes que son preferibles en las anteriores condiciones:

**N: Tipo de pilote:**

- 1 Hincado de madera
- 2 Hincado de concreto armado normal
- 3 Hincado de concreto pretensado
- 4 Cajón de acero hincado
- 5 Tubo de acero hincado
- 6 Vaga H de acero hincada
- 7 Rosca de acero hincada
- 8 Hincada de concreto prefabricado en sitio
- 9 Hincado de concreto en sitio + acero
- 10 Hincado de concreto
- 11 Sondeado a percusión de pequeño diámetro
- 12 Sondeado de gran diámetro
- 13 Sondeado a rotación de gran diámetro y fuste cilíndrico
- 14 Sondeado a rotación de gran diámetro y base ensanchada
- 15 Sondeado a rotación de pequeño diámetro

**NOTA:** En la tabla de pilotes anterior se resalta el número de los pilotes que mejor se adaptan a los requerimientos de arriba.

#### 5) Escriba el número del pilote que eligió para ver sus características:

N = 11

<i>Sección:</i>	Entre 45 y 60 cm de diámetro
<i>Longitud máxima:</i>	24 m
<i>Cargas normales (t):</i>	120 t

En caso de pilotes hincados:

Hinca dinámica de pilotes

#### PILOTES EN GRUPO:

Si se tienen las cargas para el grupo en general y se quiere saber cuánto le corresponde a cada pilote se debe dar click en el siguiente botón para hacer dicho cálculo, además de ver la eficiencia del grupo.

Grupo de pilotes

Figura 35. Hoja PILOTES: tipo de pilote seleccionado y sus características.

## PILOTE AISLADO:

Ingrese los siguientes valores:

$H_u =$	2500	kg	(carga lateral última aplicada al pilote a nivel de terreno)
$P_u =$	-2500	kg	(carga axial última aplicada al pilote)
$E =$	280000	kg/cm <sup>2</sup>	(módulo de elasticidad del pilote)
$I =$	390000	cm <sup>4</sup>	(momento de inercia de la sección del pilote)
$M_u =$	13000	kg-cm	(momento último a nivel del terreno)
$B =$	25	cm	(ancho de la sección o diámetro)
$K =$	25	kg/cm <sup>3</sup>	(coeficiente de balasto horizontal para suelos arcillosos)
$n_h =$	25	kg/cm <sup>3</sup>	(coeficiente de balasto horizontal para suelos granulares)
$Z =$	0	cm	(profundidad a la que se quiere hacer el análisis por servicio)
$E_0 =$	120000	kg/cm <sup>2</sup>	(módulo elástico del suelo a nivel de terreno)
$E_L =$	130000	kg/cm <sup>2</sup>	(módulo elástico del suelo a nivel de punta)
$l =$	200	cm	(longitud sin enterrar del pilote)
$L =$	300	cm	(longitud enterrada del pilote)

Principal tipo de suelos en que está incrustado el pilote:

SC-SM

Ángulo de inclinación respecto a la vertical (en caso de pilote inclinado):

$\emptyset =$  0 °

Figura 36. Hoja PILOTES: datos generales para pilote aislado.

La figura 34 tiene una serie de barras desplegables que toman en cuenta la influencia de los parámetros considerados en los cuadros 5, 6 y 7. Con base a esos criterios elige el o los tipos de pilote más adecuados, tal como se muestra en la figura 35.

Con base al cuadro 4 y la elección del número de pilote deseado, de los resaltados por

la herramienta, se dan las características típicas del mismo.

En la figura 35 se presentan dos botones: uno para analizar el fenómeno de hinca dinámica de pilotes y el otro para ir a la hoja en que se calcula el efecto de grupo y la distribución de cargas externas que actúan sobre el grupo por pilote.

**Interacción pilote-terreno (acciones laterales externas):**

SITUACIÓN DE SERVICIO:

Ingrese los siguientes valores:

$H =$	1500	kg	(carga lateral de servicio aplicada al pilote a nivel de terreno)
$M =$	13000	kg-cm	(momento de servicio a nivel del terreno)

Desplazamiento del pilote a la profundidad Z:

$$\begin{aligned}\lambda &= 162,593 \text{ cm} \\ T &= 84,734 \text{ cm} \\ A_y &= 1,700 \\ B_y &= 1,700 \\ A_m &= 0,000 \\ B_m &= 1,134 \\ y_z &= 0,016 \text{ cm} \\ M_z &= 0,082 \text{ kg-cm}\end{aligned}$$

Método práctico para cálculo de momento máximo:

$$\begin{aligned}f &= 1,04 \\ L' &= 47,81 \text{ cm} \\ M_{m\acute{a}x} &= 3217,19 \text{ kg-m} \quad (\text{condición normal}) \\ &0 \\ M_{m\acute{a}x} &= 1608,59 \text{ kg-m} \quad (\text{con cabeza empotrada})\end{aligned}$$

Para un pilote en grupo, la longitud de empotramiento equivalente será:

Tipo de grupo:

Espaciamiento entre pilotes:

$S =$	75	cm
-------	----	----

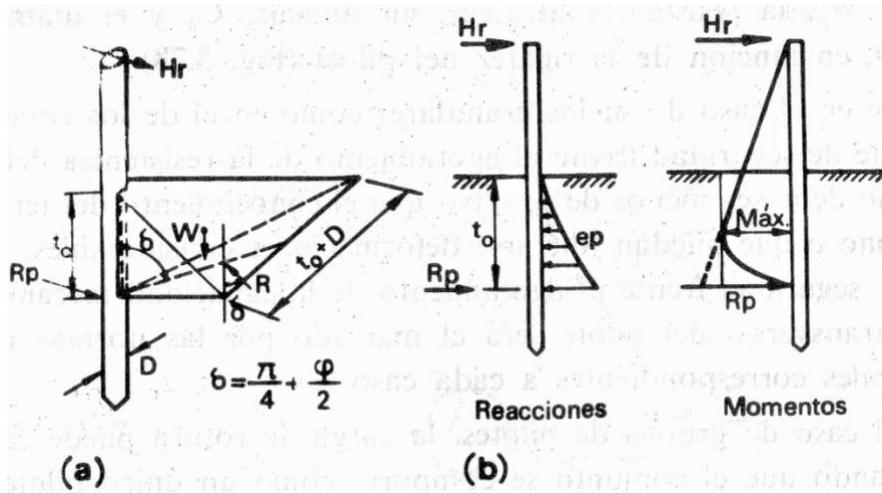
$$L_g = 73,48 \text{ cm}$$

Momento máximo para un pilote en grupo:

$$M_{m\acute{a}x} = 3538,90 \text{ kg-m}$$

**Figura 37.** Hoja PILOTES: situación de servicio para pilote aislado y en grupo con carga lateral.

SITUACIÓN DE ROTURA:



Ingrese el valor de la longitud  $t_0$ :

$t_0 =$    (profundidad que anula el momento producido por la carga lateral)

Condición de la cabeza del pilote:

Ángulo de fricción interna del suelo:

$\phi =$

Densidad efectiva del suelo:

$\gamma' =$

Coefficiente de empuje pasivo de Rankine:

$K_p =$   adim

La carga de rotura será de:

$H_r =$    (la fórmula depende de la condición de la cabeza)

Corroboración del factor de seguridad mínimo:

$FS =$      $\therefore$  **Cumple**

Para un grupo de pilotes considerar B como el ancho frontal del grupo:

$B =$

Carga de rotura para el grupo de pilotes

$H_r =$

**Figura 38.** Hoja PILOTES: situación de rotura para pilote aislado y en grupo con carga lateral.

**Interacción pilote-terreno (acciones internas):**

ROZAMIENTO NEGATIVO:

Número de estratos con fricción negativa:

$N = 2$  adim

Crear tabla

Borrar tabla

Estrato	fn (kg)
1	3400
2	8500

Tipo de suelo al que se debe este fenómeno:

Arcilla limosa

Ingrese los siguientes valores correspondientes al estrato con rozamiento negativo:

$\sigma_0' =$	10,00	kg/cm <sup>2</sup>	(esfuerzo vertical promedio en el estrato con fricción negativa)
$P^* =$	100,00	cm	(perímetro de la sección transversal del pilote)
$l_i =$	34,00	cm	(espesor del estrato con fricción negativa)
$\phi =$	24	°	(ángulo de fricción interna de la arena)
$\# =$	2	adim	(número que le ha asignado al estrato por analizar)

**NOTA:** esta numeración sirve para poder guardar los rozamientos negativos producto de más de un estrato, así que se pide enumerarlos de la siguiente manera: 1, 2, ..., n; e ir guardando cada uno de ellos (en caso de haber más de 1).

Área del fuste con fricción negativa:

$$A_i = 3400,00 \text{ cm}^2$$

Rozamiento negativo del estrato:

$$f_n = 8500,00 \text{ kg}$$

Guardar datos del estrato

Rozamiento negativo total:

$$F_n = 11900,00 \text{ kg}$$

**Figura 39.** Hoja PILOTES: consideración del rozamiento negativo de estratos compresibles.

Para estribos de puentes se tiene:

Estribos de puentes

Pilotes en zonas de inestabilidad:

Pilotes en terreno en falla

Estabilidad estructural:

Condición del pilote:

Vertical parcialmente enterrado

Condición de la cabeza:

Libre

Carga crítica de pandeo:

$$P_{\alpha} = 2168168 \text{ kg} > P \quad \therefore \text{Cumple}$$

Capacidad de carga axial del pilote:

Forma en la que resiste la carga el pilote:

Por fricción

→ Por fricción:

Cantidad de estratos que contribuyen a la fricción:

$N = 8$  adim

Crear tabla

Borrar tabla

Estrato	Qfric (kg)
1	8355,84276
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

Figura 40. Hoja PILOTES: estabilidad estructural, pilotes en terreno en falla, estribos de puente y tabla para fricción.

Número de estrato:

Para el estrato a analizar llene lo siguiente:

$\sigma_{0i}' =$	1,00	kg/cm <sup>2</sup>	(esfuerzo efectivo vertical en el punto medio del estrato)
$P^* =$	100,00	cm	(perímetro de la sección transversal del pilote)
$\Delta l_i =$	134,00	cm	(longitud del pilote en este estrato)

Tipo de material del estrato:

Llenar sólo si el estrato es roca:

$\tau_a =$	3,50	kg/cm <sup>2</sup>	(resistencia por fricción entre pilote y roca)
D =	25	cm	(diámetro o ancho del pilote)

Llenar lo siguiente sólo si el estrato es granular:

$\phi =$	20	°	(ángulo de fricción interna del estrato)
----------	----	---	--

Tipo de pilote:

Material del pilote:

$$K_0 = 2,04 \text{ adim}$$

$$K = 2,04 \text{ adim}$$

$$\delta = 18^\circ$$

$$Q_{\text{fricción}} = 8880,29 \text{ kg}$$

Guardar resultados del estrato

Para todos los estratos se tiene que:

$$Q_{\text{fricción}} = 8880,29 \text{ kg}$$

**Figura 41.** Hoja PILOTES: ingreso de datos por estrato que contribuye a la resistencia por fricción.

Esto se debe llenar para cada uno de los estratos que contribuyan con la fricción y, al guardar los resultados en la tabla de la figura 40,

se puede usar esta parte de la hoja para todos, economizando espacio.

De igual manera pasa con el rozamiento negativo de la figura 39.

→ Carga por punta:

Tipo de estrato en que queda la punta:

GW

Del estrato en el que queda la punta se requiere también:

$\sigma' =$	1,00	kg/cm <sup>2</sup>	(esfuerzo efectivo vertical en la base)
$A_b =$	625,00	cm <sup>2</sup>	(área de sección transversal del pilote en la base)
$q_b =$	23,00	kg/cm <sup>2</sup>	(capacidad de soporte del suelo a nivel de punta)
$\phi =$	30	°	(ángulo de fricción interna del suelo en la base)
$C_u =$	10	kg/cm <sup>2</sup>	(resistencia al corte sin drenar de la arcilla)
$B =$	25	cm	(ancho o diámetro del pilote)
$Q_{punta} =$	2235,98 kg		

Se debe garantizar que el pilote esté empotrado dentro de la capa de apoyo una longitud de al menos:

$$D = 173,21 \text{ cm}$$

Carga axial última del pilote:

$$Q_{ult} = 8355,84 \text{ kg} \quad (\text{incluye el efecto de rozamiento negativo})$$

Capacidad última ante extracción del pilote:

Ingrese:

$$W = 2500 \text{ kg} \quad (\text{peso del pilote})$$

$$Q_{tu} = 10855,84 \text{ kg}$$

Análisis por:

Resistencia última

Ver cuáles factores de reducción ( $\phi$ ) usar:

Factores

Valores elegidos:

$\phi_c =$	0,80	adim	(compresión)
$\phi_t =$	0,80	adim	(tensión)

Cargas admisibles del pilote:

$$Q_{adm} = 6684,67 \text{ kg}$$

$$Q_{t,adm} = 8684,67 \text{ kg}$$

>

P

∴

Cumple

Crear reporte

Regresar

Ver reporte

Figura 42. Hoja PILOTES: comprobación de la capacidad admisible y crear reporte.

## HINCA DINÁMICA DE PILOTES

¿Se usará sufridera de madera sobre la cabeza del pilote?

Sí

No

**Ingrese los siguientes valores:**

$h_e =$	10	cm	(altura de caída del mazo)
$P_m =$	1	ton	(peso del mazo)
$P_p =$	1	ton	(peso del pilote)
$L =$	800	cm	(longitud del pilote)
$\delta_r =$	1	cm	(rechazo medido en hinca)
$E_{sf} =$	2400	kg/cm <sup>2</sup>	(coeficiente de elasticidad de la sufridera)
$h_{sf} =$	10	cm	(espesor de la sufridera)
$E_g =$	2500	kg/cm <sup>2</sup>	(coeficiente de elasticidad de la galleta)
$h_g =$	10	cm	(espesor de la galleta)
$A =$	625	cm <sup>2</sup>	(Área transversal del pilote)
$E =$	2800000	kg/cm <sup>2</sup>	(módulo de elasticidad del pilote)
$\gamma =$	2400	kg/cm <sup>3</sup>	(peso específico del material del pilote)

**Presión máxima producida por el mazo sobre la cabeza del pilote:**

$$K_{v0} = 120$$

$$\sigma^* = 379,47 \text{ kg/cm}^2$$

**Máxima tracción en la cabeza del pilote:**

$$C_s = 76530,61 \text{ cm}$$

$$c = 1069,81 \text{ cm/s}$$

$$p^2 = 0,06 \text{ 1/s}^2$$

$$n = 0,02 \text{ 1/s}$$

$$L_{onda} = 34,29 \text{ cm}$$

$$\sigma_t^* = 38545150,83 \text{ kg/cm}^2$$

**Carga de hundimiento según Janbu:**

$$\lambda_e = 4,57E-06 \text{ adim.}$$

$$C_d = 0,9 \text{ adim.}$$

$$K_u = 1,80 \text{ adim.}$$

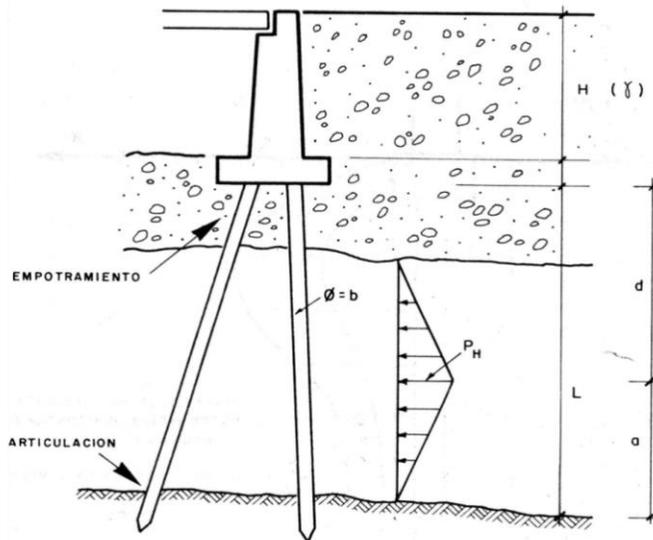
$$Q_{hun.} = 3,06 \text{ ton}$$

Volver a la hoja principal de pilotes

Figura 43. Hoja HDP: consideración del efecto producido por el martinete al hincar un pilote.

## ESFUERZOS MÁXIMOS INDUCIDOS POR EMPUJES LATERALES EN ESTRIBOS DE PUENTES

**Diagrama de la hipótesis de Tschebotarioff:**



**Ingrese los siguientes valores:**

$C_u =$	100	kg/m <sup>2</sup>	(resistencia al corte sin drenar del estrato 2)
$L =$	10	m	(longitud del pilote que no entra en roca)
$H =$	3	m	(altura del muro sin incluir el pie)
$a =$	4	m	(mitad del segundo estrato)
$\Delta\sigma_z' =$	130	kg/m <sup>2</sup>	(incremento de tensión vertical efectiva en la mitad del estrato 2)
$S =$	4	m	(espaciamiento entre pilotes)
$b =$	0,25	m	(anchura del pilote)
$n =$	2	adim	(número de filas en la dirección del movimiento)
$P_v =$	300	kg/m <sup>2</sup>	(presión vertical en estrato blando)
$B =$	3	m	(anchura del grupo de pilotes en la dirección del movimiento)

**Valor unitario máximo de presión:**

$$P_H = 13,00 \text{ kg/m}$$

**Momentos máximos:**

$$M_{emp.} = -78,62 \text{ kg-m}$$

$$M_{centro\ estrato} = 80,87 \text{ kg-m}$$

**Empuje por unidad de longitud que actúan sobre los pilotes:**

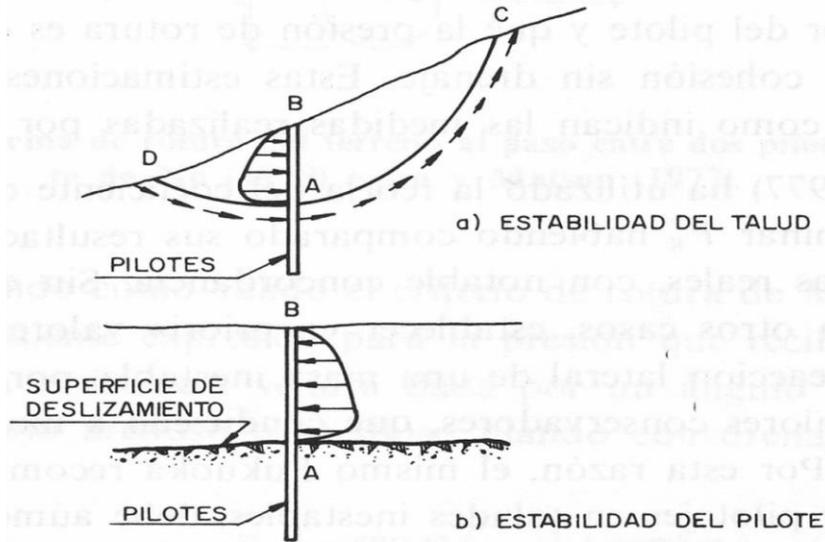
$$P_p = 75,00 \text{ kg/m}$$

Volver a la hoja principal de pilotes

**Figura 44.** Hoja EP: análisis de estribos de puentes que tienen un relleno de aproximación sobre un estrato arcilloso.

**PILOTES EN TERRENO CON DESLIZAMIENTO PROGRESIVO**

**Diagrama del fenómeno:**



**Ingrese los siguientes valores:**

$A_p =$	100	m <sup>2</sup>	(área transversal del pilote)
$b =$	0,25	m	(ancho o diámetro de pilote)
$F_v =$	10	kg/m <sup>2</sup>	(tensión tangencial admisible en los pilotes)
$S =$	3	m	(espaciamiento centro a centro entre pilotes)
$n =$	4	adim	(número de pilotes en fila)
$\gamma =$	2,5	kg/m <sup>3</sup>	(peso específico del suelo)
$\alpha =$	13	°	(ángulo entre la superficie de falla y la horizontal, en el pilote)
$h =$	10	m	(longitud del pilote sobre la superficie de falla)
$z =$	10	m	(profundidad a la que se determinará la presión)
$\phi =$	30	°	(ángulo de fricción interna del suelo)
$a' =$	2,5	m	(espaciamiento borde a borde entre pilotes)

**Esfuerzo cortante desarrollado en la superficie de rotura:**

$$V_p = 1333,33 \text{ kg/m}$$

**Presión que reciben los pilotes:**

$$p = 2,71 \text{ kg/m}$$

**Momento provocado por dicha presión:**

$$M = 79,26 \text{ kg-m}$$

Volver a la hoja principal de pilotes

**Figura 45.** Hoja FI: fenómeno de inestabilidad en pilotes ocasionado por el terreno en deslizamiento progresivo.

## EFECTO DE GRUPO Y DISTRIBUCIÓN DE CARGAS EXTERNAS

**Ingrese los siguientes datos generales:**

$P_u =$	2000	kg	(carga axial última que actúa sobre el grupo de pilotes)
$V_u =$	2000	kg	(fuerza cortante última que actúa sobre el grupo de pilotes)
$M_{ux0} =$	3000	kg-m	(momento último que actúa sobre el grupo de pilotes en el eje x)
$M_{uy0} =$	3000	kg-m	(momento último que actúa sobre el grupo de pilotes en el eje y)
$D =$	0,25	m	(diámetro o ancho de los pilotes)
$m =$	2	adim	(número de filas del grupo)
$n =$	2	adim	(número de pilotes por fila)
$S =$	3	m	(espaciamiento centro a centro entre pilotes)

**Eficiencia del grupo de pilotes en suelos cohesivos según**

**Código de Cimentaciones:**

$$\varepsilon = 0,99 \text{ adim}$$

**Eficiencia de pilotes en arcilla con la fórmula de Los Ángeles:**

$$\varepsilon = 0,96 \text{ adim}$$

**Espaciamiento crítico:**

$$S_c = 1,80 \text{ m}$$

∴ **El espaciamiento está bien**

**Eficiencia crítica:**

$$\varepsilon_c = 0,86 \text{ adim}$$

**Fenómeno de rotura en bloque:**

Se necesita:

$C_u =$	10	kg/m <sup>2</sup>	(resistencia al corte sin drenar de la arcilla)
$L =$	10	m	(longitud de los pilotes)

$$Q_h = 2250,63 \text{ kg}$$

**Figura 46.** Hoja GP (parte 1): ingreso de datos y cálculo del efecto de grupo en arcillas, considerando rotura de bloque.

### Efecto de grupo en arenas:

Se requiere:

$p =$	10	$\text{kN/m}^2$	(presión neta que transmite el grupo)
$L =$	10	m	(longitud de los pilotes)
$B =$	10	m	(anchura del grupo)

Asentamiento del grupo de pilotes:

$$w_g = 13,83 \text{ mm}$$

Pilote	$k_i$	$d_{xi}$	$d_{yi}$	$kL_i$	$k_i \cdot d_{xi}^2$	$k_i \cdot d_{yi}^2$	$P_i$ (kg)	$V_i$ (kg)
1	0,175	0	0	0,00011	0	0	2000	500
2	0,175	3	3	0,00011	1,575	1,575	3857,14	500
3	0,175	0	3	0,00011	0	1,575	3357,14	500
4	0,175	3	0	0,00011	1,575	0	3357,14	500
		0,7		0,00045	3,15	3,15		

Figura 47. Hoja GP (parte 2): cálculo del efecto de grupo en arenas y tabla para distribuir cargas externas.

Seleccione el número de pilote:

Ingrese los siguientes datos correspondientes a dicho pilote:

$d_{xi} =$	3	m	(posición del pilote respecto al eje principal X)
$d_{yi} =$	0	m	(posición del pilote respecto al eje principal Y)
$A_i =$	0,0625	m <sup>2</sup>	(área transversal del pilote)
$E =$	28	kg/m <sup>2</sup>	(módulo de rigidez del pilote)
$L_i =$	10	m	(longitud de apoyo puntual equivalente del pilote)
$I_p =$	0,004	m <sup>4</sup>	(momento de inercia del pilote)

Carga vertical que recibe cada pilote:

Excentricidades de la resultante:

$$e_x = 1,5 \text{ m}$$

$$e_y = 1,5 \text{ m}$$

Rigidez axial del pilote:

$$k_i = 0,175 \text{ kg/m}$$

Rigidez lateral relativa del pilote:

$$k_{ij} = 0,00011 \text{ kg/m}$$

Cada vez que ingrese los datos de un pilote guárdelos con:

Guardar datos del pilote

Una vez guardados todos los pilotes que componen el grupo:

Volver a la hoja principal de pilotes

Figura 48. Hoja GP (parte 3): ingreso de datos para cada pilote que compone el grupo para ser guardados en la tabla de distribución de fuerzas externas.

**FACTORES DE REDUCCIÓN Y DE SEGURIDAD PARA CÁLCULO DE CAPACIDAD ADMISIBLE DE PILOTES**

<b>FACTORES DE REDUCCIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD ADMISIBLE (CFIA, 2003)</b>			
Método de determinación de capacidad	Condición de carga	Compresión	Tensión
Teórica o empírica con pruebas de carga	Usual	0,70	0,70
	Inusual	0,90	0,90
	Extrema	1,00	1,00
Teórica o empírica verificada con analizador de hinca	Usual	0,60	0,45
	Inusual	0,95	0,60
	Extrema	0,85	0,80
Teórica o empírica NO verificada con pruebas de carga	Usual	0,45	0,45
	Inusual	0,60	0,60
	Extrema	0,80	0,80

<b>FACTORES DE SEGURIDAD PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD ADMISIBLE (CFIA, 2003)</b>			
Método de determinación de capacidad	Condición de carga	Compresión	Tensión
Teórica o empírica con pruebas de carga	Usual	2,00	2,00
	Inusual	1,50	1,50
	Extrema	1,15	1,15
Teórica o empírica verificada con analizador de hinca	Usual	2,50	3,00
	Inusual	1,90	2,25
	Extrema	1,40	1,70
Teórica o empírica NO verificada con pruebas de carga	Usual	3,00	3,00
	Inusual	2,25	2,25
	Extrema	1,70	1,70

**Carga usual:** carga permanente

**Carga inusual:** carga permanente + transitoria

**Carga extrema:** carga permanente + transitoria + accidental

Volver a la hoja principal de pilotes

Figura 49. Hoja Fact: factores de reducción y de seguridad necesarios para el cálculo de la capacidad admisible de pilotes.

Proyecto: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

**Tipos de cimentación analizados:**

- > Pozo rígido
- > Pilote corto
- > Pilote

**Cargas externas consideradas:**

Momento = 13000 kg-m  
Axial = -2500 kg  
Cortante = 2500 kg

**Según esbeltez del elemento y características del suelo la mejor opción es:**

Pilote tipo: Sondeado a percusión de pequeño diámetro

**Dimensiones del cimiento:**

Lenterrada = 300 m  
Diámetro = 25 m  
Lexenta = 200 m

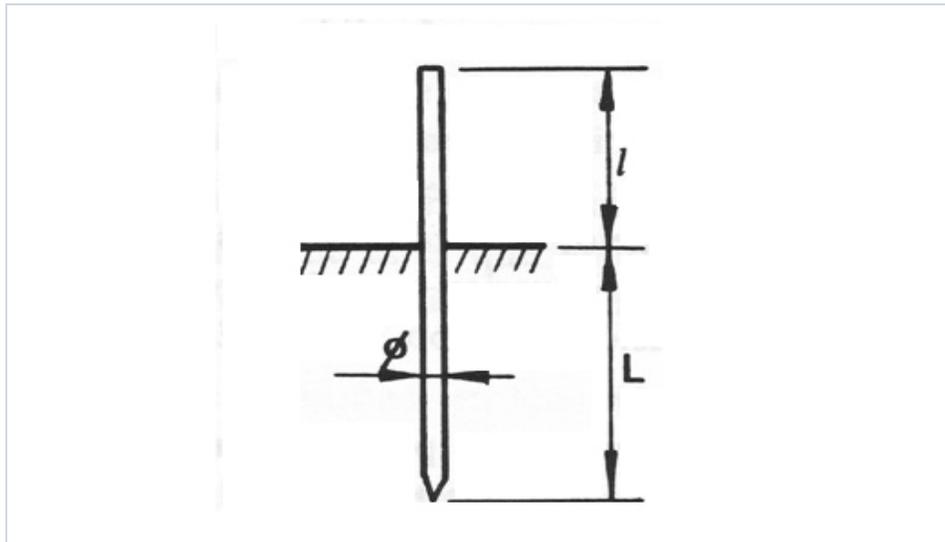
**Otras características:**

Número de estratos = 10  
¿Cómo resiste la carga?  
Por fricción

**Parámetros analizados:**

Situación de rotura: Cumple  
Estabilidad estructural: Cumple  
Análisis de capacidad por: Resistencia última  
Capacidad a tensión: Cumple  
Momento máximo de servicio = 3217,19 kg-m

**La representación general para este cimiento es:**



**Figura 50.** Hoja Reporte (parte 1): resumen del análisis realizado y representación general del tipo de cimiento.

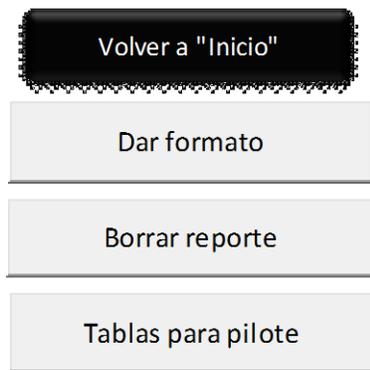
**Fricción negativa por estratos:**

Estrato	fn (kg)
1	
2	

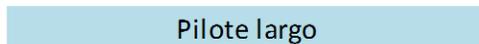
**Estratos que aportan fricción:**

Estrato	Qfric (kg)
1	8355,84
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

**Figura 51.** Hoja Reporte (parte 2): presentación de las tablas de rozamiento negativo y fricción por estratos, solo para pilotes.



**Elija el tipo de cimiento de la barra desplegable para insertar su imagen en el reporte:**



**Figura 52.** Hoja Reporte (parte 3): barra desplegable para ingresar imagen del tipo de cimiento y botones para dar formato, borrar y copiar tablas para pilotes.

Estos botones aparecen al lado derecho de la hoja de reporte y no se incluyó dentro del pseudocódigo del botón "crear reporte" porque se hacía demasiado pesado y no corría y la barra desplegable es la forma más fácil de insertar una

imagen en la posición deseada y del tamaño adecuado sin modificar la relación de aspecto de la misma.

# GUÍA DE USUARIO

## Índice

Complemento para interpolación.....	70
Habilitar Macros y ActiveX.....	70
Hoja "Inicio".....	70
Hoja "Datos".....	70
Bloque Rígido para cimiento rectangular en terreno granular (Hoja "BRRG").....	71
Consideración de la resultante fuera del núcleo central para "BRRG" (Hoja "CRFNC").....	71
Bloque Rígido para cimiento rectangular en terreno arcilloso (Hoja "BRRA").....	71
Bloque Rígido para cimiento circular en terreno granular (Hoja "BRCG").....	71
Bloque Rígido para cimiento circular en terreno arcilloso (Hoja "BRCA").....	71
Bloque Rígido para cimiento circular acampanado en terreno granular (Hoja "BRCAAG").....	72
Bloque Rígido para cimiento circular acampanado en terreno arcilloso (Hoja "BRCAA").....	72
Pilote Corto circular a compresión en terreno granular (Hoja "PCCCTG").....	72
Pilote Corto rectangular a compresión en terreno granular (Hoja "PCRCTG").....	72
Pilote Corto circular a compresión en terreno arcilloso (Hoja "PCCCTA").....	73
Pilote Corto rectangular a compresión en terreno arcilloso (Hoja "PCRCTA").....	73
Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral granular, apoyado en terreno granular (Hoja "PCCCTGATG").....	73
Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral arcilloso, apoyado en terreno granular (Hoja "PCCCTAATG").....	73
Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral granular, apoyado en terreno arcilloso (Hoja "PCCCTGATA").....	73
Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral arcilloso, apoyado en terreno arcilloso (Hoja "PCCCTAATA").....	74
Pilote Corto rectangular a compresión con terreno lateral granular, apoyado en terreno granular (Hoja "PCRCTGATG").....	74
Pilote Corto rectangular a compresión con terreno lateral arcilloso, apoyado en terreno granular (Hoja "PCRCTAATG").....	74
Pilote Corto rectangular a compresión con terreno lateral granular, apoyado en terreno arcilloso (Hoja "PCRCTGATA").....	74
Pilote Corto rectangular a compresión con terreno lateral arcilloso, apoyado en terreno arcilloso (Hoja "PCRCTAATA").....	75
Pilote Corto circular acampanado a tracción en terreno granular (Hoja "PCCATTG").....	75
Pilote Corto circular acampanado a tracción en terreno arcilloso (Hoja "PCCATTA").....	75
Pilote Corto en terreno granular hormigonado contra el terreno (Hoja "PCCGHCT").....	75
Pilote Corto en terreno arcilloso hormigonado contra el terreno (Hoja "PCCAHCT").....	76
Armado de pozos circulares sometidos a momento y tensión (Hoja "APTM").....	76
Hoja "PILOTES".....	76
Pilotes en grupo.....	76
Pilote aislado.....	76
Rozamiento negativo:.....	77
Inestabilidad estructural:.....	77
Capacidad de carga axial última:.....	77
Hinca dinámica de pilotes (Hoja "HDP").....	78
Esfuerzos máximos inducidos por empujes laterales en estribos de puentes (Hoja "EP").....	78
Pilotes en terreno con desplazamiento progresivo (Hoja "FI").....	78
Efecto de grupo y distribución de cargas externas (Hoja "GP").....	79
Factores de reducción y de seguridad para cálculo de capacidad admisible en pilotes (Hoja "Fact").....	79
Hoja "Reporte".....	79

## Complemento para interpolación

Si no se tiene el complemento para interpolación en la computadora de la cual se abre el documento, será mejor proceder de la siguiente manera:

1. Descargar el complemento desde la dirección <http://personales.gestion.unican.es/martinji/Interpolacion.htm>
2. Una vez descargado, descomprimir el archivo y copiar en la unidad "C:" la carpeta resultante.
3. Abrir cualquier documento de Microsoft Excel 2007®, o en el mismo si ya está abierto proceder de la siguiente manera: en la barra de herramientas, seleccionar el botón **Inicio**, luego ir a **Opciones de Excel**, elegir **Complementos** y dar click en el botón **Ir...** que aparece abajo en la ventana, se abrirá una nueva ventana llamada Complementos, dar click en el botón **Examinar...** y buscar el archivo en la Unidad C, una vez encontrado, seleccionarlo y darle abrir.
4. Fijarse que en la ventana Complementos que seleccionada la casilla de Interpolación.
5. Ahora está listo para usarse.

Si se tiene el complemento, siempre es bueno fijarse que la ubicación que está en Microsoft Excel 2007® sea la correcta, para esto se hace lo mismo que en el caso anterior en el paso 3. De no coincidir con la verdadera ubicación, se busca la correcta y se sustituye para que la herramienta funcione a la perfección.

## Habilitar Macros y ActiveX

Lo primero que se debe hacer, una vez que se abre la herramienta, es habilitar el contenido en la barra "advertencia de seguridad" que aparece sobre la barra de fórmulas de Microsoft Excel 2007®, en un cuadro de diálogo.

## Hoja "Inicio"

Es la hoja en que debe arrancar el programa y establece los lineamientos bajo los que se

desarrolló la herramienta, también le dice al usuario lo que puede hacer con la ella.

## Hoja "Datos"

En esta hoja es donde se deben ingresar los datos principales que ayudarán al programa a elegir el tipo de cimiento más adecuado. Estos son: las cargas externas que actúan sobre la cabeza del cimiento (momento, carga axial y fuerza cortante), se piden de manera independiente para poder analizar mediante esfuerzos de trabajo con cargas de servicio si se quiere, los parámetros del suelo (ángulo de fricción, cohesión, peso específico), la densidad y la resistencia a los 28 días del concreto a usar, profundidad a la que queda el cimiento y el módulo de deformación del primer estrato.

Cada vez que se pida ingresar algún dato aparece el símbolo del dato requerido, acompañado de una celda a su derecha con el siguiente formato  (esto con el fin de que no se modifiquen fórmulas ni se coloque el dato en una posición errónea, ya que únicamente este tipo de celdas deben ser modificadas, además de no tener que buscar las celdas que se deben llenar), la celda que sigue a la derecha especifica las unidades en que debe estar el dato ingresado y la siguiente es una breve descripción de lo que se pide.

Algunas de las celdas con el formato anterior contienen comentarios que facilitan al usuario comprender como debe ingresar los datos o el valor recomendado.

En el caso de las barras desplegable, se debe elegir el valor correspondiente a la condición que se tiene en el proyecto analizado.

Una vez ingresados los datos iniciales, seleccionada la combinación de carga a usar y los tipos de suelo, según la clasificación SUCS, se debe elegir la sección transversal deseada y proponer unas dimensiones para dicha sección.

Cuando se haya hecho lo anterior, se debe revisar la parte baja de esta hoja, en donde aparecen todos los casos analizados y se resalta el que sea la mejor opción. Ahora, lo que se debe hacer es dar un click sobre el nombre del tipo de cimiento y este hipervínculo lo llevará a la hoja de análisis del mismo.

## **Bloque Rígido para cimiento rectangular en terreno granular (Hoja “BRRG”)**

Lo único que se debe ingresar es la adherencia y el ángulo de rozamiento entre concreto – terreno.

Se revisa la relación entre la presión máxima y la mínima, de manera que se puedan usar los cuadros del Código de Cimentaciones para determinar el factor de seguridad o el coeficiente de reducción a usar, según corresponda.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Esta hoja tiene, además, un botón que permite considerar el caso que no se cumpla con la excentricidad máxima del la resultante vertical.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

## **Consideración de la resultante fuera del núcleo central para “BRRG” (Hoja “CRFNC”)**

Resuelve la ecuación de tercer grado que resulta al intentar analizar el problema de no tener la resultante en el núcleo central.

Solo se requiere que el usuario elija una de las 3 soluciones que resuelven la ecuación, que obviamente tiene que ser real y positiva, luego revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón para regresar a “Inicio” y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

## **Bloque Rígido para cimiento rectangular en terreno arcilloso (Hoja “BRRA”)**

Lo único que se debe ingresar es la adherencia y el ángulo de rozamiento entre concreto – terreno.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

## **Bloque Rígido para cimiento circular en terreno granular (Hoja “BRCG”)**

Lo único que se debe ingresar es la adherencia y el ángulo de rozamiento entre concreto – terreno.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

## **Bloque Rígido para cimiento circular en terreno arcilloso (Hoja “BRCA”)**

Lo único que se debe ingresar es la adherencia y el ángulo de rozamiento entre concreto – terreno.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar**

para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Bloque Rígido para cimiento circular acampanado en terreno granular (Hoja “BRCAG”)**

Lo único que se debe ingresar es la adherencia, el ángulo de rozamiento entre concreto – terreno y la distancia medida desde la base hasta el sitio donde se da el cambio de sección.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar a “Inicio”** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Bloque Rígido para cimiento circular acampanado en terreno arcilloso (Hoja “BRCAA”)**

Lo único que se debe ingresar es la adherencia, el ángulo de rozamiento entre concreto – terreno y la distancia medida desde la base hasta el sitio donde se da el cambio de sección.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto circular a compresión en terreno granular (Hoja “PCCCTG”)**

No se requiere ingresar ningún dato porque se trabaja con los de la hoja de Datos.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto rectangular a compresión en terreno granular (Hoja “PCRCTG”)**

No se requiere ingresar ningún dato porque se trabaja con los de la hoja de Datos.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto circular a compresión en terreno arcilloso (Hoja “PCCCTA”)**

Lo único que se requiere es la resistencia a la compresión simple del suelo.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto rectangular a compresión en terreno arcilloso (Hoja “PCRCTA”)**

Lo único que se requiere es la resistencia a la compresión simple del suelo.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral granular, apoyado en terreno granular (Hoja “PCCCTGATG”)**

Lo único que se debe ingresar es el peso específico y el ángulo de fricción interna del estrato II, además de la longitud de pilote corto que ingresa en dicho estrato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral arcilloso, apoyado en terreno granular (Hoja “PCCCTAATG”)**

Lo único que se debe ingresar es el peso específico y el ángulo de fricción interna del estrato II, además de la longitud de pilote corto que ingresa en dicho estrato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral granular, apoyado en terreno arcilloso (Hoja “PCCCTGATA”)**

Lo único que se debe ingresar es el peso específico y la resistencia a la compresión simple del estrato II, además de la longitud de pilote corto que ingresa en dicho estrato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar**

para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto circular a compresión con terreno lateral arcilloso, apoyado en terreno arcilloso (Hoja “PCCCTAATA”)**

Lo único que se debe ingresar es el peso específico y la resistencia a la compresión simple del estrato II, además de la longitud de pilote corto que ingresa en dicho estrato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto rectangular a compresión con terreno lateral granular, apoyado en terreno granular (Hoja “PCRCTGATG”)**

Lo único que se debe ingresar es el peso específico y el ángulo de fricción interna del estrato II, además de la longitud de pilote corto que ingresa en dicho estrato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto rectangular a compresión con terreno lateral arcilloso, apoyado en terreno granular (Hoja “PCRCTAATG”)**

Lo único que se debe ingresar es el peso específico y el ángulo de fricción interna del estrato II, además de la longitud de pilote corto que ingresa en dicho estrato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto rectangular a compresión con terreno lateral granular, apoyado en terreno arcilloso (Hoja “PCRCTGATA”)**

Lo único que se debe ingresar es el peso específico y la resistencia a la compresión simple del estrato II, además de la longitud de pilote corto que ingresa en dicho estrato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto rectangular a compresión con terreno lateral arcilloso, apoyado en terreno arcilloso (Hoja “PCRCTAATA”)**

Lo único que se debe ingresar es el peso específico y la resistencia a la compresión simple del estrato II, además de la longitud de pilote corto que ingresa en dicho estrato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto circular acampanado a tracción en terreno granular (Hoja “PCCATTG”)**

Lo único que se debe ingresar es la longitud de pilote corto que ingresa en dicho estrato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay

un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto circular acampanado a tracción en terreno arcilloso (Hoja “PCCATTA”)**

Lo único que se debe ingresar es la resistencia a la compresión simple del estrato II y la longitud de pilote corto que ingresa en dicho estrato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar a “Inicio”** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

### **Pilote Corto en terreno granular hormigonado contra el terreno (Hoja “PCCGHCT”)**

En este caso no requiere ingresar ningún dato.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

## Pilote Corto en terreno arcilloso hormigonado contra el terreno (Hoja “PCCAHT”)

Lo único que se debe ingresar es la resistencia a la compresión simple del estrato II.

Es importante revisar que cada condición o parámetro analizado cumpla, si no fuera así, en la parte inferior de la hoja hay un botón **Regresar** para dar click y aumentar las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño (esto es cuando los parámetros se alejan demasiado del límite), se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a la mejor opción a través del hipervínculo y luego dar click en el botón **Crear reporte**.

## Armado de pozos circulares sometidos a momento y tensión (Hoja “APTM”)

Lo único que se debe ingresar es la resistencia del acero a utilizar y el recubrimiento que tendrá el mismo.

Este cálculo se pone como un adicional, ya que la herramienta no está hecha para calcular acero, sin embargo, se incluyó porque es un caso especial tener tensión y momento al mismo tiempo y no es fácil determinar el acero longitudinal necesario según J. Jiménez.

Cabe destacar que este cálculo no se refleja en la hoja de reporte.

## Hoja “PILOTES”

Lo primero que aparece en la hoja son una serie de barras desplegables que consideran la forma de elegir un tipo de pilote según Armstrong, en los pasos 1, 2 y 3 se deben elegir las condiciones que presenta el proyecto que se desea analizar, para saber que se pide, al lado izquierdo de cada barra desplegable aparece la característica o condición en cuestión.

Cabe destacar que en el caso de influencia del tipo de suelo, cada barra desplegable presenta la opción para seleccionar la ausencia del suelo considerado por esa barra, esto debido a que no

precisamente estarán presentes todos los tipos analizados.

En el paso 4 aparecen todos los tipos de pilote considerados y según la clasificación de Armstrong, automáticamente se ponen los números de los pilotes con mejor comportamiento ante las condiciones seleccionadas en los pasos 1, 2 y 3 en formato texto verde oscuro con fondo verde claro, por ejemplo:

11

Pueda que no solo un número se ponga en el anterior formato, es por esto que se requiere que sea el usuario quien elija el que más le convenga de los sugeridos e ingrese su número en el espacio correspondiente para tal fin en el paso 5.

De esta manera aparecen las características típicas de ese pilote, que son: sección, longitud máxima y cargas normales; con el propósito de dar una idea al usuario de los límites que se le plantean y así poder dar mejores dimensiones provisionales.

A continuación se presenta un botón para pilotes hincados, en caso de que se quiera hacer un análisis por medio de la hincada que es el siguiente:

Hinca dinámica de pilotes

Esto no aparece en la hoja de reporte pero sirve para analizar el fenómeno de hinca dinámica.  
**Pilotes en grupo**

Después de ese botón aparece otro para ir a la **página “GP”** en donde se revisa el efecto de grupo y se pueden distribuir las cargas externas del grupo para saber cuánto le corresponde a cada pilote, es por esta razón que en caso de tener grupo de pilotes se debe ir a esta página para que distribuya las cargas y luego regresar a la hoja de pilotes y analizar cada uno de ellos por separado como pilote aislado, aunque en realidad no lo es.

En caso de aplicar el anterior procedimiento se debe recordar que la resistencia de un pilote en grupo es la resistencia del pilote aislado multiplicada por la eficiencia.

### Pilote aislado

Se deben ingresar todos los datos pedidos en las celdas con relleno verde claro:

Seleccionar de la barra desplegable el tipo de suelo que predomina a lo largo de los estratos atravesados por el pilote, según clasificación SUCS.

Más abajo aparece una celda para ingresar el ángulo de inclinación del pilote respecto a la vertical, si no está inclinado se usa cero.

Seguidamente se analiza la situación de servicio del pilote respecto a la carga lateral. Más abajo hay una consideración para el caso de grupo en donde solo se requiere seleccionar el tipo de grupo y el espaciamiento centro a centro entre pilotes.

Para la situación de rotura se requiere averiguar y ingresar la profundidad a la cual se cancela en el momento producido por la carga lateral, el ángulo de fricción interna, el peso específico efectivo del suelo y seleccionar la situación de la cabeza del pilote. Se advierte que estos dos análisis toman en consideración un solo estrato, así que no tienen validez para suelos estratificados. También se tiene una pequeña parte para considerar la carga de rotura para pilotes en grupo.

Rozamiento negativo:

Primero se debe ingresar el número de estratos que presentan el fenómeno para poder hacer la tabla a la medida, este número no debe ser mayor a 5 porque la tabla se saldrá del espacio asignado para tal fin. Si ya hay una tabla se debe borrar y hacer una nueva.

Se selecciona el tipo de suelo que produce el fenómeno o no se presenta en caso de que no se dé.

Luego se deben ingresar los siguientes datos del estrato a analizar: esfuerzo vertical promedio, espesor y ángulo de fricción interna en el caso de ser arena, sino usar cero, además del perímetro de la sección transversal del pilote y el número que se le asigna al estrato (este número es completamente independiente de los demás estratos, es decir, que no se acumula con los otros sino que se empieza ingresando el número 1 y si hay otro seguiría el 2 y así sucesivamente, ya que este definirá la posición en que serán guardados los datos en la tabla).

Inmediatamente debajo de los cálculos de fricción negativa está un botón **Guardar datos del estrato** que al darle click guardará automáticamente el resultado obtenido, en caso de

cometer algún error y darse cuenta hasta después de guardar, basta con hacer la corrección y no cambiar el número de estrato, esto provocará que los nuevos resultados sustituyan los anteriores al guardarlos.

Para calcular un nuevo estrato, se regresa al sitio de ingreso de datos y se escriben los correspondientes al nuevo estrato (muy importante recordar cambiar número de estrato), esto no provocará cambios en el anterior cálculo porque ya fue guardado. Repetir este procedimiento hasta guardar todos los estratos con fricción negativa. Después del botón para guardar aparecerá la sumatoria de todos los datos guardados en la tabla.

Más abajo aparecen dos botones: uno para ir a la hoja que analiza estribos de puente y otro para la hoja que analiza el caso de pilotes en un terreno con deslizamiento progresivo, de estas hojas se habla más abajo en esta guía.

Si no hay rozamiento negativo, solo se debe asegurar que la tabla quede sin ningún dato guardado.

Inestabilidad estructural:

Solo se debe seleccionar la condición del pilote (NOTA: solo analiza la condición vertical, lo que varía es si el pilote está completamente enterrado o no) y la de la cabeza, se vuelve a pedir debido a lo limitados que son estos análisis y pueda que no se quiera revisar la situación de servicio pero sí la posible inestabilidad por pandeo.

Se debe revisar que la carga axial no supere la de pandeo.

Capacidad de carga axial última:

Se selecciona la manera en que el pilote resiste la carga a que está sometido: fricción, punta o ambas.

En caso de que se incluya la fricción, se debe ingresar el número de estratos considerados para poder hacer la tabla a la medida, este número no debe ser mayor a 10 porque la tabla se saldrá del espacio asignado para tal fin. Si ya hay una tabla se debe borrar y hacer una nueva.

Se selecciona el número que se asigna al estrato por analizar y se ingresan sus datos: esfuerzo vertical efectivo en el punto medio del estrato y espesor del mismo, además del

perímetro del pilote (se vuelve a pedir en caso de no haber fricción negativa y no se halla llenado este dato). En caso de tratarse de un estrato rocoso, se debe ingresar la resistencia por fricción entre el material del pilote y la roca, si es arcilloso no requiere ingresar nada y si es granular (poca presencia de arcilla) requiere ingresar el ángulo de fricción interna del material y seleccionar el material con que se hará y la forma en que se construirá el pilote.

Una vez ingresado lo anterior, se calculará la fricción del estrato y se puede proceder a guardar los resultados mediante el botón asignado para tal fin.

Se hace lo mismo para cada estrato atravesado total o parcialmente por el pilote y recordando cambiar el número para no perder los datos guardados.

Si el pilote resiste la carga por punta, se selecciona el tipo de suelo, según la clasificación SUCS, en que queda la base del cimiento. Se ingresan los datos requeridos a nivel de la base: esfuerzo vertical efectivo, área de sección transversal del pilote, capacidad de soporte del suelo, ángulo de fricción interna (en caso de suelos granulares) o resistencia al corte sin drenar (en caso de arcillas).

Si la carga es de extracción (pilotes a tensión), se requiere analizar la capacidad ante extracción del pilote, para ello se requiere el análisis por fricción antes hecho y el peso total del pilote.

Se selecciona el tipo de análisis a realizar (dependiendo de cómo fueran calculadas las cargas últimas) y se da click en el botón Factores para determinar, en base a las tablas del Código de Cimentaciones, qué coeficientes de reducción o factores de seguridad se deben usar (dependiendo de la forma en que se calcularon las cargas, el tipo de cargas presentes y el tipo de carga axial).

A pesar de que se calculan tanto la capacidad a compresión como a tensión, la herramienta solo comparará la fuerza axial aplicada en relación a su signo con la que corresponda.

Cuando se cumpla con todo y sea evidente que no hay un sobre diseño, se aconseja dar click en el botón **Ver reporte** para asegurarse que no se sobrescribirán datos, si hay un reporte previo, dar click en el botón **Borrar reporte**, luego en el botón **Regresar** y desde ahí volver a **Bloque Rígido para cimiento rectangular en terreno granular** a través del hipervínculo y luego dar click

en el botón **Crear reporte**. Además, las tablas se ingresan al reporte manualmente mediante un botón llamado **Tablas para pilote**, esto debido a que el pseudocódigo queda muy pesado al hacer todo de una sola vez y no corre.

## Hinca dinámica de pilotes (Hoja “HDP”)

Lo primero es definir si el pilote tendrá o no sufridera seleccionando uno de los botones selección.

Luego se deben ingresar una serie de datos: la altura comprendida entre el mazo y la cabeza o sufridera del pilote, el peso del mazo, la longitud total, peso, módulo de rigidez, sección transversal y peso específico del pilote, el coeficiente de elasticidad y espesor de la sufridera (si la hay), el coeficiente de elasticidad y espesor de la galleta (si la hay) y el “rechazo” que sufre el pilote producto de la acción del suelo medido en hinca.

Con estos datos se calcula la presión y tracción máxima producidas por el mazo en la cabeza del pilote, además, la carga de hundimiento que provocará ese mazo según la fórmula de hinca de Janbú.

## Esfuerzos máximos inducidos por empujes laterales en estribos de puentes (Hoja “EP”)

Se adjunta una imagen de la condición hipotética del estribo para facilitar la comprensión de lo que se solicita en el ingreso de datos. Por lo que es bastante fácil interpretar qué se solicita.

En esta hoja se pretende averiguar la presión lateral que tendrá el pilote para efectos de diseño y para verificar en un análisis más a fondo que no provoquen la falla del mismo al deformarlo de forma transversal.

## Pilotes en terreno con desplazamiento progresivo (Hoja “FI”)

Se adjunta una imagen de manera ilustrativa sobre la situación analizada.

Se revisa cómo se comporta una fila de pilotes ante el esfuerzo cortante, la presión lateral que se producen cuando el terreno está

deslizándose y el momento provocado por esa presión.

Estos datos son muy importantes en caso de querer diseñar un pilote en estas condiciones, ya que ayuda a obtener la presión lateral y el momento en cualquier punto del pilote, además de obtener el cortante provocado por la superficie de falla.

Se pueden graficar los datos obtenidos para diferentes profundidades para tener una idea del comportamiento a lo largo de la longitud total del pilote.

Sin embargo se recuerda que esta no es la mejor opción si se quiere estabilizar un talud.

## Efecto de grupo y distribución de cargas externas (Hoja “GP”)

Para el uso de esta hoja, lo primero es definir la posición de los ejes coordenados en el proyecto y respecto ellos la posición de cada pilote. La distribución se hace de manera exitosa si los pilotes son verticales.

Se ingresan los datos solicitados para calcular el efecto de grupo en caso de que el suelo sea arcilloso, de no ser así se puede saltar esta parte ya que se tomará la eficiencia como igual a uno. Sin embargo, se deben llegar todos los datos porque se necesitan para distribuir las cargas externas por pilote (excepto el campo que pide ingresar el diámetro de los pilotes).

En caso de pilotes en arcilla, se analiza el fenómeno de rotura por bloque, el cual calcula la carga de hundimiento de grupos cuadrados de pilotes (mxm pilotes), se advierte que no funciona para grupos que no sean cuadrados. Este fenómeno debe de considerarse si los pilotes están muy próximos, es decir, tienen un espaciamiento muy pequeño.

Para arenas, lo que se calcula es el asentamiento probable del grupo.

Al distribuir las cargas, se da click en el botón **Crear tabla de pilotes**, se selecciona el número del pilote por analizar, luego se deben ingresar los datos de ese pilote, inmediatamente debajo de los cálculos está un botón **Guardar datos del pilote** que al darle click guardará automáticamente el resultado obtenido, en caso de

cometer algún error y darse cuenta hasta después de guardar, basta con hacer la corrección y no cambiar el número de estrato, esto provocará que los nuevos resultados sustituyan los anteriores al guardarlos.

Para ingresar un nuevo pilote, se regresa al sitio donde se asigna el número al pilote y se selecciona el nuevo número (muy importante recordar cambiar el número de pilote), esto no provocará cambios en el anterior cálculo porque ya fue guardado. Repetir este procedimiento hasta guardar todos los datos de cada pilote.

Una vez guardados todos los datos de los pilotes existentes, se regresa a la tabla de pilotes y se da click en el botón **Calcular Pi y Vi** para obtener los valores de carga axial y cortante por pilote.

## Factores de reducción y de seguridad para cálculo de capacidad admisible en pilotes (Hoja “Fact”)

En esta hoja aparecen los dos cuadros tomados del Código de Cimentaciones de Costa Rica para la determinación del factor de seguridad o el coeficiente de reducción que se debe usar dependiendo de la forma en que se determinaron las cargas y la naturaleza de las cargas tomadas en cuenta.

## Hoja “Reporte”

La primera parte de esta hoja es llenada cuando, luego de realizar el análisis de alguno de los tipos de fundación analizados, se presiona el botón **Crear reporte**.

Para dar un mejor formato al reporte se da click en el botón **Dar formato**.

En el caso de pilotes, se presiona el botón **Tablas para pilote**, de esta manera se copiarán las tablas del análisis de pilote aislado.

Para que el reporte lleve la imagen que le corresponde, se elige el tipo de cimiento adecuado de la barra desplegable que hay en la celda de color celeste.

# Análisis de los resultados

La herramienta se desarrolló de manera que cada una de las hojas puedan ser impresas en formato carta (216 x 279 mm), de manera que si se quiere tener como memoria de cálculo, fácilmente pueda extraerse la información de la computadora. También genera un reporte del análisis hecho y los resultados obtenidos, que puede entregarse al cliente.

Se inicia con una hoja que le dice al usuario lo que puede hacer y lo que no con la aplicación, de manera que no empiece a ingresar valores si no le servirá para lo que necesita.

El procedimiento para utilizarla no es muy complicado, más bien, se irá indicando al usuario cuál es el siguiente paso. En caso de tener que ingresar datos, las celdas destinadas a tal fin presentan un formato totalmente diferente, de forma que no se coloquen datos en sitios que no corresponden y se vea afectado el análisis.

Además, al solicitar datos, se especifica la simbología empleada, las unidades en que debe ser ingresado y una breve descripción de lo que se pide para evitar confusiones con los símbolos o que no se sepa qué le están solicitando.

Como se crearon varias hojas para que en cada una de ellas se analice un caso específico, se hizo necesario insertar botones que faciliten el movilizarse en la herramienta de modo eficiente y no preocuparse por buscar la hoja requerida. Estos son los botones negros que aparecen, por lo general, al final de cada hoja y que permiten regresar a donde se ingresan los datos, en caso de necesitar hacer alguna modificación o ver el reporte creado para verificar que todo esté correctamente.

Lo antes mencionado ayuda en caso de que, por ejemplo, la hoja de datos recomiende alguna de pilote corto a tensión, que son de las que está más lejanas, al ir a través del hipervínculo y revisar la hoja, alguno de los parámetros no cumple y se tiene que regresar a cambiar las dimensiones de la sección, esto lo hará solo con hacer click en un botón.

Al final de cada caso analizado, se presenta un botón programado que permite crear un resumen.

En la figura 19 hay que ingresar varios datos que serán la base para la elección del tipo de cimiento a usar, las cargas externas no tienen relación con esta elección, ya que es estrictamente dependiente de la longitud, las dimensiones de sección transversal propuestas y del o los tipos de suelo con que interactúe, pero se piden en esta hoja para que no tengan que ser ingresadas varias veces si, al variar la propuesta inicial, cambia la recomendación del programa. Esto hace que la herramienta sea más fácil de manejar y más flexible ante cambios.

De la figura 20 se puede rescatar que se logró insertar al programa la clasificación según SUCS, esto facilita la comprensión al elegir el tipo de suelo, ya que se limitará a elegir el símbolo que proporciona el estudio de suelos.

También se advierte que no se identificaron todos los problemas de división entre cero ocasionados al poner ese valor en alguna de las dimensiones de la sección transversal posible, por eso aparecen los comentarios que recomiendan dejar los valores en 1 si no se necesita modificarlos, aunque en realidad no importa el valor que tengan, siempre que sea diferente a cero.

En la parte de la hoja de inicio representada en la figura 19, se debe tener el cuidado de dar click en el texto con formato diferente, ya que todos son hipervínculos y al errar en la selección del adecuado, se direccionará hacia una hoja que no es la que se debe revisar.

Si no aparece ningún tipo de cimiento con el formato definido, se debe revisar que ninguno de los valores de dimensiones de sección esté en cero.

El bloque rígido solo se analiza a compresión, por tanto nunca se verá elegido uno de ellos si la carga axial es de extracción.

Para pozos con bloque rígido, tomó en cuenta la sección 4.3.6 inciso b del Código de

Cimentaciones, que es el que da los lineamientos para su análisis y pide comprobar lo siguiente:

- “Que el suelo en la base del bloque no falle por cortante y mantenga un factor de seguridad (FS) o factor de reducción ( $\emptyset$ ) adecuado”. Esto se comprueba al calcular la resultante horizontal en la base y verificar que no sea mayor a la máxima multiplicada por  $\emptyset$  o dividida entre FS, dependiendo del tipo de análisis.
- “Que no se produzca la falla lateral del terreno. La presión lateral máxima producida por las cargas externas deberá mantener un factor de seguridad adecuado contra la falla por resistencia pasiva del suelo”. Para ello se calculan ambas presiones y se afecta la resistencia pasiva por el factor de seguridad que sale de los cuadros 14 o 15, no se revisa la falla en sí sino la condición de servicio.
- “Que se obtenga en factor de seguridad adecuado contra el volcamiento del bloque”. Esta parte no se comprobó porque se busca que la resultante quede dentro del núcleo central de la base.
- “Que el desplazamiento en la parte superior del bloque sea admisible, en función del estado límite de servicio”. Para ello se verificó que este desplazamiento se mantuviera alejado del máximo permitido que se asumió igual a una pulgada.

A pesar que el Código de Cimentaciones tiene fórmulas para calcular los valores antes mencionados, se utilizaron las que plantea Jiménez 1996, ya que son más específicas al tipo de suelo y sección transversal del cimiento.

Únicamente en el caso de la fundación representada por las figuras 23 y 24, se encontraron fórmulas para considerar la resultante fuera del núcleo, sin embargo no son fácil de resolver y, aunque se incluyeron en la hoja de la figura 25, el usuario debe recordar que falta analizar la posibilidad de volcamiento del bloque.

Se aclara que granular no implica la ausencia de pequeñas porciones de material cohesivo, por lo que un material granular puede tener cohesión pero para efectos de cálculo se desprecia por considerarse pequeña. Lo mismo pasa en caso de suelos arcillosos en donde se asume un ángulo de fricción de cero.

Debido a que para pilotes cortos solo se cuenta con fórmulas que permiten el cálculo del desplazamiento horizontal y presiones para un

estrato, el efecto producido por el segundo estrato, para los sometidos a compresión, no está considerado en el análisis. Esto no afecta en el caso del desplazamiento, porque siempre es inversamente proporcional a la profundidad, pero se recomienda revisar la presión lateral del segundo estrato para evitar que falle producto de las cargas externas.

Como los pilotes cortos son bastante diferentes a las cimentaciones superficiales, no se puede utilizar la relación de  $q_{min} / q_{max}$  para determinar el factor de seguridad a usar, así que se acudió a los tradicionales del cuadro 14 y se asumió un factor de 3 para cálculo de presión de hundimiento o resistencia a la tensión admisible, según corresponda, y las presiones laterales.

El desplazamiento horizontal de pilotes solo se analizó por servicio por lo que no se afectó por ningún factor de seguridad, tal como especifica el Código de Cimentaciones de Costa Rica.

En el caso de pilote corto apoyado en terreno granular, se requieren los factores de carga por inclinación, profundidad y forma, se utilizaron las ecuaciones 64, 65 y 66 para determinarlos respecto al ángulo de fricción interna del suelo. La ecuación 66 ya está corregida por la forma de la sección.

En la determinación del coeficiente adimensional  $N_c$  para pilote corto a compresión apoyado en terreno arcilloso, dependiendo de la sección transversal, se usa la fórmula 59 si es rectangular, sino se debe interpolar del cuadro 1, para esta interpolación se creó una hoja aparte que lleva por nombre el símbolo del coeficiente y que está oculta dentro de la misma herramienta para evitar saturarla o que se modifique por equivocación.

De manera similar al caso antes mencionado, pasa al determinar la adherencia para pozos a tensión en arcilla, ya que también hay una hoja oculta en la que se interpola su valor a partir de la resistencia al corte sin drenar de la arcilla, según el cuadro 2.

En la figura 33 se presenta el cálculo del acero longitudinal para pozos sometidos a tensión y momento al mismo tiempo, se debe recordar que únicamente puede ser usada si la fundación es circular, esto por las fórmulas de análisis. En esta hoja se presenta la opción más económica y la recomendación planteada por Jiménez, 1996. La parte de la hoja de pilotes representada por la figura 34 presenta todas las

consideraciones de los cuadros 5, 6 y 7, de modo que, dependiendo de lo que se elija en cada una de las barras desplegables, se verifica qué tipo de pilote funciona para esa condición. Al final lo que se hace es resaltar los números de los pilotes que cumplieron en la mayoría de las condiciones, esto significa que no precisamente cumplen todas, pero que son los que más se acercan a cumplirlas, es por eso que se recomienda, una vez elegido el pilote a usar, mostrar las columnas ocultas a la derecha de la hoja para ver que cumpla cada una de las condiciones, de no ser así, se revisan las observaciones de los cuadros 5, 6 y 7 para los ítems no cumplidos para ver cómo solucionar el problema.

La figura 35 muestra las características principales del pilote seleccionado, se debe tener en cuenta que las cargas normales que aparecen son para la capacidad del pilote y no del suelo, que es lo que se analiza en la herramienta, así que no se debe pretender obtener este valor del cálculo de la capacidad soportante. La sección máxima, en cambio, sí es un dato muy valioso, ya que da una idea sobre la propuesta de sección que se hará inicialmente.

El ángulo de inclinación del pilote solicitado en la figura 36 se usa para determinar el módulo de elasticidad del terreno para el pilote inclinado en relación al de uno completamente vertical, esto significa que se varía ese módulo para considerar la inclinación del pilote según el cuadro 11 que permite interpolar conociendo el ángulo que forma el elemento con la vertical.

Al revisar la condición de servicio, se requiere que las cargas no estén combinadas, por eso se solicitan nuevamente. Una limitante muy importante es que tanto la condición de servicio como la de rotura asumen la presencia de un solo estrato.

Para calcular el desplazamiento y el máximo momento en servicio (figura 37) se requieren una serie de datos tales como: coeficiente adimensionales A y B de la figura 11, coeficiente  $f$  del cuadro 10, factor  $m$  de la figura 13 y coeficiente  $\alpha$  de la figura 14. Para determinar estos valores de los cuadros y figuras, en una hoja oculta nombrada "A y B" se digitalizaron las figuras, es decir, se obtuvieron varios puntos de cada curva de manera que fueran representativos del comportamiento y que se puedan interpolar valores a partir de esos puntos, de los cuadros simplemente se interpolan los valores.

Al agregar botones programados que permiten crear tablas a la medida, se logra que la herramienta sea más estética y eficiente, además, lo que permiten guardar datos, ayudan a evitar procesos largos y repetitivos que ocupan mucho espacio y facilitan revisar la tabla para asegurarse que los datos se guardaron correctamente porque nunca se alejará de ella.

En el cálculo de la capacidad a fricción del pilote en estratos granulares se emplearon los cuadros 8 y 9 que facilitan la obtención de valores como ángulo de rozamiento y coeficiente de empuje del terreno.

Para determinar el coeficiente de capacidad de carga para cimentaciones profundas en suelos granulares se evitó que el usuario tenga que buscarlo de un gráfico, para ello se tomó la ecuación de mejor ajuste de la figura 9 para su determinación y usarlo en el cálculo de capacidad por punta.

No está de más mencionar que si un pilote resiste las cargas por fricción, no se requiere ingresar los datos para capacidad por punta y viceversa.

A pesar de que se calcula tanto la capacidad a compresión como a tensión, se identifica el tipo de carga externa aplicada y en base a esta se compara con la capacidad correspondiente. Se puede elegir entre los dos tipos de análisis a realizar y los coeficientes de reducción o seguridad si deben ser elegidos de los cuadros de la figura 49.

Además del pilote aislado, también se presenta la posibilidad de considerar un pilote en grupo, la única diferencia es que se debe ir a la hoja de distribución de cargas por pilote para saber cuánto corresponde a cada uno, luego ingresar esas cargas, calcular la capacidad del pilote como si estuviera aislado y, por último, agregar a la fórmula de cálculo final de la resistencia el factor eficiencia, en caso de arcillas, o verificar el asentamiento del grupo, en caso de arenas.

Aparte de todos los casos de fundación revisados, se incluyen algunas hojas que consideran el efecto de la hincia, el fenómeno de pilotes en terreno fallado y estribos de puentes soportados por grupos de pilotes como un extra de casos especiales de pilotes, que permiten analizar la carga de hundimiento (hincia dinámica), el cortante y presiones laterales sobre el pilote (pilotes en terreno deslizando) y la presión lateral producto de la compresibilidad de

un suelo blando bajo un relleno de aproximación (estribos de puente). Sin embargo, no son parte del objetivo principal del estudio.

Se hubiera querido que el usuario no tuviera que hacer ninguna modificación al reporte, sino que fuera autosuficiente, pero no se logró debido a las limitaciones del programador de Microsoft Excel 2007® que no corre si se programan varias acciones para un solo botón. La guía de usuario, más que todo, explica cómo

solucionar posibles problemas relacionados con el manejo de la herramienta y qué es lo que se debe hacer en cada hoja de la misma, no se detalla demasiado sobre los datos que se deben ingresar porque en la aplicación se explica lo que se solicita. Se repiten algunos procedimientos porque no se pretenderá que, cada vez que surja una duda, se tenga que revisar toda la guía, sino que se vaya a la parte requerida mediante el índice.

# Conclusiones

1. Se consiguió desarrollar una herramienta que compara veintitrés casos de cimentación, basados en los tres tipos analizados: bloque rígido, pilote corto y pilote largo.
2. Se incorporó a la hoja de pilotes un conjunto de barras desplegable en cual el usuario selecciona las condiciones de su proyecto en cuanto a topografía, tipo de suelo y tipo de estructura, para que el programa indique el o los tipos de pilote más adecuados para tales condiciones.
3. Se creó una pequeña guía de usuario que explica aspectos relevantes sobre el manejo de la herramienta para facilitar al usuario su comprensión.
4. Cada hoja de análisis cuenta con un botón en la parte inferior para crear un reporte que resume el análisis y puede ser entregado al cliente.
5. Se cumplió con la normativa vigente en el Código Sísmico de Costa Rica en cuanto a la reducción de la capacidad del suelo y al uso de las combinaciones de carga para determinar la capacidad última de la estructura.
6. Se logró incorporar la clasificación SUCS, de manera que se puedan hacer los cálculos dependiendo del tipo de suelo presente y en base a una clasificación fácil de obtener en laboratorio.
7. Haciendo uso de algunos botones del programador de Microsoft Excel 2007 se logró que la herramienta sea más compacta al poder guardar datos y luego usar el mismo procedimiento para un nuevo estrato o pilote.

# Recomendaciones

1. Agregar a la aplicación desarrollada el cálculo del acero de refuerzo, en caso de concreto reforzado, y el análisis de resistencia del concreto, del acero o de la madera según corresponda, para que también incluya el diseño del cimientado.
2. Analizar los bulbos de presión generados por la fundación o grupo de fundaciones para tomar en cuenta posibles afectaciones a estructuras existentes como por ejemplo túneles.
3. Se recomienda que la persona que utilice la herramienta tenga conocimientos básicos en geotecnia, esto para facilitar la comprensión de los parámetros que se piden.
4. Tomar en cuenta también las cimentaciones superficiales y otras como las pilas, pilares y micro-pilotes para tener una mayor variedad al elegir.
5. No desproteger el documento para evitar que se modifique la posición de las celdas, esto debido a que el procedimiento programado está vinculado a algunas de esas celdas y puede causar que el reporte no dé los resultados esperados o que las tablas se salgan del lugar asignado para ellas.

# Apéndices

## Resolución de ecuaciones para resultante fuera del núcleo

De las ecuaciones 13 y 14 se pueden obtener las siguientes:

$$Q + R = \frac{\eta NH^2}{27\left(\frac{L}{2}-e\right)^2} \quad (\text{Ecuación 144})$$

$$M + QH = \frac{\eta NH^3}{54\left(\frac{L}{2}-e\right)^2} + Ne \quad (\text{Ecuación 145})$$

La ecuación 145 también se puede expresar como sigue:

$$M + QH = \frac{\eta NH^2}{27\left(\frac{L}{2}-e\right)^2} * \frac{H}{2} + Ne \quad (\text{Ecuación 146})$$

Como se puede ver, se puede sustituir la ecuación 144 en la 146, de manera que:

$$M + QH = (Q + R)\frac{H}{2} + Ne \quad (\text{Ecuación 147})$$

Despejando la resultante horizontal se tiene:

$$R = \frac{2*(M+QH-Ne)}{H} \quad (\text{Ecuación 148})$$

Sustituyendo la ecuación 148 en la 144:

$$\frac{2*(M+QH-Ne)}{H} + Q = \frac{\eta NH^2}{27\left(\frac{L}{2}-e\right)^2} \quad (\text{Ecuación 149})$$

Que desarrollada tiene como resultado la siguiente ecuación de tercer grado:

$$(2N)e^3 + (-2M - 3QH - 2NL)e^2 + \left(2ML + 3QHL + \frac{NL^2}{2}\right)e + \left(\frac{\eta NH^3}{27} - \frac{ML^2}{2} - \frac{3QHL^2}{4}\right) = 0 \quad (\text{Ecuación 150})$$

Vista como una ecuación de tercer orden, se obtienen sus parámetros:

$$a = 2N \quad (\text{Ecuación 151})$$

$$b = -2M - 3QH - 2NL \quad (\text{Ecuación 152})$$

$$c = 2ML + 3QHL + \frac{NL^2}{2} \quad (\text{Ecuación 153})$$

$$d = \frac{\eta NH^3}{27} - \frac{ML^2}{2} - \frac{3QHL^2}{4} \quad (\text{Ecuación 154})$$

Se dividen todos los parámetros entre el resultado de la ecuación 151 de manera que resulta una nueva fórmula que se verá así:

$$y^3 + \left(c - \frac{b^2}{3}\right)y + \frac{27d - 9b^2c + 2b^3}{27} = 0 \quad (\text{Ecuación 155})$$

Con:

$$e = y - \frac{b'}{3} \quad (\text{Ecuación 156})$$

Se realizan los siguientes cambios de variable:

$$p = c - \frac{b'^2}{3} \quad (\text{Ecuación 157})$$

$$q = \frac{27d - 9b^2c + 2b^3}{27} \quad (\text{Ecuación 158})$$

Se procede al cálculo de:

$$A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D}} \quad (\text{Ecuación 159})$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D}} \quad (\text{Ecuación 160})$$

$$D = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2 \quad (\text{Ecuación 161})$$

Se obtienen las soluciones:

$$y_1 = A + B \quad (\text{Ecuación 162})$$

$$y_2 = -\frac{A+B}{2} + \frac{i\sqrt{3}}{2}(A - B) \quad (\text{Ecuación 163})$$

$$y_3 = -\frac{A+B}{2} - \frac{i\sqrt{3}}{2}(A - B) \quad (\text{Ecuación 164})$$

Ahora, se sustituyen estos valores en la ecuación 156 para obtener las tres soluciones de la ecuación inicial. Se elige la solución real positiva que sea más apropiada.

Ya conociendo "e", se pueden calcular la resultante horizontal con la fórmula 148, tan  $\alpha$  con ecuación 12 y la presión máxima lateral con:

$$p_1 = \frac{\eta NH}{18B\left(\frac{L}{2} - e\right)^2} \quad (\text{Ecuación 165})$$

## Procedimiento para crear tabla de capacidad por fricción del pilote

```
Private Sub CommandButton3_Click()
```

```
'Rótulos de tabla:
```

```
Hoja110.Cells(276, 5) = "Estrato"
```

```
Hoja110.Cells(276, 6) = "Qfric (kg)"
```

```
'Inserta el número de estratos:
```

```
n = Hoja110.Cells(271, 3)
```

```
nfila = 276
```

```
For i = 1 To n
```

```
Hoja110.Cells(nfila + i, 5) = i
```

```
Next i
```

```
'Para formato de la tabla:
```

```
Hoja110.Range("E276").Select
```

```
Selection.CurrentRegion.Select
```

```
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
```

```
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlInsideVertical)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlInsideHorizontal)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
```

```
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlMedium
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```

        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeRight)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
    With Selection.Borders(xlInsideVertical)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlThin
    End With
    With Selection.Borders(xlInsideHorizontal)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlThin
    End With
    'Formato de los encabezados de la tabla:
    Hoja110.Range("E276:F276").Select
    Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle =
xlNone
    Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle =
xlNone
    With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeTop)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeRight)
        .LineStyle = xlContinuous

```

```

        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
    With Selection.Borders(xlInsideVertical)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlThin
    End With
    Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle
= xlNone
    Hoja110.Range("E276").Select
    aviso = MsgBox("Ahora debe introducir y
guardar los datos de cada estrato que
contribuyen a la fricción del pilote", vbInformation,
"Paso siguiente...")
End Sub

```

## Procedimiento para guardar datos en la tabla de capacidad por fricción

```

Private Sub CommandButton4_Click()
    'Guardar resultados
    x = Hoja45.Cells(1, 2)
    Hoja110.Cells(x + 276, 6) = Hoja45.Cells(2, 2)
    aviso = MsgBox("Los resultados fueron
guardados", vbInformation, "Paso siguiente...")
End Sub

```

## Procedimiento para borrar tabla de capacidad por fricción del pilote

```

Private Sub CommandButton7_Click()
    'Borrar la tabla:
    Range("E276").Select
    Selection.CurrentRegion.Select
    Selection.Clear
    aviso = MsgBox("Se borraron los datos
existentes", vbInformation, "Paso siguiente...")
End Sub

```

## Procedimiento para crear reporte del pilote

```

Private Sub CommandButton2_Click()

```

```

Hoja42.Range("B1") = "Proyecto:"
Hoja42.Range("G1") = "Fecha:"
Hoja42.Range("B3") = "Tipos de cimentación
analizados:"
Hoja42.Range("C5") = "Pozo rígido"
Hoja42.Range("C6") = "Pilote corto"
Hoja42.Range("C7") = "Pilote"
Hoja42.Range("B5") = ">"
Hoja42.Range("B6") = ">"
Hoja42.Range("B7") = ">"
Hoja42.Range("F3") = "Cargas externas
consideradas:"
Hoja42.Range("G5") = "Momento ="
Hoja42.Range("G6") = "Axial ="
Hoja42.Range("G7") = "Cortante ="
Hoja42.Range("H5") = Hoja11.Range("C6")
Hoja42.Range("H6") = Hoja11.Range("C7")
Hoja42.Range("H7") = Hoja11.Range("C8")
Hoja42.Range("I5") = "kg-m"
Hoja42.Range("I6") = "kg"
Hoja42.Range("I7") = "kg"
Hoja42.Range("B9") = "Según esbeltez del
elemento y características del suelo la mejor
opción es:"
Hoja42.Range("C11") = "Pilote tipo: " &
Hoja110.Range("J67")
Hoja42.Range("G5") = "Momento ="
Hoja42.Range("G6") = "Axial ="
Hoja42.Range("G7") = "Cortante ="
Hoja42.Range("H5") = Hoja110.Range("C92")
Hoja42.Range("H6") = Hoja110.Range("C89")
Hoja42.Range("H7") = Hoja110.Range("C88")
Hoja42.Range("I5") = "kg-m"
Hoja42.Range("I6") = "kg"
Hoja42.Range("I7") = "kg"
Hoja42.Range("B13") = "Dimensiones del
cimiento:"
Hoja42.Range("C15") = "L enterrada ="
Hoja42.Range("C16") = "Diámetro ="
Hoja42.Range("C17") = "L exenta ="
Hoja42.Range("D15") =
Hoja110.Range("C100")
Hoja42.Range("D16") = Hoja110.Range("C93")
Hoja42.Range("D17") = Hoja110.Range("C99")
Hoja42.Range("E15") = "m"
Hoja42.Range("E16") = "m"
Hoja42.Range("E17") = "m"
Hoja42.Range("F13") = "Otras características:"
Hoja42.Range("G15") = "Número de estratos ="

```

```

Hoja42.Range("G16") = "¿Cómo resiste la
carga?"
If Hoja110.Range("AN260") = 1 Then
Hoja42.Range("G17") =
Hoja110.Range("AO260")
Elseif Hoja110.Range("AN260") = 2 Then
Hoja42.Range("G17") =
Hoja110.Range("AO261")
Else
Hoja42.Range("G17") =
Hoja110.Range("AO262")
End If
Hoja42.Range("I15") = Hoja110.Range("J271")
Hoja42.Range("B19") = "Parámetros
analizados:"
Hoja42.Range("C21") = "Situación de rotura:"
Hoja42.Range("C22") = "Estabilidad
estructural:"
Hoja42.Range("C23") = "Análisis de capacidad
por:"
If Hoja110.Range("BA328") = 1 Then
Hoja42.Range("G23") = "Resistencia última"
Else
Hoja42.Range("G23") = "Esfuerzos de trabajo"
End If
Hoja42.Range("C24") = "Capacidad a
compresión:"
Hoja42.Range("C25") = "Capacidad a tensión:"
Hoja42.Range("C26") = "Momento máximo de
servicio ="
Hoja42.Range("G21") =
Hoja110.Range("G186")
Hoja42.Range("G22") =
Hoja110.Range("H261")
Hoja42.Range("G24") = Hoja110.Range("J371")
Hoja42.Range("G25") = Hoja110.Range("J372")
Hoja42.Range("F26") = Hoja110.Range("C130")
Hoja42.Range("G26") = "kg-m"
Hoja42.Range("B28") = "La representación
general para este cimiento es:"
Hoja42.Range("B49") = "Fricción negativa por
estratos:"
Hoja42.Range("F49") = "Estratos que aportan
fricción:"
aviso = MsgBox("El reporte se creó de manera
exitosa", vbInformation, "Paso siguiente...")
End Sub

```

# Anexos

## Algoritmos de complemento para interpolación

```
Sub Functions_Set()
    Dim FunArray, i&
    Dim DLLPath As String
    DLLPath = ThisWorkbook.Path &
"\Interpolacion.dll"
    If Dir(DLLPath) = "" Then
        MsgBox "Antes de usar Interpolacion.xla, hay
que copiar Interpolacion.dll " & _
vbLf & "en el mismo directorio.", vbOKOnly
+ vbExclamation, "Interpolacion"
        Exit Sub
    End If
    Application.RegisterXLL ThisWorkbook.Path &
"\Interpolacion.dll"
    With shFunctions
        r1 = .Range("a1").CurrentRegion.Rows.Count
        c1 = .Range("a1").CurrentRegion.Columns.Count
        FunArray = .Range(.Cells(2, 1), .Cells(r1,
c1))
        'set the dynamic help path
        For i = 1 To UBound(FunArray)
            If FunArray(i, 5) <> "" Then
                FunArray(i, 5) = ThisWorkbook.Path +
"\\" + FunArray(i, 5)
            End If
        Next
        'call the FunCustomize.dll written by Laurent
Longre. Thanks Laurent
        Run [FunCustomize], ThisWorkbook.Name,
FunArray
    End With
    Application.SendKeys "%^{F9}"
End Sub

Sub SetHelpFile()
MyHelpFile = ThisWorkbook.Path + "\\" +
"Interpolacion.hlp"
```

```
'ThisWorkbook.VBProject.HelpFile = MyHelpFile
'doesn't work anymore in Excel XP (fine,
Microsoft!)
MacroSetHelpfile
End Sub
```

```
Sub Dummy()
'questa macro non fa niente. Serve solo per il file
di help
End Sub
```

```
Private Sub MacroSetHelpfile()
'TIPS: Installa il file di Help assegnandolo ad una
qualunque macro
    N = Workbooks.Count
    'Excel si arrabbia se non trova almeno un
workbook attivo !!!
    If N = 0 Then Workbooks.Add
        macro_file = ThisWorkbook.Name
        macro_name = macro_file + "!" + "Dummy"
        macro_help = ThisWorkbook.Path + "\\" +
"Interpolacion.hlp"
        macro_helpID = 0
    On Error Resume Next
        Application.MacroOptions
        Macro:=macro_name, Description:=macro_desc,
-
        HelpFile:=macro_help,
        HelpContextID:=macro_helpID

    If Err <> 0 Then
        err1 = Err.Description
        ThisWorkbook.VBProject.HelpFile =
macro_help
        If Err <> 0 Then
            err1 = err1 + "; " + Err.Description
            WriteDebugFile err1
            MsgBox "Archivo de ayuda
Interpolacion.hlp no instalado", vbInformation,
"Interpolacion.xla"
        End If
    End If

    If N = 0 Then ActiveWorkbook.Close
```

End Sub

Close #1

End Sub

Private Sub WriteDebugFile(error\_1)

'create the debug installation file

'13.11.03

Filename = "Interpolacion\_debug.log"

fullfilelog = ThisWorkbook.Path + "\" + Filename

Open fullfilelog For Output As #1

Print #1, "Interpolacion.xla directory: ",

ThisWorkbook.Path

Print #1, "Excel directory: ", Application.Path

Print #1, "Excel version: ", Application.Version

Print #1, "Error: ", error\_1

# Referencias

Jiménez, J. 1996. **GEOTECNIA Y CIMIENTOS III: CIMIENTACIONES, EXCAVACIONES Y APLICACIONES DE LA GEOTÉCNIA (PARTE 1)**. Madrid, España: Editorial Rueda. 161-485p.

Asociación Costarricense de Geotecnia (ACG). 2009. **CÓDIGO DE CIMIENTACIONES DE COSTA RICA, 2<sup>ND</sup>A EDICIÓN**. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica. 176p.

Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA). 2003. **CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA, 3<sup>ERA</sup> EDICIÓN**. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica. 288p.

Braja, D. 2001. **FUNDAMENTOS DE INGENIERIA GEOTECNICA**. International Thomson Editors. 4<sup>ta</sup> Edición. 594p.

Fournier, R. 2009. **APUNTES DE CLASE DE MECANICA DE SUELOS I**. Mecánica de Suelos I. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Ramírez, O. 2010. **APUNTES DE CLASE DE GEOLOGÍA APLICADA**. Geología Aplicada. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Rojas, G. 2010. **DESI: HOJA ELECTRÓNICA PARA ESTIMAR LA DEMANDA SÍSMICA**. Estructuras de Acero. Instituto Tecnológico de Costa Rica.