



**GERDAU**  
**CORSA**  
El futuro se moldea



## ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE ACERO DE SECCIÓN IR EN MÉXICO

Gerdau Corsa. El futuro se moldea.

[gerdaucorsa.com.mx](http://gerdaucorsa.com.mx)



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**

Unidad Azcapotzalco

**DIVISIÓN DE CIENCIAS  
BÁSICAS E INGENIERÍA**

**POSGRADO EN INGENIERÍA  
ESTRUCTURAL**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD  
DE PILOTES DE ACERO  
DE SECCIÓN IR EN MÉXICO**

INFORME DE INVESTIGACIÓN

**Dr. Luciano Fernández Sola  
Dr. Tiziano Perea Olvera  
Ing. Joaquín Francisco Tirado  
Pérez**

Septiembre - 2015





# ÍNDICE

## Índice de figuras

## Índice de tablas

### 1 Introducción

### 2 Definiciones fundamentales de las cimentaciones profundas

#### 2.1 Clasificación de las cimentaciones profundas

2.1.1 *Clasificación de acuerdo al material principal con el que se fabricó (Bowles 1988, Tamez 2001)*

2.1.2 *Clasificación de acuerdo al mecanismo de transferencia de carga (Tamez 2001)*

### 3 Conceptos fundamentales de la capacidad de carga

#### 3.1 Capacidad de carga de pilotes individuales

3.1.1 *Capacidad de carga por punta*

3.1.2 *Capacidad de carga por fricción*

3.1.3 *Efecto de grupo*

### 4 Antecedentes históricos del uso de pilotes en México

### 5 Pilotes de acero de sección I

#### 5.1 Características estructurales

#### 5.2 Características Geotécnicas

#### 5.3 Desventajas

### 6 Ejemplos Ilustrativos de Pilotes Individuales

#### 6.1 Capacidad de carga de un pilote en suelo cohesivo

6.1.1 *Pilote cuadrado de concreto de sección transversal de 0.4 x 0.4 m*

6.1.2 *Pilote de acero de Sección IR 305A~86.1 kgf/m*

#### 6.2 Capacidad de carga en suelo friccionante

6.2.1 *Pilote de sección maciza cuadrada de concreto de 0.3 x 0.3 m.*

6.2.2 *Pilote de acero*

#### 6.3 Comparación y conclusión de los resultados obtenidos para pilotes individuales

### 7 Ejemplo del diseño de la cimentación de un edificio

#### 7.1 Diseño en suelo cohesivo

7.1.1 *Solución con pilotes de concreto de sección maciza cuadrada de 0.55 x 0.55 m*

7.1.2 *Solución con pilotes de acero de sección I*

#### 7.2 Diseño en suelo friccionante

7.2.1 *Solución con pilotes de concreto de sección cuadrada maciza de 0.55 x 0.55 m*

7.2.2 *Solución con pilotes de acero de sección I*

#### 7.3 Comparación y conclusión de los resultados obtenidos del diseño de la cimentación de una edificación

7.3.1 *Cimentaciones en suelos cohesivos*

7.3.2 *Cimentaciones en suelos friccionantes*

### 8 Corrosión

#### 8.1 Introducción

#### 8.2 Corrosión atmosférica

#### 8.3 Estudios previos sobre corrosión en pilotes

#### 8.4 Corrosión de pilotes de acero enterrados en el suelo

#### 8.5 Acciones para la protección de pilotes de acero a la corrosión

8.5.1 *Sobredimensionamiento*

8.5.2 *Uso de acero de alta resistencia*

8.5.3 *Recubrimientos*

8.5.4 *Protección catódica*

#### 8.6 Normatividad

### 9 Comentarios adicionales acerca de la superficie de falla

### 10 Referencias





## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 3.1** Mecanismo de Transferencia de carga, en donde están los elementos para el cálculo de la capacidad de carga por fricción y por capacidad de punta del pilote. (Bowles 1988)

**Figura 3.2** Grafica para obtener la profundidad crítica (Tamez 2001)

**Figura 3.3** Valores de  $\alpha$  para estratos superiores que contengan arena o grava arenosa y debajo de estos se tenga arcilla firme (Adaptado de Budhu 2008)

**Figura 3.4** Valores de  $\alpha$  para estratos superiores donde se tenga arcilla suave y debajo de esta arcilla firme (Adaptado de Budhu 2008)

**Figura 3.5** Valores de  $\alpha$  para estratos donde solo se tenga Arcilla firme (Adaptado de Budhu 2008)

**Figura 3.6** Relación entre el factor  $a$  y el esfuerzo cortante no drenado (Bowles 1988)

**Figura 3.7** Distintos arreglos de grupos de pilotes (Budhu 2008)

**Figura 3.8** Losa de cimentación en contacto y por encima de la superficie del terreno (Budhu 2008)

**Figura 3.9** Falla de bloque del grupo de pilotes

**Figura 6.1** Pilote en suelo cohesivo (Das 2001)

**Figura 6.2** Variación de  $\lambda$  con la longitud de empotramiento del pilote. (Das 2001)

**Figura 7.1** Distribución del grupo de pilotes de concreto en suelo cohesivo

**Figura 7.2** Grafica para determinar el factor  $N^*c$ . (Das 2001)

**Figura 7.3** Distribución de pilotes de acero de sección I en suelo cohesivo

**Figura 7.4** Distribución de pilotes de concreto en suelo friccionante

**Figura 7.5** Distribución de pilotes de acero de sección I en suelo friccionante

**Figura 8.1** Proceso de reacciones de oxidación-reducción (nervion.com.mx)

**Figura 8.2** Mapa de corrosión atmosférica en México (costacool.mx)

**Figura 8.3** Mapa de corrosión anual del acero al carbono para México (Mariaca et al. 1999)

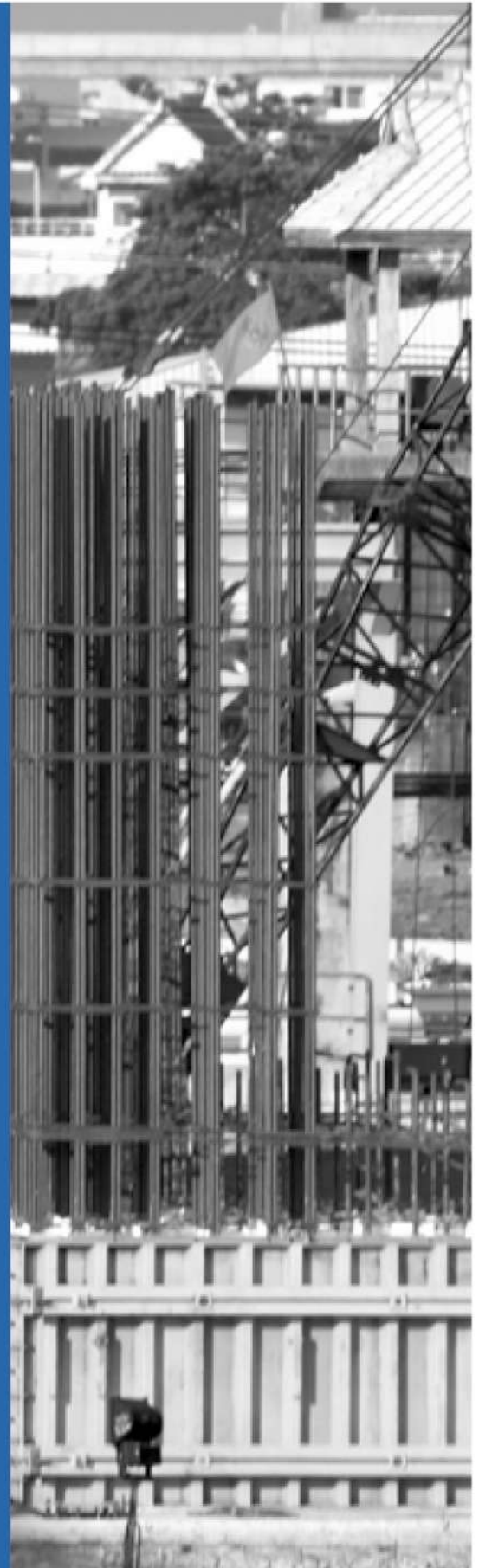
**Figura 9.1** Superficies de falla potenciales

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 3.1** Valores de  $\phi'_i$ , dependiendo del material del pilote (Budhu 2008)

**Tabla 8.1** Espesores de sacrificio sugeridos por el EC3 (2002) para pilotes enterrados en el suelo

**Tabla 9.1** Relaciones entre  $C_{eq}Cl$  para algunos perfiles I comunes para el uso en pilotes



# INTRODUCCION

En nuestro medio, las cimentaciones profundas (pilas, cajones, etc.) se suelen reservar para situaciones muy especiales (puentes, grandes edificios, muelles etc.); no es común por lo tanto el uso de pilotes para otras aplicaciones menores. La razón de esto suele ser en primer lugar el factor económico, pues es normal pensar en grandes equipos e infraestructura, y por consiguiente grandes inversiones importantes. En segundo lugar los métodos de cálculo, tanto geotécnico como estructural, han sido y siguen teniendo un nivel relativamente alto de incertidumbre; la bibliografía existente está basada generalmente en libros de Geotecnia, ya que los libros de estructuras tocan el tema de forma superficial (Bowles 1988). Es por ello que las tendencias actuales de la estimación de la capacidad de carga en cimentaciones profundas está orientándose al uso de pruebas de carga para determinar la capacidad de este tipo de cimentaciones. Sin embargo, se puede encontrar en la práctica diseños típicos que se repiten una y otra vez, dejando de lado la ciencia que conlleva a una optimización y diseño eficiente de los pilotes (Bowles 1988).

A medida que el desarrollo industrial y la explosión demográfica aumentan, se crea una demanda de estructuras pesadas en lugares de terreno blando; surge entonces el pilote de concreto como una solución que supera largamente al pilote de madera, debido a que podía ser fabricado en unidades de las mismas dimensiones que el pilote hecho de madera, pero capaz de soportar compresiones y tensiones mucho mayores. Además que puede moldearse en cualquier forma estructural de acuerdo a las solicitaciones de carga y del tipo de suelo sobre el que se hinca. Con el desarrollo de las máquinas de gran eficiencia de perforación a gran profundidad y diámetro, se reemplazó parcialmente los pilotes hincados por los pilotes moldeados in-situ (Bowles 1988).

Adicionalmente, en los últimos años en algunos países, se ha introducido de manera cada vez más común el uso de perfiles o tubos de acero como elementos para cimentaciones profundas, ya que presentan algunas ventajas tanto en el comportamiento como en los procesos constructivos sobre los elementos de concreto.













## DEFINICIONES FUNDAMENTALES DE LAS CIMENTACIONES PROFUNDAS

Las cimentaciones profundas corresponden a aquellas que se utilizan cuando el área disponible de transferencia de carga o la capacidad del terreno superficial no son suficientes para poder resistir de manera adecuada una transferencia directa de carga. En estos casos, se suelen introducir elementos de cimentación esbeltos con el propósito ya sea de transmitir las cargas de estructuras pesadas a estratos profundos de suelos duros o rocas, que presentan alta capacidad de carga y baja compresibilidad, los cuales subyacen en estratos de arcillas blandas, o depósitos de limos o arenas o de incrementar la superficie de transferencia de carga, caso en el que la capacidad del pilote dependerá de la adherencia y de la fricción que este con el suelo que lo rodea (Tamez 2001).

En general se puede definir que las cimentaciones por pilotaje se utilizan cuando sucede alguna de las siguientes condiciones (Tamez 2001):


-  **El estrato o estratos superiores son altamente compresibles y débiles para soportar la carga transmitida por la superestructura.**
-  **Se quieren reducir o limitar los asentamientos en las edificaciones.**
-  **La permeabilidad u otras condiciones del terreno no son adecuadas.**
-  **Las cargas son muy fuertes o concentradas (como columnas).**
-  **Existe peligro inminente de licuación de suelos presencia de arenas sueltas y nivel freático alto).**
-  **Presencia de fuerzas laterales o de levantamiento.**


El uso de cimentaciones profundas es el método más antiguo del hombre para superar las dificultades de las cimentaciones de suelos blandos. A pesar de que se remonta a los suelos lacustres prehistóricos, hasta finales del siglo XIX, el diseño de este tipo de cimentación se basaba totalmente en la experiencia.


Las cimentaciones profundas constan principalmente de elementos estructurales de gran esbeltez, que soportan cargas axiales y laterales, y los cuales pueden sufrir cierta flexión, aún estando rodeados del suelo en el cual se hincan o se construyen. A menudo se hincan en grupos o en filas, conteniendo cada uno (Das 2001). El tipo de elemento usado como sistema de cimentación depende del tipo de carga, de las condiciones del subsuelo, del nivel de agua presente en el suelo. Es por ello que las cimentaciones profundas pueden clasificarse de acuerdo a dos criterios primordialmente.

## 1.1 Clasificación de las cimentaciones profundas

### 1.1.1 Clasificación de acuerdo al material principal con el que se fabricó (Bowles 1988, Tamez 2001)

 **Pilotes de acero:** pilotes de sección H o I, pilotes de tubo, los pilotes de tubo se hincan en el terreno con sus extremos abiertos o cerrados. Las vigas de acero de patín ancho y de sección I, también se usan; sin embargo se prefieren los perfiles H porque los espesores de sus almas y patines son iguales.

 **Pilotes de concreto:** son elementos de concreto reforzado prefabricados, pilotes fabricados "in situ", su uso es común en la actualidad. Actualmente los pilotes pretensados son una buena alternativa, éstos tiene mayor resistencia en flexión y son consecuentemente menos susceptibles a dañarse durante su proceso de construcción. Los pilotes de concreto no toleran condiciones difíciles de hincado como los de acero, y tienen una mayor probabilidad de dañarse. Sin embargo, los pilotes de concreto son muy populares porque son más baratos que los pilotes de acero y su capacidad de carga es importante.

 **Pilotes de madera:** son troncos de árboles, cuya longitud varía entre 10 y 20 m, actualmente son poco usados. Los pilotes de madera no resisten altos esfuerzos al hincarse; por lo tanto, su capacidad se limita a aproximadamente 25 – 30 t. Se deben usar elementos de acero para evitar daños en la punta del pilote. La parte superior de los pilotes de madera también podría dañarse al ser hincados, para evitarlo se usa una banda metálica o un capuchón o cabezal. Los pilotes de madera permanecerán indefinidamente sin daño si están rodeados de suelo saturado. Sin embargo, en un ambiente marino, están sometidos al ataque de varios organismos y pueden ser dañados considerablemente en pocos meses. Cuando se localizan arriba del nivel freático, los pilotes son atacados por insectos. Su vida se incrementará tratándolos con preservadores como la creosota.



### 1.1.2 Clasificación de acuerdo al mecanismo de transferencia de carga (Tamez 2001)



**Pilote de fricción:** Los pilotes de fricción transmiten las cargas estructurales al suelo principalmente a lo largo de su superficie lateral o fuste. Se hincan en estratos con características mecánicas pobres, sin que su punta se apoye en las capas resistentes subyacentes. Se emplean normalmente cuando el estrato superficial blando tiene un gran espesor que hace antieconómico usar pilotes de punta o cuando la consolidación de éste estrato induce fricción negativa sobre los pilotes de punta y provoca su emersión. Esta última condición es común en la zona lacustre de la Ciudad de México donde se presenta un fuerte hundimiento regional. Para que el mecanismo de transferencia de carga por fricción se desarrolle, debe existir movimiento relativo del pilote respecto a la masa de suelo.



**Pilotes de punta o pila:** Cuando el elemento debe alcanzar un estrato de apoyo de resistencia considerable (ya sea estratos rocosos o estratos duros) en comparación a los estratos superiores y la transferencia de carga es esencialmente mediante el contacto directo de la punta con el estrato resistente.



## CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA CAPACIDAD DE CARGA

La capacidad de carga de las cimentaciones, depende de los parámetros de resistencia de la masa de suelo. A continuación se mencionaran aspectos geotécnicos necesarios para el estudio básico de la capacidad de carga de cimentaciones profundas.

En primer lugar, por la manera en que resisten los esfuerzos cortantes los suelos se suelen clasificar en dos tipos:



**Suelos cohesivos.** Son suelos cuyas partículas son tan pequeñas que las fuerzas de atracción entre sus partículas (cohesión) son mayores que las fuerzas de gravedad sobre las mismas. Este tipo de suelos tienen un comportamiento similar al de la plastilina en donde la resistencia al esfuerzo cortante está dado por sus propiedades internas y se ve poco afectada por los esfuerzos a los que esté sometido.



**Suelos friccionantes.** Son los suelos en los cuales por el gran tamaño de sus partículas, las fuerzas de gravedad son mayores que las fuerzas de atracción entre ellas (cohesión) por lo que la resistencia al esfuerzo cortante está dada por las fuerzas de fricción que se desarrollen entre las superficies de las mismas. Debido a que la fuerza de fricción depende de la fuerza normal, la resistencia al esfuerzo cortante de estos suelos depende del esfuerzo exterior al que esté sometida la masa de suelo.

En la realidad se ha observado que casi ningún suelo presenta exclusivamente un solo mecanismo de transferencia de esfuerzo cortante, sino que en la mayoría de los suelos son en cierta medida cohesivo-friccionantes. Es por esto, que la capacidad resistente de la masa de suelo suele definirse por medio de dos parámetros fundamentales:



**Ángulo de fricción interna.** En las partículas de suelo de gran tamaño (gravas y arenas) las fuerzas de inercia son mucho mayores que los enlaces electromagnéticos, por lo que la resistencia de estos suelos queda definida por las fuerzas de fricción que se pueden desarrollar entre sus superficies.



**Cohesión.** La cohesión es una propiedad de los materiales que define la capacidad de sus moléculas para permanecer unida debido a las fuerzas electromagnéticas que se presentan entre ellas. En las partículas de suelo muy pequeñas (limos y arcillas), las fuerzas de cohesión entre ellas son mucho mayores que las fuerzas de inercia que produce la gravedad debido a sus masas tan pequeñas.



### 3.1 Capacidad de carga de pilotes individuales

La capacidad de carga última toma en cuenta dos partes (figura 3.1), la capacidad de carga que aporta la punta el pilote ( $Q_p$ ). La otra es la fricción, llamada capacidad de carga por fricción, la cual se transmite por el fuste del pilote ( $Q_f$ ). En el cálculo de la capacidad de carga en algunos casos se considera el peso del pilote  $W_p$ , como carga actuante sobre el pilote. (Bowles 1988).

Figura 3.1

$$Q_{net} = Q_f + Q_p - W_p$$

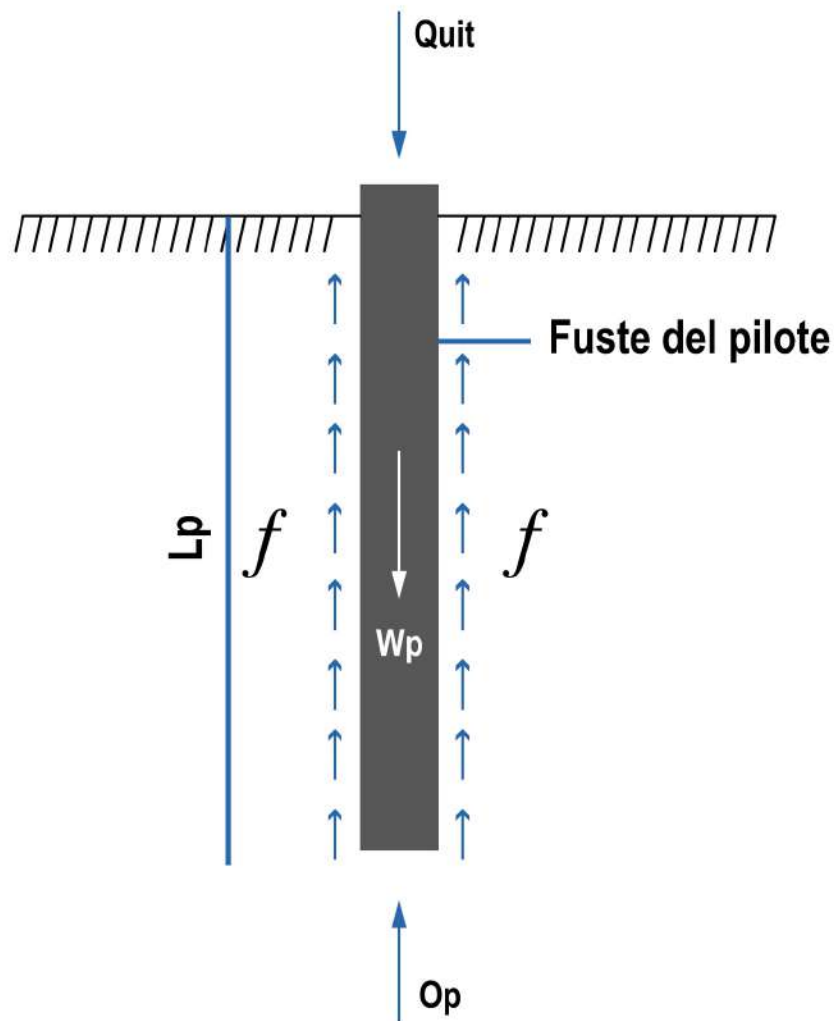


Figura 3.1— Mecanismo de Transferencia de carga, en donde están los elementos para el cálculo de la capacidad de carga por fricción y por capacidad de punta del pilote. (Bowles 1988)

### 3.1.1. Capacidad de carga por punta

Si los estudios geotécnicos establecen la presencia de un lecho rocoso a una profundidad razonable, los pilotes se prolongan hasta la superficie de la roca o donde se encuentre un estrato de suelo bastante compacto y duro. Para estos pilotes la capacidad del pilote depende primordialmente de la capacidad del material de apoyo.

Para el cálculo de la capacidad de carga de pilotes de punta existen muy diversos métodos, tanto experimentales como analíticos. En el presente trabajo se utilizarán dos expresiones analíticas, una para el cálculo de la resistencia de pilotes en suelos cohesivos y otro para suelos friccionantes.

Como ya se ha comentado, la resistencia al esfuerzo cortante en suelo friccionantes depende del nivel de esfuerzo de confinamiento al que esté sometido. Es por ello que en el cálculo de la capacidad de carga por punta en suelos friccionantes, la capacidad es función del esfuerzo de confinamiento, que a su vez depende de la presión  $P'_b$ , por lo que la capacidad de carga queda expresada por la ecuación 3.2.

Figura 3.2

$$Q_p = P'_b * N_q * A_p$$

**Donde:**

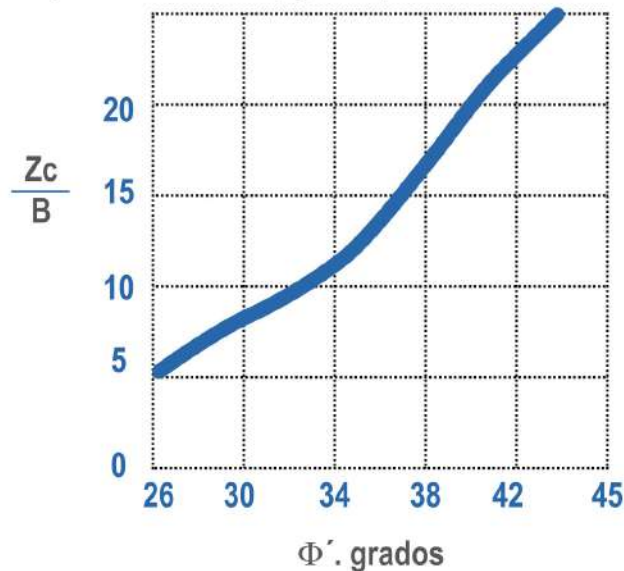
$P'_b$  Presión vertical efectiva al nivel de la punta del pilote ( $P'_b = \gamma * z_c$ )

$\gamma$  Peso volumétrico efectivo del suelo

$N_q$  Factor de capacidad de carga

$A_p$  Área de la base del pilote en estudio

$Z_c$  Profundidad crítica hasta la que debe considerarse el incremento del esfuerzo de confinamiento y está en función del ángulo de fricción interna (figura 3.2).



a) Profundidad crítica  $Z_c$

Figura 3.2— Gráfica para obtener la profundidad crítica (Tamez 2001).

Por otra parte, para el caso de suelos puramente cohesivos, la resistencia al esfuerzo cortante es casi independiente del valor del esfuerzo de confinamiento, por lo que la capacidad por punta puede expresarse por medio de la ecuación 3.3.

Figura 3.3

$$Q_p = 9 * c_u * A_p$$

**Donde:**

$c_u$  Cohesión no drenada

$A_p$  Área de la base del pilote en estudio.





### 3.1.2 Capacidad de carga por fricción




En mayoría de los casos la capacidad de carga por fricción es la que aporta la mayor capacidad de carga en elementos de sección transversal pequeña (pilotes), aunque éste sea diseñado para que trabaje principalmente por punta. La capacidad de carga por fricción, depende fundamentalmente de la adherencia que exista entre el material del pilote y el suelo. La definición de esta adherencia ha sido sujeto de muchos estudios, y existen muy diversos acercamientos y teorías al respecto. Entre las teorías analíticas más aceptadas se encuentran los denominados métodos  $\alpha$  y  $\beta$ .

#### 3.1.2.1 Método $\alpha$

El método  $\alpha$  está basado en un análisis de esfuerzos totales (análisis de falla a corto plazo), lo que significa que no se permite la disipación de la presión de poro (presión ejercida por el agua entre las partículas de suelo) de la muestra lo que da, que el esfuerzo cortante del suelo queda definido por la resistencia no drenada.

Este método es útil para estimar la capacidad de carga a corto plazo de pilotes hincados en suelos de grano fino. En este método, el coeficiente  $\alpha$  es usado en relación a la resistencia al esfuerzo cortante no drenada del suelo  $s_u$ , que para el caso de suelos puramente cohesivos corresponde al valor de la cohesión no drenada  $c_u$  respecto a la adherencia del esfuerzo a lo largo del fuste del pilote. El valor del coeficiente  $\alpha$  disminuye conforme aumenta la rigidez de la arcilla, lo liso de la superficie del pilote, y para pilotes metálicos; esos valores van de 1.0 para arcillas muy blandas a 0.2 en arcillas muy duras (Tomlinson 1987). La capacidad de carga por fricción es el producto del área del fuste por el factor  $\alpha$  y por el esfuerzo cortante no drenado (Budhu 2008).

El valor de  $\alpha$  a utilizar para determinar la capacidad de carga de los pilotes es un tema de mucho debate y prueba. La mayoría de las pruebas para determinar el valor de  $\alpha$  son pruebas de laboratorio sobre modelo de pilotes instalados en un depósito uniforme del suelo (Budhu 2008). Los principales problemas con estas pruebas de laboratorio son:

-  **Es difícil ampliar los resultados de las pruebas modelo de laboratorio a pilotes reales.**
-  **Los suelos en el campo son en su mayoría no homogéneos en comparación con los suelos homogéneos cuidadosamente preparados en el laboratorio.**
-  **Durante el hincado influye fuertemente el valor de  $\alpha$  que no se puede duplicar con presión en el laboratorio.**

En general se prefieren las pruebas de campo a gran escala sobre pilotes reales, pero estas pruebas son caras y los resultados pueden aplicarse únicamente al sitio donde se realizan las pruebas. Los resultados de cono y el STP (Prueba de penetración estándar) se han relacionado con el valor de  $\alpha$ , pero estos se han encontrado vuelos de correlaciones estadísticas con bajo coeficiente de correlación (Budhu 2008).

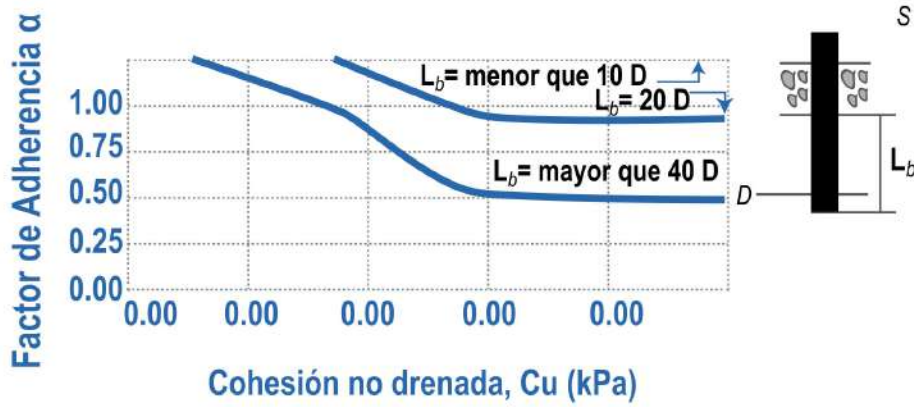


Figura 3.3 - Valores de  $\alpha$  para estratos superiores que contengan arena o grava arenosa y debajo de estos se tenga arcilla firme (Adaptado de Budhu 2008)

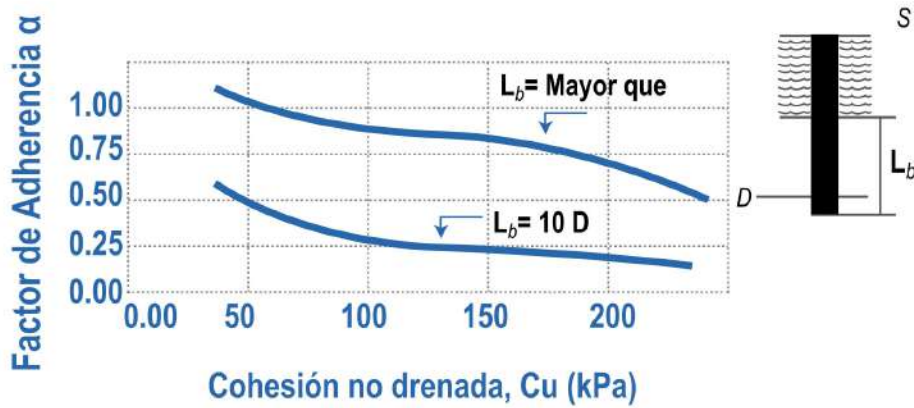


Figura 3.4 - Valores de  $\alpha$  para estratos superiores donde se tenga arcilla suave y debajo de esta arcilla firme (Adaptado de Budhu 2008)

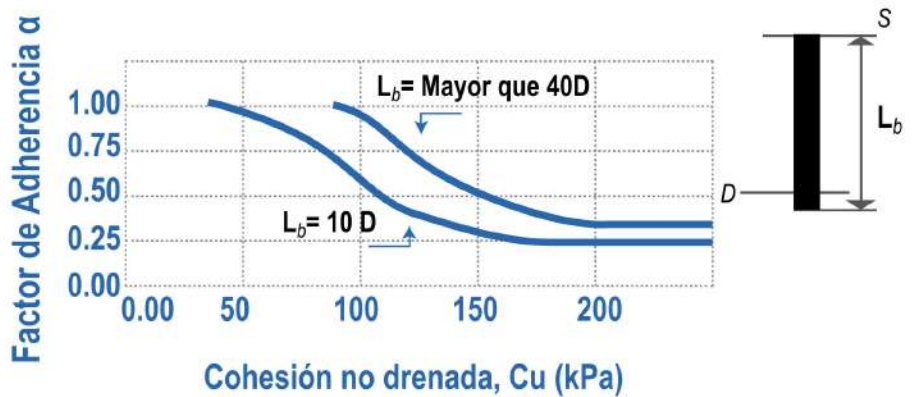


Figura 3.5— Valores de  $\alpha$  para estratos donde solo se tenga Arcilla firme (Adaptado de Budhu 2008)





En las gráficas de las figuras 3.3-3.5 se muestran valores para  $\alpha$  dados por Tomlinson (1987) para distintas condiciones de suelo, en función de la cohesión de las arcillas. Bowles (1988) presenta también una gráfica comparativa de los valores del factor  $\alpha$  propuestos en distintos trabajos, para estratos homogéneos de arcilla (figura 3.6).

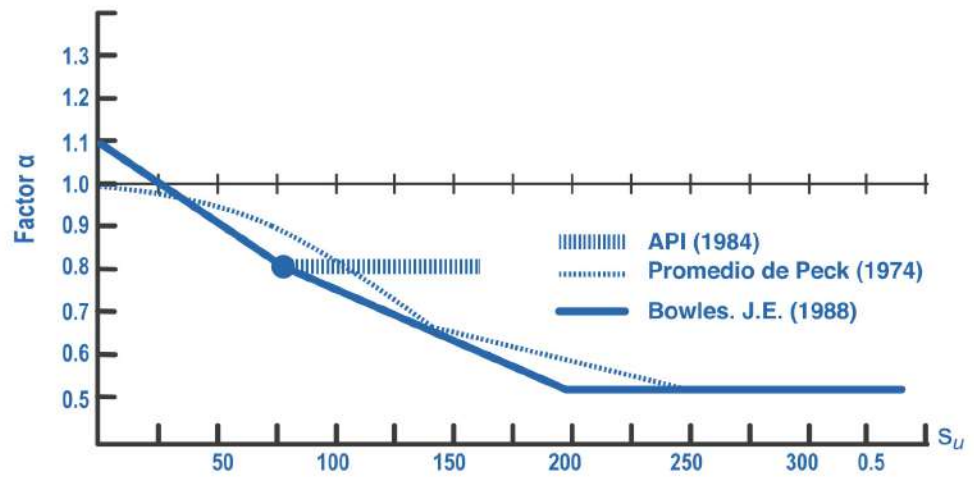


Figura 3.6— Relación entre el factor  $\alpha$  y el esfuerzo cortante no drenado (Bowles 1988)

### 3.1.2.2 Método $\beta$

El método  $\beta$  está basado en un análisis de esfuerzos efectivos y se usa para realizar análisis a corto plazo, y la capacidad de carga del pilote a largo plazo de los suelos de grano grueso y capacidad de carga de pilotes a largo plazo en suelos de grano fino. La fricción a lo largo del fuste ( $f_s$ ) se determina usando la ley de fricción de Coulomb, donde la resistencia por fricción está dada por un coeficiente de fricción y por la presión lateral efectiva del suelo ( $p_l$ ) como se muestra en la ecuación 3.4. La presión lateral efectiva es proporcional a la presión vertical efectiva ( $p_v$ ) multiplicada por el coeficiente de presión lateral de la tierra ( $K_0$ ).

Figura 3.4

$$f_s = p_l \tan(\Phi) = K_0 p_v \tan(\Phi) = \beta p_v$$

El valor de  $\beta$  (propuesto originalmente por Burland en 1973), al igual que los valores del factor  $\alpha$  es también un tema de muchos debates, especialmente para suelos de grano grueso. Una de las razones para estos debates es la correlación de  $\beta$  con valores no definidos del ángulo de fricción interna.

Los intervalos típicos de los valores para el ángulo de fricción interna efectivo de cada estrato ( $\phi'_i$ ) se dan en la siguiente tabla, mientras que la presión efectiva vertical es calculada al centro de cada estrato que este en estudio (Budhu 2008).

MATERIAL	ACERO	CONCRETO	MADERA
$\Phi'_i$	$\frac{2}{3} \Phi'_{CS} \alpha 0.8 \Phi'_{CS}$	$0.9 \Phi'_{CS} \alpha \Phi'_{CS}$	$0.8 \Phi'_{CS} \alpha \Phi'_{CS}$

Tabla 3.1 - Valores de  $\phi'_i$ , dependiendo del material del pilote (Budhu 2008)



En la mayoría de los casos, los pilotes se utilizan en grupos para transmitir la carga estructural al suelo. Uno de los problemas más complejos en la ingeniería de cimentaciones consiste en poder evaluar con exactitud la capacidad de carga de un grupo de pilotes o relacionarla con la de los pilotes aislados. En función de la distancia. Entre pilotes, una razonable hipótesis es que los esfuerzos transmitidos por el pilote al suelo se traslapen, reduciéndose así la capacidad individual de carga del pilote. La capacidad portante de un grupo de pilotes puede no ser igual a la suma de las capacidades portantes de todos los pilotes individuales en el grupo, por lo que debe considerarse el comportamiento del grupo como un todo. La experiencia ha demostrado que la resistencia de los pilotes en grupo es generalmente menor a la suma de las resistencias individuales de cada uno de ellos. Idealmente, los pilotes en un grupo deben espaciarse de manera que la capacidad de carga del grupo sea por lo menos igual que la suma de las capacidades individuales. (Budhu 2008)

Los grupos generalmente están dispuestos en patrones geométricos (cuadrados, rectángulos, círculos y octágonos) con una separación (distancia de centro a centro de pilote), no menos de  $2D$  (la recomendación de esta distancia mínima depende del autor), siendo  $D$  el ancho del pilote. Los pilotes están conectados en sus cabezas por una tapa de concreto reforzado, que no necesariamente debe estar en contacto con el suelo. Si ésta está en contacto del suelo, parte de la carga que está transfiriendo a los pilotes se transferirá directamente al suelo (Budhu 2008).

La capacidad de carga de un grupo de pilotes no es necesariamente igual al resultado de la suma de todas las capacidades de carga individuales de todos los pilotes del grupo. En los suelos de grano fino los pilotes exteriores tienden a llevar más carga que los pilotes del centro del grupo. En los suelos de grano grueso, los pilotes en el centro tienen que resistir mayor carga que los pilotes exteriores (Budhu 2008).

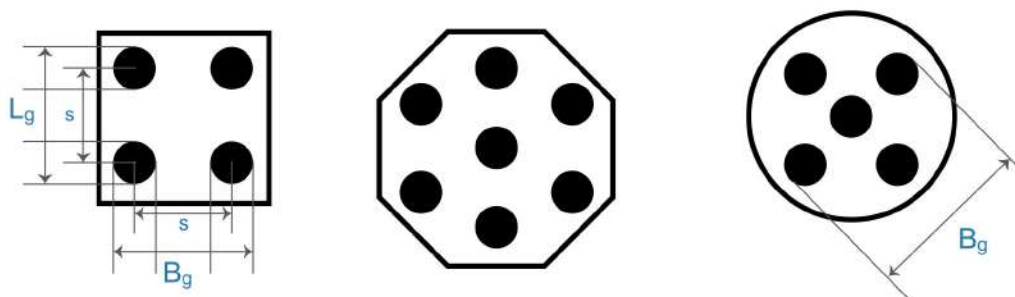


Figura 3.7 - Distintos arreglos de grupos de pilotes (Budhu 2008)

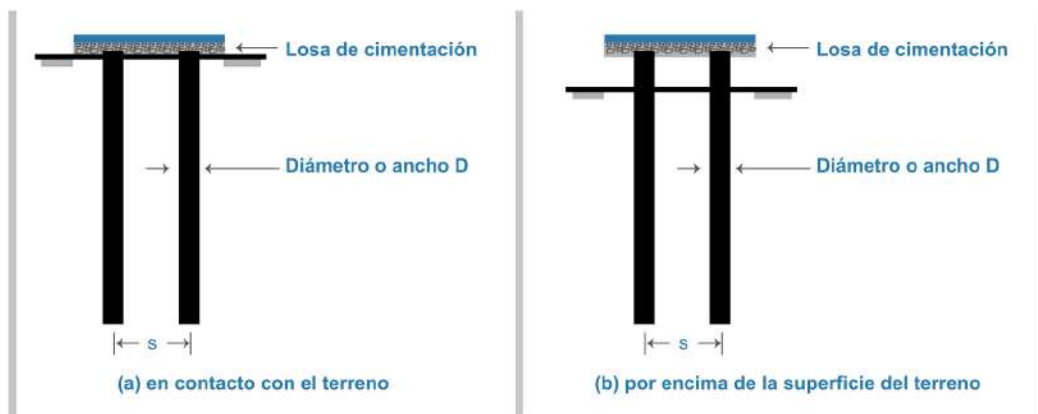


Figura 3.8 - Losa de cimentación en contacto y por encima de la superficie del terreno (Budhu 2008)

La relación entre la capacidad de carga de un grupo de pilotes y suma de las capacidades de carga individuales de todos los pilotes del grupo, se llama el factor de eficiencia  $\eta$ . Dos modos de falla normalmente del suelo se investigaron para determinar la capacidad de carga de un grupo de pilotes. Para determinar la capacidad de carga del grupo de pilotes se necesita realizar el cálculo de la capacidad de carga por punta del grupo, más la capacidad de carga por fricción.







### 3.1.3.1 Tipos de fallas en grupos de pilotes

#### Falla del grupo en bloque:

Este tipo de falla se produce cuando la separación entre los pilotes es lo suficientemente pequeña para hacer que el grupo de pilotes falle como si fuera una sola pila de perímetro equivalente al perímetro exterior del grupo (Budhu 2008).

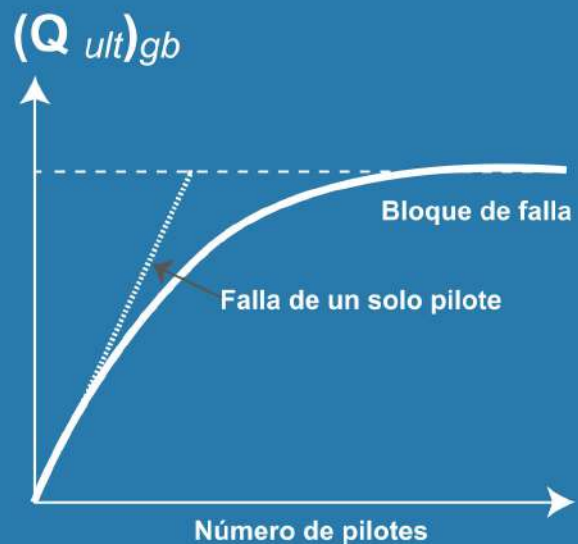
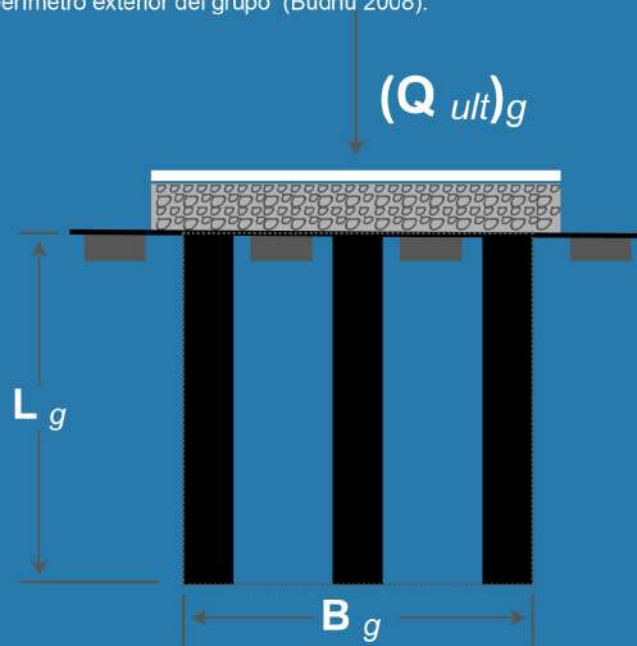


Figura 3.9 - Losa de cimentación en contacto y por encima de la superficie del terreno (Budhu 2008)

#### Falla por penetración:

Este tipo de falla se da cuando cada pilote aporta el total de su capacidad de carga, y por lo tanto, la capacidad de carga del grupo es la suma de las capacidades de carga individuales de cada pilote en el grupo; esto implica que el efecto de grupo deja de ser importante por la suficiente distancia centro-a-centro entre pilotes (Budhu 2008).



## ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL USO DE PILOTES EN MÉXICO



Actualmente en México ha crecido la construcción de edificios altos para distintos fines. Desde hace algunos años se ha visto un auge en la construcción de edificios para vivienda, debido a algunos cambios en las políticas públicas de los desarrollos de vivienda. Este fenómeno ha producido (y lo seguirá haciendo) que muchos predios dentro de la ciudad que alojaban casas estén cambiando su uso para construir edificios de departamentos. Su construcción conlleva un elevado número de entresijos así como excavaciones profundas para alojar sótanos de estacionamiento. Las solicitaciones sísmicas en la cimentación bajo tales condiciones requieren la construcción de cimentaciones profundas con pilas o pilotes que en algunos casos alcanzan los depósitos profundos. Si embargo, debido al proceso de hundimiento regional al que está sometido el suelo del valle de México, en muchas ocasiones el uso de pilotes de fricción se vuelve necesario. Este panorama exige que los procesos constructivos de las edificaciones (incluido el de las cimentaciones) sea lo menos invasivo posible para el entorno, ya que la mayoría de estos predios se encuentran en zona urbanas sumamente densas.

En la ciudad de México, en el área conocida como la zona de lago, es frecuente el empleo de cimentaciones compensadas combinadas con grupos de pilotes trabajando por fricción buscando con ello una reducción en los asentamientos esperados.



En la actualidad en México, existen edificios a los cuales la solución de sus cimentaciones es el uso de pilotes, como los siguientes:



### TORRE LATINOAMERICANA

Para la cual se necesitó 361 pilotes de concreto, hincados a una profundidad de 33 m. Para soportar el peso total del edificio de 24,100 toneladas.

<http://torrelatinoamericana.com.mx/historia/>



### TORRE PEMEX

Es uno de los tres edificios más altos de la ciudad de México. Esta torre tiene una cimentación compuesta de 164 pilas de concreto y acero que están hincadas a una profundidad de 32 metros superando el relleno pantanoso del antiguo lago, hasta llegar a un estrato firme.

[https://es.wikipedia.org/wiki/Torre\\_Ejecutiva\\_Pemex](https://es.wikipedia.org/wiki/Torre_Ejecutiva_Pemex)



### WORLD TRADE CENTER MÉXICO

Con una altura de 207.1m. Este edificio fue equipado con medidas muy estrictas de seguridad el cual incluyen 56 amortiguadores sísmicos y una cimentación compuesta por 232 pilotes de concreto que se hincaron a una profundidad de 45 metros.

[https://es.wikipedia.org/wiki/World\\_Trade\\_Center\\_Ciudad\\_de\\_M%C3%A9xico](https://es.wikipedia.org/wiki/World_Trade_Center_Ciudad_de_M%C3%A9xico)



### TORRE MAYOR

La cimentación consta de 252 pilotes de concreto y acero que están hincados a 60m para alcanzar estratos duros.

[https://es.wikipedia.org/wiki/Torre\\_Mayor](https://es.wikipedia.org/wiki/Torre_Mayor)



### TORRE HSBC

Con 136m la torres HSBC, es de los edificios más altos del paseo de la Reforma la cimentación la componen 127 pilotes de concreto y acero, que están hincados a una profundidad de 55 metros para lograr alcanzar estratos firmes.



### TORRE ALTUS

Es un edificio de 195m, su uso es residencial. El edificio tiene una cimentación compuesta de 100 pilotes de concreto que están hincados a 25m superando estratos blandos hasta llegar a un estrato firme.

<http://www.arqhys.com/>









### HOTEL RIU PLAZA GUADALAJARA

Es un hotel de 5 estrellas y es el hotel más alto de México ubicado en Guadalajara, para la cimentación se usaron 3 plantas de sótano y debajo de ella hay 113 pilotes de concreto a una profundidad de 10 y 15 metros.









# PILOTES DE ACERO DE SECCIÓN I

Para conocer si el uso de pilotes de acero de sección I o H, es factible, a continuación se muestran algunas características particulares de estos elementos, así como desventajas que tienen al usarlos.

## 5.1 Características estructurales


-  **La longitud necesaria del pilote** (según lo requiera el proyecto) puede llegar a fabricarse en una sola pieza. Aunque es recomendable que sea en sección decreciente, ya que el suelo toma parte del peso de la superestructura, lo cual hace que exista menor demanda del pilote conforme aumenta la profundidad de este. En pocas palabras, solo el precio y las condiciones de la maquinaria que se usara para hincar los pilotes serían limitantes en su longitud (Urbina 2004).
-  **Tienen alta capacidad ante las cargas laterales y las cargas axiales**, su capacidad para resistir las cargas laterales es superior al de concreto reforzado, es por esto que se busca su uso (Budhu 2008).
-  **Si se trata de pilotes continuos se podrían fabricar en una sola pieza**, esto dependiendo del proveedor, y si se trata de pilotes de sección transversal variable sus uniones serán más sencillas que si se tratara de pilotes de concreto reforzado, ya que sus empalmes se pueden hacer mediante pernos o soldadura, los cuales se pueden realizar en campo (Gerdau 2015).
-  **La penetración de los perfiles de acero en H es más fácil que otro tipo de pilotes**, principalmente porque el espesor de su alma y el de los patines son relativamente pequeños, desalojan poco material durante el hincado, y se producen desplazamientos y levantamientos pequeños, al igual que la presión lateral (Rojas 2015).
-  **El área de la sección transversal** es pequeña con una alta resistencia a la deformación (Rojas 2015).
-  **Pueden soportar cargas hasta el límite elástico del acero** (Rojas 2015).


## 5.2 Características Geotécnicas


-  **Mayor facilidad de manejo durante el hincado**, tienen mayor resistencia al ser golpeados por el martillo para su hincado, esto reduce la probabilidad de que los pilotes se fracturen al topar una costra dura durante su hincado (Gerdau 2015). Adicionalmente, tienen una alta resistencia trabajando de punta, son sumamente recomendables para atravesar capas duras de suelo o penetrar roca medianamente meteorizada. Pueden soportar cargas hasta el límite elástico del acero (Rojas 2015). Esta característica es sumamente importante en las zonas de transición del valle de México, en la cuál es común encontrar lentes de arena intercalados dentro de la serie arcillosa.
-  **Sobre el hincado de los pilotes de acero, al ser más fácil su hincado esto reduce las vibraciones**, lo cual es benéfico ya que éstas pueden ocasionar daños a las estructuras a instalaciones vecinas o el desplazamiento vertical y horizontal del suelo (Gerdau 2015).
-  **Puede haber una pequeña aceptación en la desviación de su vertical al hincar los pilotes** ya que no provocan daños severos, los pilotes de sección "H" son más fáciles que se desvíen que los de sección tubular (Rojas 2015).
-  **Si el pilote se apoya en estratos uniformes, la punta del pilote tomará las tensiones y las podrá redistribuir sin consecuencias en el pilote** (Gerdau 2015); esto también es posible en pilotes de concreto reforzado, los cuales deberán contar con suficiente armado de refuerzo para soportar dichas tensiones.
-  **La corrosión no es un problema grave, ya que con mayor profundidad que sea el oxígeno va desapareciendo, lo cual hace que la corrosión no sea un problema de gran consideración**. Aunque esto no evita que se deban de proteger de la corrosión como mínimo, la distancia que comprende de la cabeza del pilote y la máxima profundidad a la que se localice el nivel de aguas freáticas (Gerdau 2015).
-  **Suele usarse recubrimientos epóxicos para suelos corrosivos**. (Gerdau 2015)
-  **Tienen la gran ventaja que con tratamientos especiales se reduce el efecto de la fricción negativa** (Gerdau 2015). Uno de los procedimientos utilizados para reducir la fricción negativa es la introducción de una corriente eléctrica, del mismo modo que se hace para la protección catódica ante la corrosión. Este método se puede utilizar adicionalmente para reducir temporalmente la adherencia entre el pilote y el suelo (Bjerrum et al. 1969). Este mismo procedimiento puede ser utilizado para facilitar el hincado de este tipo de cimentaciones en suelos arcillosos.
-  **Esencialmente cuando se necesita un hincado violento porque existe algún estrato de alta dureza o costras**, cuando se necesita longitudes grandes para alcanzar estratos de gran capacidad de carga a grandes profundidades o cargas muy grandes, los pilotes de acero con sección H son una gran opción. (Grupo de Ingeniería Gráfica y Simulación 2015)




### 5.3 Desventajas

- 

Si la longitud tiene limitaciones, están pueden ser por el hincado, ya que a gran longitud es más fácil que se puedan desviar o torcer al encontrar piedras grandes, el suelo puede “atorarse” en las alas del perfil (Rojas 2015). Este “atoramiento” depende de las características del suelo y del esfuerzo de confinamiento y debe ser estudiada con mayor detalle.
- 

Según algunos autores (Rojas 2015) los pilotes H resisten por fricción, en planos paralelos al alma de la sección que pasa por las aristas exteriores de las alas y por fricción contra el metal en las caras exteriores de las alas. Sin embargo algunos otros estudios establecen que la resistencia de estos pilotes se desarrolla a lo largo de todo el perímetro. De igual manera que en el punto anterior, esta condición parece depender de las características del suelo y del esfuerzo de confinamiento y debe ser estudiada con mayor detalle.
- 

Los efectos de la corrosión pueden reducir el área de la sección transversal. para evitar estos efectos se es necesario aplicar revestimientos libres de solventes, formulado a base de resinas epóxicas y poliamínicos especiales, impermeable al agua dulce y a la salada, que posea gran resistencia mecánica a las sollicitaciones de abrasión e impacto. Como ya se ha comentado, este efecto está limitado a la sección más superficial del pilote únicamente, en la cuál existe la posibilidad de intercambio de oxígeno. La corrosión es común en los pilotes de acero, aunque el deterioro por la corrosión es usualmente insignificante si el pilote se encuentra hincado en una formación natural, pero si este se encuentra en algunos rellenos que contengan oxígeno atrapado puede ser intenso el daño por corrosión. Una opción para evitar los efectos de la corrosión en los casos donde el pilote no está totalmente enterrado, una buena defensa sería cubrir la parte expuesta con concreto. Para el caso de agua de mar o de suelos fuertemente ácidos se es necesario la protección catódica o la inyección de concreto. (Gerdau 2015)
- 

Si durante el hincado se presentan dificultades, ya sea porque el material donde se realiza el hincado presentan gravas gruesas o materiales parecidos pueden dañar los patines del pilote, es posible que el pilote se doble o tuerza. (Grupo de Ingeniería Gráfica y Simulación 2015).

## EJEMPLOS ILUSTRATIVOS DE PILOTES INDIVIDUALES

En esta sección se presentan dos ejemplos comparativos de la capacidad de carga de pilotes convencionales de concreto de sección maciza y de pilotes de acero de sección transversal I. El primer ejemplo es para el caso en el que el pilote está desplantado en un suelo cohesivo y el segundo corresponde al caso de un pilote desplantado en suelo friccionante.

### 6.1 Capacidad de carga de un pilote en suelo cohesivo

El primer ejemplo ilustrativo es tomado de Das (2001) y corresponde a una formación arcillosa constituida por dos estratos de diferentes espesores. El nivel de aguas freáticas está a la mitad de la profundidad del estrato superficial (figura 6.1). Se determina la capacidad de carga por punta, la capacidad de carga por fricción y la capacidad de carga admisible en el pilote. Los métodos de cálculo para la capacidad de carga son los indicados en la sección 2.

#### 6.1.1 Pilote cuadrado de concreto de sección transversal de 0.4 x 0.4 m

Se propone un pilote de sección maciza cuadrada de 0.4 m x 0.4 m y 30 m de longitud.

Características geométricas del pilote:

$$L_p = 30\text{m} \quad D = 0.4 \text{ m} \quad d = 0.4 \text{ m}$$

$$P_e = D * 2 + 2 * d = 1.6 \text{ m}$$

$$A_p = D * d = 0.16\text{m}^2$$

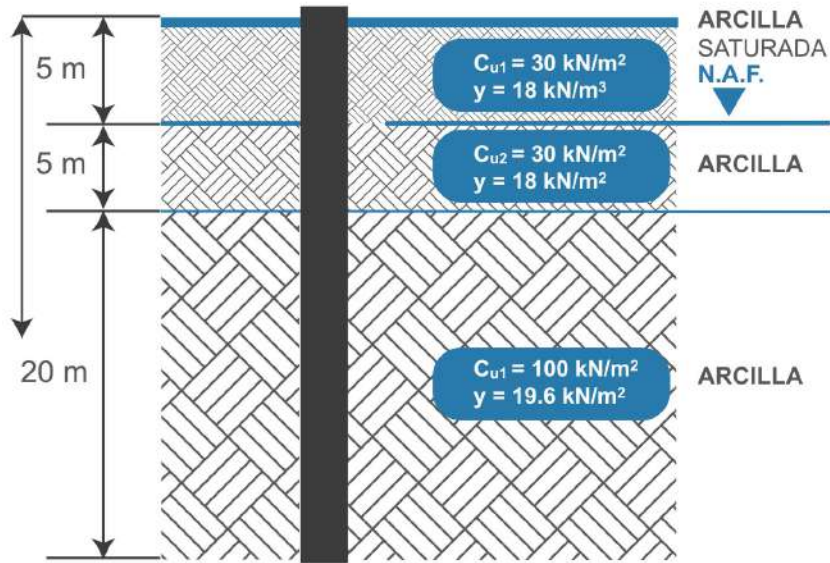


Figura 6.1 Pilote en suelo cohesivo (Das 2001).

Propiedades del suelo

Estrato 1	$\gamma_1 = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	$c_{u1} = 30 \text{ kPa}$	$z_1 = 5 \text{ m}$
Estrato 2	$\gamma_2 = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	$c_{u2} = 30 \text{ kPa}$	$z_2 = 5 \text{ m}$
Estrato 3	$\gamma_3 = 19.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	$c_{u3} = 100 \text{ kPa}$	$z_3 = 20 \text{ m}$

Cálculo del perfil de esfuerzos efectivos

Estrato 1	$\sigma_{o1} = \gamma_1 \cdot z_1 = 90,000 \text{ Pa}$
Estrato 2	$\sigma_{o2} = \sigma_{o1} + (\gamma_2 - 9.81 \text{ kN/m}^3) \cdot z_2 = 131,000 \text{ Pa}$
Estrato 3	$\sigma_{o3} = \sigma_{o2} + (\gamma_3 - 9.81 \text{ kN/m}^3) \cdot z_3 = 326,800 \text{ Pa}$

Capacidad de carga de punta

$N_c = 9$  para arcillas  
 $c_{u3} = 100,000 \text{ Pa}$  del estrato en contacto con la punta del pilote  
 $q_p = N_c \cdot c_{u3} = 900,000 \text{ Pa}$   
 $Q_p = A_p \cdot q_p = 144 \text{ kN}$

Capacidad de carga por fricción

Cálculo del área lateral del elemento en contacto con cada uno de los estratos.

$$p_e = 1.6 \text{ m}$$

$$\Delta L_1 = 10 \text{ m} \quad \Delta L_1 \cdot p_e = 16 \text{ m}^2$$

$$\Delta L_2 = 20 \text{ m} \quad \Delta L_2 \cdot p_e = 32 \text{ m}^2$$

$$\sum p \Delta L = \Delta L_1 \cdot p_e + \Delta L_2 \cdot p_e = 48 \text{ m}^2$$

Método del coeficiente  $\lambda$

Se obtiene el valor del coeficiente  $\lambda$  de la gráfica de la figura 6.2, tomando en cuenta una  $L = 30 \text{ m}$ .

$L_p = 30 \text{ m} \quad \lambda = 0.14$

$\sigma_{0prom1} = (0 + \sigma_{o1}) / 2 = 45,00 \text{ Pa}$

$\sigma_{0prom2} = (\sigma_{o1} + \sigma_{o2}) / 2 = 110,500 \text{ Pa}$

$\sigma_{0prom3} = (\sigma_{o2} + \sigma_{o3}) / 2 = 228,900 \text{ Pa}$

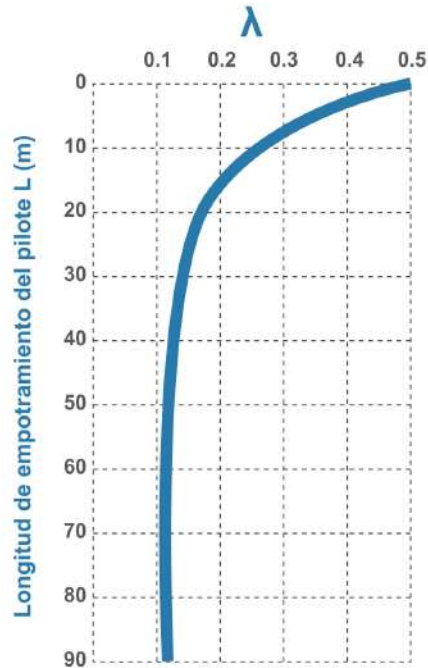
$\sigma_{0prom} = \frac{(\sigma_{0prom1} \cdot z_1) + (\sigma_{0prom2} \cdot z_2) + (\sigma_{0prom3} \cdot z_3)}{z_1 + z_2 + z_3} = 178,500 \text{ Pa}$

$c_u = \frac{(c_{u1} \cdot z_1) + (c_{u2} \cdot z_2) + (c_{u3} \cdot z_3)}{z_1 + z_2 + z_3} = 76,670 \text{ Pa}$

$f = \lambda (\sigma_{0prom} \cdot z_1 + 2 \cdot c_u) = 46,450 \text{ Pa}$

$Q_{f\lambda} = \sum p \Delta L \cdot f = 2,230 \text{ kN}$





**Figura 6.2**  
Variación de  $\lambda$  con la longitud de empotramiento del pilote. (Das 2001)

#### Método del coeficiente $\alpha$

Los valores de  $\alpha$  para cada una de las cohesiones se obtienen de la figura 3.6 y son:

$$\begin{aligned} c_{u1} &= 30 \text{ kPa} & \alpha_1 &= 1.0 \\ c_{u2} &= 30 \text{ kPa} & \alpha_2 &= 1.0 \\ c_{u3} &= 100 \text{ kPa} & \alpha_3 &= 0.5 \end{aligned}$$

De esta forma, los factores de adherencia pilote-suelo para cada estrato son:

$$\begin{aligned} f_1 &= \alpha_1 * c_{u1} = 30 \text{ kPa} \\ f_2 &= \alpha_2 * c_{u2} = 30 \text{ kPa} \\ f_3 &= \alpha_3 * c_{u3} = 50 \text{ kPa} \end{aligned}$$

y la resistencia total por fricción queda definida como:

$$Q_{fr} = (\Delta L_1 * p_e) * f_1 + (\Delta L_2 * p_e) * f_2 + (\Delta L_3 * p_e) * f_3 = 2,080 \text{ kN}$$

Por lo que la resistencia total del elemento se calcula como la suma de la resistencia por punta más un promedio de las resistencias por fricción con los distintos métodos.

$$Q_{ftot} = Q_p + \frac{(Q_{fa} + Q_{fr})}{2} = 2,299 \text{ kN}$$

#### Peso propio del pilote

$$\gamma_c = 23,544 \text{ kN/m}^3 \quad L_p = 30 \text{ m} \quad A_p = 0.16 \text{ m}^2$$

$$V_{pc} = A_p * L_p = 4.8 \text{ m}^3 \quad W_{pc} = \gamma_c * V_{pc} = 113 \text{ kN}$$

#### Capacidad de carga total del pilote

$$Q_{neta} = Q_{ftot} - W_{pc} = 2,186 \text{ kN}$$



## 6.1.2 Pilote de acero de Sección IR 305x86.1 kgf/m

Se propone un pilote de acero constituido por un perfil IR 305x86.1 kgf/m de 30 m de longitud. La elección de este perfil es para que el perímetro de la sección sea similar al perímetro del pilote de concreto evaluado en el inciso a.

Características geométricas del pilote:

$$p_e = 1.6 \text{ m} \quad A_p = 0.01097 \text{ m}^2 \quad L_p = 30 \text{ m}$$

### Propiedades del suelo

$$\text{Estrato 1 } \gamma_1 = 18 \text{ kN/m}^3 \quad c_{u1} = 30 \text{ kN/m}^2 \quad z_1 = 5 \text{ m}$$

$$\text{Estrato 2 } \gamma_1 = 18 \text{ kN/m}^3 \quad c_{u1} = 30 \text{ kN/m}^2 \quad z_1 = 5 \text{ m}$$

$$\text{Estrato 3 } \gamma_1 = 19.6 \text{ kN/m}^3 \quad c_{u1} = 100 \text{ kN/m}^2 \quad z_1 = 20 \text{ m}$$

### Cálculo del perfil de esfuerzos efectivos

$$\text{Estrato 1 } \sigma_{01} = \gamma_1 * z_1 = 90,000 \text{ Pa}$$

$$\text{Estrato 2 } \sigma_{02} = \sigma_{01} + (\gamma_2 - 9.81 \text{ kN/m}^3) * z_2 = 131,000 \text{ Pa}$$

$$\text{Estrato 3 } \sigma_{03} = \sigma_{02} + (\gamma_3 - 9.81 \text{ kN/m}^3) * z_3 = 326,800 \text{ Pa}$$

### Capacidad de carga de punta

$N_c = 9$  para arcillas

$c_{u3} = 100,000 \text{ Pa}$  correspondiente al estrato en contacto con la punta del pilote

$$q_p = N_c * c_{u3} = 900,000 \text{ Pa}$$

$$Q_p = A_{pl} * q_p = 9.873 \text{ kN}$$

### Capacidad de carga por fricción

Cálculo del área lateral del elemento en contacto con cada uno de los estratos

$$p_e = 1.6 \text{ m}$$

$$\Delta L_1 = 10 \text{ m} \quad \Delta L_1 * p_e = 16 \text{ m}^2$$

$$\Delta L_1 = 20 \text{ m} \quad \Delta L_1 * p_e = 32 \text{ m}^2$$

$$\sum p\Delta L = \Delta L_1 * p_e + \Delta L_2 * p_e = 48 \text{ m}^2$$

### Método del coeficiente $\lambda$

De la figura 6.2 se obtiene  $\lambda$ , tomando en cuenta una  $L = 30 \text{ m}$

$$L_p = 30 \text{ m} \quad \lambda = 0.14$$

$$\sigma_{0prom1} = (0 + \sigma_{01}) / 2 = 45,000 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{0prom2} = (\sigma_{01} + \sigma_{02}) / 2 = 110,500 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{0prom3} = (\sigma_{02} + \sigma_{03}) / 2 = 228,900 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{0prom} = \frac{(\sigma_{0prom1} * z_1) + (\sigma_{0prom2} * z_2) + (\sigma_{0prom3} * z_3)}{z_1 + z_2 + z_3} = 178,500 \text{ Pa}$$

$$c_u = \frac{(c_{u1} * z_1) + (c_{u2} * z_2) + (c_{u3} * z_3)}{z_1 + z_2 + z_3} = 76,670 \text{ Pa}$$

$$f = \lambda (\sigma_{0prom} * z_1 + 2 * c_u) = 46,450 \text{ Pa}$$

$$Q_{f\lambda} = \sum p\Delta L * f = 2,230 \text{ kN}$$

### Método del coeficiente $\alpha$

Los valores de  $\alpha$  para cada una de las cohesiones se obtienen de la figura 6.1 y son:

$$c_{u1} = 30 \text{ kPa} \quad \alpha_1 = 1.0$$

$$c_{u2} = 30 \text{ kPa} \quad \alpha_2 = 1.0$$

$$c_{u3} = 100 \text{ kPa} \quad \alpha_3 = 0.5$$

De esta manera, la adherencia entre el pilote y el suelo de los diferentes estratos quedan definidos como:

$$f_1 = \alpha_1 * c_{u1} = 30 \text{ kPa}$$

$$f_2 = \alpha_2 * c_{u2} = 30 \text{ kPa}$$

$$f_3 = \alpha_3 * c_{u3} = 50 \text{ kPa}$$

y la resistencia total por fricción queda definida como:

$$Q_{f\alpha} = (\Delta L_1 * p_e) * f_1 + (\Delta L_2 * p_e) * f_2 + (\Delta L_3 * p_e) * f_3 = 2,080 \text{ kN}$$

Por lo que la resistencia total del elemento se calcula como la suma de la resistencia por punta más un promedio de las resistencias por fricción con los distintos métodos.

$$Q_{ftot} = Q_{pl} + \frac{(Q_{f\lambda} + Q_{f\alpha})}{2} = 2,165 \text{ kN}$$

### Peso propio del pilote

Peso por metro

$$W_1 = 844.64 \text{ kN/m}$$

$$L_p = 30 \text{ m} \quad A_p = 0.16 \text{ m}^2$$

$$W_{pl} = W_1 * L_p = 25.339 \text{ kN}$$

### Capacidad de carga total del pilote

$$Q_{neta} = Q_{ftot} - W_{pc} = 2,139 \text{ kN}$$



## 6.2 Capacidad de carga en suelo friccionante

El segundo ejemplo ilustrativo tomado de Budhu (2008), corresponde a un estrato de arena homogéneo con las propiedades indicadas. Se determina la capacidad de carga por punta, la capacidad de carga por fricción y la capacidad de carga admisible en el pilote. Los métodos de cálculo para la capacidad de carga son los indicados en la sección 2.

### Propiedades del suelo

$$c_u = 40 \text{ kPa} \quad \gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ kN/m}^3 \quad \phi'_{\text{cs}} = 30^\circ \quad \phi'_i = 28^\circ$$

Relación de sobre-consolidación, que se refiere a la relación entre el esfuerzo de preconsolidación y el esfuerzo efectivo, es  $\text{OCR}=2$

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - 9.8 \text{ kN/m}^3 = 8.2 \text{ kN/m}^3$$

### 6.2.1 Pilote de sección maciza cuadrada de concreto de 0.3 x 0.3 m.

Se determina la capacidad de carga para un pilote cuadrado de 0.3 x 0.3 m, y con una longitud de 15 m. Las características geométricas del elemento son:

$$L_p = 15 \text{ m} \quad D = 0.30 \text{ m} \quad d = 0.30 \text{ m} \\ p_e = D * 2 + 2 * d = 1.2 \text{ m} \quad A_p = D * d = 0.09 \text{ m}^2$$

#### Esfuerzo efectivo al el centro de la longitud

$$\sigma_{z0} = \gamma' * \frac{L_p}{2} = 61,500 \text{ Pa}$$

#### Capacidad de carga por fricción

La fricción que se desarrolla entre la superficie del pilote y el suelo se define como el menor de los siguientes valores (Budhu 2011):

$$f_{s1} = 1/2 * \sqrt{(c_u) * \sigma_{z0}} = 24,800 \text{ Pa}$$

$$f_{s2} = 1/2 * c_u^{0.75} * \sigma_{z0}^{0.25} = 22,270 \text{ Pa}$$

Donde el  $f_s$  será el menor de los valores mostrados

$$f_s = f_{s2} = 22,270 \text{ Pa}$$

El parámetro  $\beta$  se define, según Budhu (2011) cómo

$$\beta = (1 - \sin \phi'_{\text{cs}}) * \text{OCR}^{0.5} * \tan(\phi'_i) = 0.376$$

Por lo que la capacidad de carga por fricción del pilote es:

$$Q_{f\beta} = \beta * f_s * A_f = 150.7 \text{ kN}$$

#### Capacidad de carga por punta

$$Q_p = 9 * c_u * A_p = 32.4 \text{ kN}$$

### Peso del pilote

Peso del pilote de concreto:

$$\gamma_c = 23.54 \text{ kN/m}^3 \quad V_{pc} = A_p * L_p = 1.35 \text{ m}^3 \quad W_{pc} = \gamma_c * V_{pc} = 31.78 \text{ kN}$$

### Capacidad de carga total

$$Q_{\text{tot}} = Q_p + Q_{f\beta} = 183.1 \text{ kN}$$

### Capacidad de carga neta

$$Q_{\text{net}} = Q_{\text{tot}} - W_{pc} = 151.3 \text{ kN}$$

## 6.2.2 Pilote de acero

Para un pilote de acero se usara el siguiente perfil, IR 203 X 59.3kgf/m y con una longitud de 15m determinar la capacidad de carga por el método  $\beta$ .

$$L_p = 15 \text{ m} \quad D = 0.21 \text{ m} \quad d = 0.21 \text{ m} \\ p_e = 1.2 \text{ m} \quad A_p = 0.0075 \text{ m}^2$$

Se calcula el valor del esfuerzo efectivo a la mitad del pilote

$$\sigma_{z0} = \gamma' * L_p / 2 = 61,500 \text{ Pa}$$

#### Capacidad de carga por fricción

La fricción que se desarrolla entre la superficie del pilote y el suelo se define como el menor de los siguientes valores:

$$f_{s1} = 1/2 * \sqrt{(c_u) * \sigma_{z0}} = 24,800 \text{ Pa}$$

$$f_{s2} = 1/2 * c_u^{0.75} * \sigma_{z0}^{0.25} = 22,270 \text{ Pa}$$

Donde el  $f_s$  será el menor de los valores mostrados

$$f_s = f_{s2} = 22,270 \text{ Pa}$$

El parámetro  $\beta$  se define como:

$$\beta = (1 - \sin \phi'_{\text{cs}}) * \text{OCR}^{0.5} * \tan(\phi'_i) = 0.376$$

Por lo que la capacidad de carga por fricción del pilote es:

$$Q_{f\beta} = \beta * f_s * A_f = 126 \text{ kN}$$

Capacidad de carga por punta

$$Q_p = 9 * c_u * A_p = 2.718 \text{ kN}$$

#### Peso propio del pilote

Por metro del perfil

$$W_{pl} = 581.73 \text{ kN/m} \quad W_{pl} = W_{pl} * L_p = 8.725 \text{ kN}$$

Capacidad de carga total


$$Q_{\text{totl}} = Q_{pl} + Q_{us} = 128.9 \text{ kN}$$


Capacidad de carga neta


$$Q_{\text{netl}} = Q_{\text{totl}} - W_{pl} = 120.2 \text{ kN}$$


### 6.3 Comparación y conclusión de los resultados obtenidos para pilotes individuales


Los resultados de los ejemplos ilustrativos permiten destacar algunos comentarios preliminares que se enumeran a continuación:


- 


El uso de pilotes de acero baja la capacidad de carga por punta debido a la reducción del área de la sección transversal.
- 

El peso de los elementos utilizados en las soluciones con pilotes de acero es mucho menor que el peso de los elementos utilizados para el caso de los pilotes de concreto. Este efecto contrarresta en alguna medida la pérdida de capacidad por punta indicada en el punto anterior.
- 

Para el caso de suelo cohesivo, la diferencia entre las capacidades de carga de las soluciones con acero y con concreto son de sólo un 2%.
- 

Para el caso del suelo friccionante, existe una reducción en la fricción entre el acero y los suelos friccionantes respecto a la fricción que se desarrolla en un pilote de concreto. Esta reducción se traduce en una reducción en la resistencia por fricción de alrededor de un 16%. Esta reducción puede compensarse utilizando un con un perímetro un poco mayor.
- 

La variación en la resistencia de los elementos propuestos para el suelo friccionante son mayores que para el caso de suelos cohesivos. Estas diferencias son de alrededor del 20% para el ejemplo mostrado. Esto se debe a dos factores primordialmente, el primero la reducción en la fricción que se desarrolla entre el material y el suelo y el segundo a la mayor aportación de la capacidad por punta en los suelos friccionantes.
- 

El volumen de suelo removido en el caso de la solución con pilotes de acero es significativamente menor que el volumen de suelo removido para la solución con pilotes de concreto (el 7% para el ejemplo en suelo cohesivo y el 8% para el caso en suelo friccionante). Este dato es sumamente importante cuando se trata cimentaciones de grupos de pilotes en terrenos urbanos debido a los posibles desplazamientos verticales en los predios vecinos que pueden producirse.
- 

Con estos primeros ejemplos se puede apreciar que en el caso de arenas, es necesario utilizar elementos con perímetros ligeramente mayores cuando se trate de pilotes de acero.

## 7 EJEMPLO DEL DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN DE UN EDIFICIO

El ejemplo contempla un edificio para uso habitacional, que contará con 4 niveles de estacionamiento (los cuales su ubicaran bajo el nivel del suelo) un nivel de piso (lobby), 15 niveles sobre el nivel de piso y un nivel de azotea. Se considerará a la estructura como una construcción aislada. La estructura está resuelta a través de marcos dúctiles (con  $Q=3$ ) de concreto reforzado, al cual se conectan sistemas de entrepisos los cuales serán losas macizas perimetralmente apoyadas. Para tener una mayor rigidez se colocaron muros de concreto ligados a la estructura, los cuales trabajaran conjuntamente con ella. Estos muros a la vez sirven para delimitar a las escaleras y los elevadores. La estructura cuenta con muros de block hueco para uso divisorio, y para uso perimetral, dichos muros se encuentran desligados de la estructura principal (marco) para evitar daños en las columnas y en los mismos muros. El análisis sísmico de la estructura se realizó con el apéndice A, de las NTCDF-04.





Para el diseño de su cimentación se consideraron 2 casos diferentes, uno para suelos cohesivos y otro para suelos friccionantes. La cimentación se diseñará para que soporte la mayor condición de carga para efectos de cargas verticales, según las NTCDF-04. Para el caso de los asentamientos, se controlan por medio del uso de un cajón de cimentación el cuál no tendrá influencia en el número de pilotes, ya que por definición en las NTCDF-04 para cimentaciones se estipula que la capacidad de carga en cimentaciones mixtas debe estar asegurada por uno solo de los sistemas de cimentación, en este caso el grupo de pilotes. Para el análisis y revisión de la estructura se generó un modelo tridimensional con el software comercial ETABS 2013, donde se efectuó la revisión de la estructura con los criterios en base al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004). El diseño estructural se realizó con base en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-C 2004).

Después de realizar el análisis correspondiente con el software se obtuvo el peso del edificio considerando condiciones de servicio (multiplicado con su respectivo factor de carga), y con este resultado se realizara el diseño de la cimentación para el edificio.

Peso total del edificio

$$P_p = 12,543.097 \text{ t}$$

Las dimensiones de la planta del edificio son las siguientes:

$$L = 22 \text{ m} \quad B = 20 \text{ m} \quad A = L * B = 440 \text{ m}^2$$

## 7.1 Diseño en suelo cohesivo

Para los casos de suelo cohesivo, se tiene que el edificio se localizará en la zona III d, para la cual se considerará una cohesión media del suelo no drenada de:

$$c_u = 5,000 \text{ kgf/m}^2$$

### 7.1.1 Solución con pilotes de concreto de sección maciza cuadrada de 0.55 x 0.55 m

Para la cimentación a base de pilotes de concreto, se propone una sección cuadrada con las siguientes dimensiones:

$$d = 0.55 \text{ m} \quad b = 0.55 \text{ m} \quad l_{\text{argo}} = 18 \text{ m}$$

Características geométricas de los pilotes

$$\begin{aligned} \text{Área del pilote} & A_p = 0.303 \text{ m}^2 \\ \text{Perímetro del pilote} & p_e = 2.2 \text{ m} \\ \text{Peso del pilote} & P_{\text{pil}} = \gamma_c * A_p * l_{\text{argo}} = 13,070 \text{ kgf} \end{aligned}$$

Capacidad de carga de un pilote por punta

$$Q_p = F_r * 9 * C_u * A_p = 9,529 \text{ kgf}$$

Donde  $F_r$  corresponde al factor de reducción por resistencia indicado en las NTC-Cimentaciones (2004).

### Capacidad de carga de un pilote por fricción

$\alpha = 1$  este valor de  $\alpha$  se obtuvo de la relación entre el factor  $\alpha$  y el esfuerzo cortante no drenado (Bowles 1988)

$$f = \alpha * C_u = 5,000 \text{ kgf/m}^2$$

$$Q_f = F_r * f * p_e * \Delta L = 138.6 \text{ t}$$

### Capacidad de carga neta de un pilote

$$Q_{\text{tot}} = Q_p + Q_f - P_{\text{pil}} = 135.1 \text{ t}$$

### Determinación preliminar del número de pilotes

$$N_p = P_p / Q_{\text{tot}} = 92.87 \approx 93 \text{ pilotes}$$

### Grupo de pilotes

Se propone un arreglo cuadrado de 10 pilotes por 10 pilotes (figura 7.1).

$$n_1 = 10 \quad n_2 = 10 \quad s_{p1} = 2.35 \text{ m} \quad s_{p2} = 2.1 \text{ m}$$

$$L_g = (n_1 - 1) * s_{p1} + d = 21.7 \text{ m}$$

$$B_g = (n_2 - 1) * s_{p2} + d = 19.45 \text{ m}$$

$$\text{Perímetro del grupo} \quad p_g = 2 * B_g + 2 * L_g = 82.3 \text{ m}$$

$$\text{Área de la base del grupo} \quad A_g = B_g * L_g = 422.065 \text{ m}^2$$

### Determinación del factor $N^*C$

Con las dimensiones del perímetro exterior del grupo de pilotes se puede definir el valor del factor  $N^*C^*$  con ayuda de la gráfica mostrada en la figura 7.2.

$$L_g / B_g = 1.116 \quad L_{\text{argo}} / B_g = 0.925 \quad N^*C_c = 7.6$$

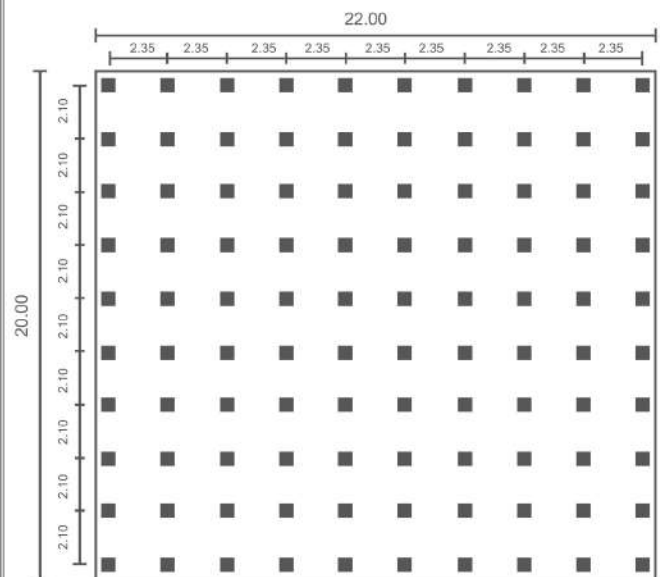


Figura 7.1 Distribución del grupo de pilotes de concreto en suelo cohesivo

**Capacidad de carga del grupo de pilotes**

$$Q_g = F_r * (L_g * B_g * c_u * N_c^* + 2 (L_g + B_g) * c_u * l_{\text{arg}}) = 14,930 \text{ t}$$

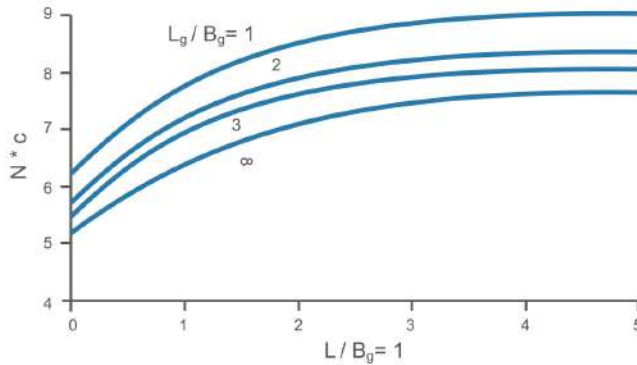
$$Q_{gt} = Q_g - P_{\text{pil}} * (n_1 * n_2) = 13,746 \text{ t}$$

**Cantidad de suelo que será removido al hincar los pilotes**

$$V_s = (n_1 * n_2) * l_{\text{arg}} * A_p = 544.5 \text{ m}^3$$

**Eficiencia del grupo**

$$\eta = Q_{gt} / (Q_{\text{tot}} * (n_1 * n_2)) = 1.017$$



**Figura 7.2 Gráfica para determinar el factor N\*c. (Das 2001)**

**7.1.2 Solución con pilotes de acero de sección I**

Para la cimentación a base de pilotes de acero utiliza un perfil I comercial (según el manual IMCA) el cual tenga un perímetro similar al perímetro que tienen los pilotes de concreto que se usaron para el diseño de la cimentación con pilotes de concreto. Con esto se seleccionara el perfil IR 356x196.5 kgf/m.

El pilote seleccionado tiene las siguientes propiedades geométricas:

- d= 0.374 m      b= 0.374 m      l<sub>arg</sub>= 18m
- Área del pilote      A<sub>p</sub>= 0.025m<sup>2</sup>
- Perímetro del pilote:      p<sub>e</sub>=0.219m
- Peso del pilote:      P<sub>perfil</sub>=196.5 kgf/m
- P<sub>pil</sub>=l<sub>arg</sub>\*P<sub>perfil</sub>=3.537 t

**Capacidad de carga de la punta del pilote**

$$Q_p = F_r * 9 * C_u * A_p = 0.788 \text{ t}$$

**Capacidad de carga del pilote por fricción**

α=1 (este valor se obtiene de la figura 6.1)

$$f = \alpha * C_u = 5,000 \text{ kgf/m}^2$$

$$Q_f = F_r * f * p_e * \Delta L = 138 \text{ t}$$

**Capacidad de carga del pilote**

$$Q_{\text{tot}} = Q_p + Q_f - P_{\text{pil}} = 135.2 \text{ t}$$

**Determinación preliminar del número de pilotes**

$$N_p = P_p / Q_{\text{tot}} = 92.76 \approx 93 \text{ pilotes}$$

**Grupo de pilotes**

Se propone un arreglo de 10 pilotes por 10 pilotes (figura 14)

$$n_1 = 10 \quad n_2 = 10 \quad s_{p1} = 2.35\text{m} \quad s_{p2} = 2.1\text{m}$$

$$L_g = (n_1 - 1) * s_{p1} + d = 21.524\text{m}$$

$$B_g = (n_2 - 1) * s_{p2} + d = 19.274\text{m}$$

$$\text{Perímetro del grupo } p_g = 2 * B_g + 2 * L_g = 81.596\text{m}$$

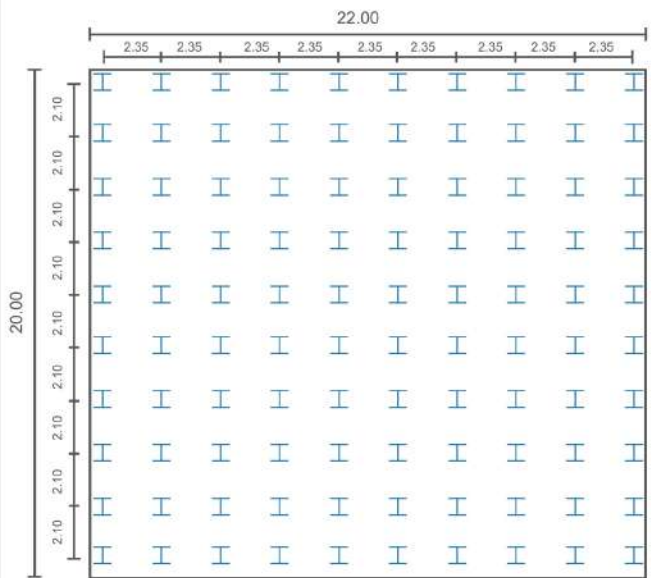
$$\text{Área de la base del grupo } A_g = B_g * L_g = 414.854\text{m}^2$$

**Determinación del factor N\*c**

$$L_g / B_g = 1.117 \quad l_{\text{arg}} / B_g = 0.934$$

Se determina el valor de N<sub>c</sub>\* de la gráfica mostrada en la figura 7.3. Con los valores anteriormente calculados, se tiene:

$$N_c^* = 6.8$$



**Figura 7.3 Distribución de pilotes de acero de sección I en suelo cohesivo**

**Capacidad de carga del grupo de pilotes**

Se propone un arreglo de 10 pilotes por 10 pilotes (figura 14)

$$Q_g = F_r * (L_g * B_g * c_u * N_c^* + 2 (L_g + B_g) * c_u * l_{\text{arg}}) = 15,010 \text{ t}$$

$$Q_{gt} = Q_g - P_{\text{pil}} * (n_1 * n_2) = 14,660 \text{ t}$$

**Cantidad de suelo que será removido al hincar los pilotes**

$$V_s = (n_1 * n_2) * l_{\text{arg}} * A_p = 45 \text{ m}^3$$

**Eficiencia del grupo**

$$\eta = \frac{Q_{gt}}{Q_{\text{tot}} * (n_1 * n_2)} = 1.084$$



## 7.2 Diseño en suelo friccionante

Para el caso de suelo friccionante se consideran las siguientes propiedades del suelo donde se desplantará el edificio.

$$\begin{aligned} \gamma &= 1,800 \text{ kgf/m}^3 & \Phi'_{cs} &= 30^\circ \\ E'_{so} &= 306 \text{ kgf/cm}^2 & \Phi'_i &= 39^\circ \\ u &= 0.3 & H_s &= 40\text{m} \end{aligned}$$

### 7.2.1 Solución con pilotes de concreto de sección cuadrada maciza de 0.55 x 0.55 m

Se proponen pilotes de concreto con sección transversal maciza de 0.55 x 0.55 m y 20 m de longitud. Las propiedades geométricas de los pilotes son:

$$\begin{aligned} d &= 0.55 \text{ m} & b &= 0.55 \text{ m} & l_{\text{argo}} &= 20 \text{ m} \\ \text{Área del pilote} & & A_p &= 0.303 \text{ m}^2 \\ \text{Perímetro del pilote} & & p_e &= 2.2 \text{ m} \\ \text{Peso del pilote} & & P_{\text{pil}} &= \gamma_c * A_p * l_{\text{argo}} = 14,520 \text{ kg} \end{aligned}$$

#### Capacidad de carga de la punta del pilote

Con la gráfica para el cálculo de  $Z_c / B$  (figura 2) y con el valor de  $\Phi'_{cs}$ , se determina la profundidad efectiva:

$$z_c = 7 * b = 3.85 \text{ m}$$

Por lo que el esfuerzo efectivo al nivel de la punta se considerará como:

$$p_b = \gamma * z_c = 6,930 \text{ kgf/m}^2$$

Y la capacidad por punta será:

$$Q_p = F_r * p_b * A_p * N_q = 66.3 \text{ t}$$

#### Capacidad de carga del pilote por fricción

Se determina la profundidad máxima a la que se debe considerar el incremento de los esfuerzos efectivos para la capacidad de carga por fricción ( $L'$ ) y será el menor de elegir el menor de los siguientes valores:

$$\begin{aligned} 15 * d &= 8.25 \text{ m} \quad | \quad l_{\text{argo}} = 20 \text{ m} \quad | \quad L' = 8.25 \text{ m} \\ \delta &= \phi = 30^\circ \\ \sigma_1 &= \gamma * L'/2 = 7,425 \text{ kgf/m}^2 \\ \sigma_2 &= \gamma * L' = 14,850 \text{ kgf/m}^2 \end{aligned}$$

Con estos valores del esfuerzo efectivo se pueden definir dos zonas con diferente fricción entre el pilote y el suelo. La primera en la cuál existe un incremento lineal del esfuerzo con la profundidad (zona 1) y otra en la cuál es esfuerzo efectivo es constante con la profundidad (zona 2).

$$\begin{aligned} f_{s1} &= K * \sigma_1 * \tan \delta = 8,574 \text{ kgf/m}^2 \\ f_{s2} &= K * \sigma_2 * \tan \delta = 17,150 \text{ kgf/m}^2 \end{aligned}$$

Por lo que la capacidad de carga por fricción del pilote queda definida como la suma de las contribuciones de ambas zonas.

$$\begin{aligned} Q_{f1} &= F_r * f_{s1} * p_e * L' = 108.9 \text{ t} \\ Q_{f2} &= F_r * f_{s2} * p_e * (l_{\text{argo}} - L') = 310.3 \text{ t} \\ Q_{fi} &= Q_{f1} + Q_{f2} = 419.2 \text{ t} \end{aligned}$$

#### Capacidad de carga del pilote

$$Q_{\text{tot}} = Q_p + Q_{f1} + Q_{f2} - P_{\text{pil}} = 470.7 \text{ t}$$

#### Determinación preliminar del número de pilotes

$$N_p = P_p / Q_{\text{tot}} = 26.646 \approx 27 \text{ pilotes}$$

#### Grupo de pilotes

Se propone un arreglo cuadrado de 6 pilotes por 5 pilotes como se muestra en la figura 7.4.

$$\begin{aligned} n_1 &= 6 & n_2 &= 5 & s_{p1} &= 4.2 \text{ m} & s_{p2} &= 4.7 \text{ m} \\ L_g &= (n_1 - 1) * s_{p1} + d = 21.55 \text{ m} \\ B_g &= (n_2 - 1) * s_{p2} + d = 19.35 \text{ m} \\ \text{Perímetro del grupo} & p_g = 2 * B_g + 2 * L_g = 81.8 \text{ m} \\ \text{Área de la base del grupo} & A_g = B_g * L_g = 416.993 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

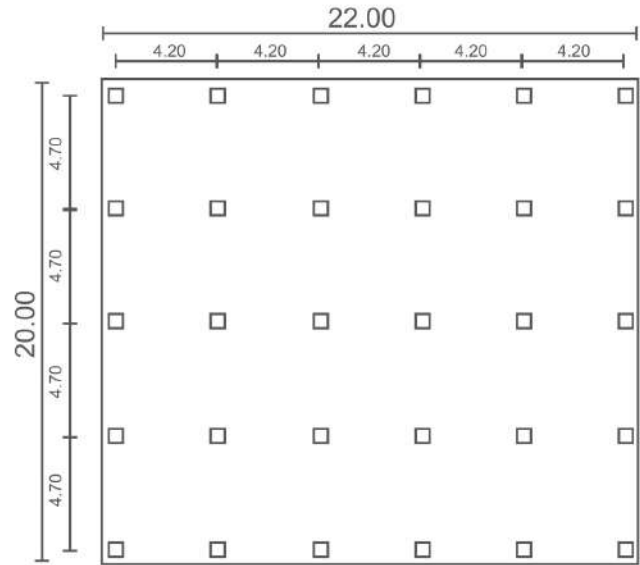


Figura 7.4 Distribución de pilotes de concreto en suelo friccionante

#### Capacidad de carga del grupo de pilotes

La capacidad de carga por punta del grupo de pilotes en suelos friccionantes es igual a la suma de las capacidades de carga de punta individuales, a diferencia del caso de suelos cohesivos.

$$Q_{PG} = Q_p * (n_1 * n_2) = 1,981 \text{ t}$$

La fricción que se desarrolla en el perímetro del grupo de pilotes se puede definir como el promedio de las fricciones de las zonas definidas para los pilotes individuales.

$$f_{\text{prom}} = (f_{s1} + f_{s2}) / 2$$

La capacidad de carga por fricción del grupo de pilotes será el menor valor de los siguientes:

$$\begin{aligned} Q_{ig} &= F_r * (2 * (B_g + L_g)) * (l_{\text{argo}} * f_{\text{prom}}) = 14,730 \text{ t} \\ Q_{ig2} &= Q_{fr} * ((n_1 + n_2)) = 12,580 \text{ t} \\ Q_{igrupo} &= 12,580 \text{ t} \end{aligned}$$

Para este caso la capacidad de carga por fricción queda definida por la suma de las capacidades de carga individuales.

Capacidad de carga del grupo de pilotes

$$Q_{\text{grupo}} = Q_{\text{fgrupo}} + Q_{\text{PG}} - P_{\text{pil}} * (n_1 * n_2) = 14,120 \text{ t}$$

Cantidad de suelo que será removido al hincar los pilotes

$$V_s = (n_1 * n_2) * l_{\text{argo}} * A_p = 181.5 \text{ m}^3$$

Eficiencia del grupo

$$\eta = \frac{Q_{\text{gt}}}{Q_{\text{tot}} * (n_1 * n_2)} = 1.0$$

## 7.2.2 Solución con pilotes de acero de sección I

Para esta se propone nuevamente un perfil IR356x196.5 por las razones previamente mencionadas. Como ya se ha comentado anteriormente, en los perfiles de acero en suelos friccionantes se tiene una reducción en la fricción que existe entre el pilote y el suelo, por lo que en este caso se utilizan pilotes de mayor longitud que para el caso de los pilotes de concreto. Las propiedades geométricas de los pilotes son:

$$d = 0.374 \text{ m} \quad b = 0.374 \text{ m} \quad l_{\text{argo}} = 34 \text{ m}$$

$$\text{Área del pilote } A_p = 0.025 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro del pilote } p_e = 2.19 \text{ m}$$

$$\text{Peso del pilote } P_{\text{pil}} = 196.5 \text{ kg/m} * l_{\text{argo}} = 6,681 \text{ kg}$$

Capacidad de carga de la punta del pilote

Con la gráfica para el cálculo de  $Z_c/B$  (figura 3.2) y con el valor de  $\Phi'_{cs}$ , se determina la profundidad efectiva para el cálculo del esfuerzo efectivo para la resistencia por punta.

$$z_c = 7 * b = 2.618 \text{ m}$$

Con este valor, el esfuerzo efectivo calculado es:

$$p_b = \gamma * z_c = 4,712 \text{ kgf/m}^2$$

Y la capacidad de carga por punta queda definida como:

$$Q_p = F_r * p_b * A_p * N_q = 3.715 \text{ t}$$

Capacidad de carga del pilote por fricción

Se determina la longitud  $L'$  definida previamente. Este valor será el menor de elegir el menor de los siguientes valores:

$$15 * d = 5.61 \text{ m} \quad l_{\text{argo}} = 34 \text{ m} \quad L' = 5.61 \text{ m}$$

$$\delta = \phi = 30^\circ$$

Por lo que los esfuerzos efectivos considerados para las dos zonas previamente descritas serán:

$$\sigma_1 = \gamma * (L' / 2) = 5,049 \text{ kgf/m}^2$$

$$\sigma_2 = \gamma * L' = 10,100 \text{ kgf/m}^2$$

Y las fricciones pilote-suelo de estas zonas será

$$f_{s1} = K * \sigma_1 * \tan \delta = 4,496 \text{ kgf/m}^2$$

$$f_{s2} = K * \sigma_2 * \tan \delta = 8,992 \text{ kgf/m}^2$$

De esta manera, la capacidad de carga por fricción de los pilotes individuales será la contribución de las capacidades de carga por fricción de ambas zonas:

$$Q_{f1} = F_r * f_{s1} * p_e * L' = 38.67 \text{ t}$$

$$Q_{f2} = F_r * f_{s2} * p_e * (l_{\text{argo}} - L') = 391.3 \text{ t}$$

$$Q_{fr} = Q_{f1} + Q_{f2} = 429.97 \text{ t}$$

Capacidad de carga del pilote

$$Q_{\text{tot}} = Q_p + Q_{f1} + Q_{f2} - P_{\text{pil}} = 427 \text{ t}$$

Determinación preliminar del número de pilotes

$$N_p = P_p / Q_{\text{tot}} = 29.372 \approx 30 \text{ pilotes}$$

Grupo de pilotes

Se propone un arreglo cuadrado de seis pilotes por cinco pilotes, como se muestra en la figura 16.

$$n_1 = 6 \quad n_2 = 5 \quad sp_1 = 4.2 \text{ m} \quad sp_2 = 4.7 \text{ m}$$

$$L_g = (n_1 - 1) * sp_1 + d = 21.374 \text{ m}$$

$$B_g = (n_2 - 1) * sp_2 + d = 19.974 \text{ m}$$

$$\text{Perímetro del grupo } p_g = 2 * B_g + 2 * L_g = 82.696 \text{ m}$$

$$\text{Área de la base del grupo } A_g = B_g * L_g = 426.924 \text{ m}^2$$

Capacidad de carga del grupo de pilotes

Capacidad de carga por punta

$$Q_{\text{PG}} = Q_p * (n_1 * n_2) = 111.5 \text{ t}$$

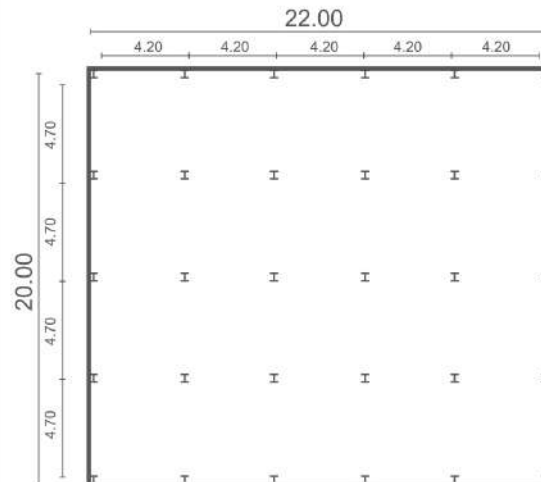


Figura 7.5 Distribución de pilotes de acero de sección I en suelo friccionante

Capacidad de carga por fricción

$$f_{\text{prom}} = (f_{s1} + f_{s2}) / 2 = 6,744 \text{ kgf/m}^2$$



La capacidad de carga por fricción del grupo de pilotes será el menor valor de los siguientes:

$$Q_{fg} = F_r * (2 * (B_g + L_g)) * (l_{\text{argo}} * f_{\text{prom}}) = 13,270 \text{ t}$$

$$Q_{fg2} = Q_{fr} * ((n_1 + n_2)) = 12,900 \text{ t}$$

$$Q_{f\text{grupo}} = 12,900 \text{ t}$$

En este caso nuevamente la capacidad de carga por fricción del grupo de pilotes queda definida por la suma de las capacidades de carga individuales.

*Capacidad de carga del grupo de pilote*

$$Q_{\text{grupo}} = Q_{f\text{grupo}} + Q_{PG} - P_{\text{pil}} * (n_1 * n_2) = 12,810 \text{ t}$$

*Cantidad de suelo que será removido al hincar los pilotes*

$$V_s = (n_1 * n_2) * l_{\text{argo}} * A_p = 25.5 \text{ m}^3$$





*Eficiencia del grupo*

$$\eta = Q_{gt} / Q_{tot} * (n_1 * n_2) = 1.0$$





### 7.3 Comparación y conclusión de los resultados obtenidos del diseño de la cimentación de una edificación

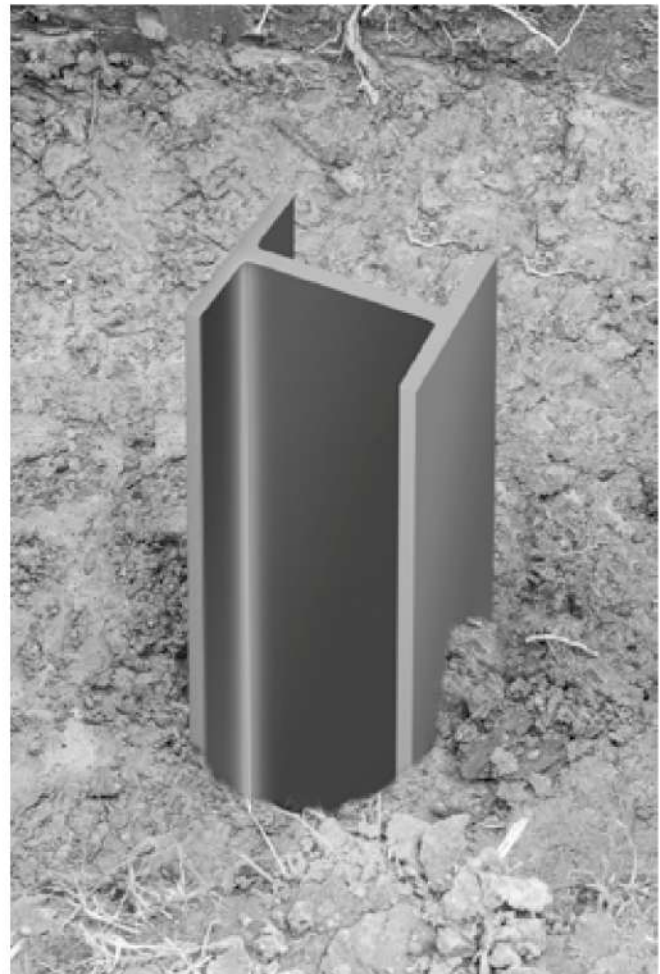
Para el diseño de las cuatro propuestas, solo se consideró el diseño bajo condiciones de carga gravitacional, ignorando los efectos dinámicos.

#### 7.3.1 Cimentaciones en suelos cohesivos

-  Para ambas cimentaciones en suelos cohesivos se propusieron pilotes de la misma longitud (18m) y la misma cantidad de pilotes (100 pilotes).
-  No hay gran diferencia entre el uso de pilotes de acero y pilotes de concreto, la diferencia entre la resistencia total del grupo con ambas soluciones es de sólo del 7%, siendo mayor la del grupo de pilotes de acero. La diferencia se centra fundamentalmente en el mayor peso que constituye la cimentación con pilotes de concreto.
-  Para este caso, la resistencia total queda definida por el comportamiento del grupo como una pila equivalente. Dado esto, la definición de la superficie de falla a fricción de los pilotes individuales no tiene influencia significativa en la resistencia total del grupo.
-  Las diferencias significativas se presentan en el volumen desplazado de suelo, para el caso de cimentaciones con pilotes de acero se debe desplazar solamente el 8% del volumen que es necesario desplazar para la solución con pilotes de concreto.

#### 7.3.2 Cimentaciones en suelos friccionantes

-  En el caso de las cimentaciones en suelos friccionantes se utilizaron solamente 30 pilotes con un largo de 20 metros para pilotes de concreto y 34 metros para los pilotes de acero.
-  Las diferencias en las longitudes entre ambas soluciones radica fundamentalmente en que para los pilotes de concreto la aportación de la resistencia por punta es muy grande en comparación al aporte de la punta de los pilotes de acero.
-  Al igual que para el caso de suelos cohesivos, el peso total de los pilotes de concreto es sumamente grande por lo que una gran parte de su capacidad última de carga sea minimizada por el peso del pilote.
-  Nuevamente el volumen de suelo desplazado para el caso de la solución con pilotes de concreto es mucho mayor que el volumen de suelo desplazado con los pilotes de acero, aún cuando los pilotes de acero tienen mayor longitud. El volumen de suelo desplazado con los perfiles de acero corresponde sólo al 14% del volumen de suelo desplazado por la solución con pilotes de concreto. Como ya se comentó anteriormente desplazar un mayor volumen de suelo puede ocasionar emersiones del suelo donde se hinque el pilote y en sus alrededores. En el caso que se necesite hacer barrenados previos, esto puede generar un costo extra, por el traslado de este material.



# CORROSIÓN

## 8.1 Introducción

Cuando llegaron a estar disponibles los primeros perfiles de acero en los inicios del siglo XX y pudieron ser hincados en el suelo, los pilotes de acero se convirtieron en una solución eficiente de cimentación para transferir las cargas de las estructuras a las capas resistentes del suelo. Hoy en día es común en todo el mundo el uso de pilotes I o H, tubulares de acero, así como las tablestacas para aplicaciones severas de cimentación profunda y en todo tipo de condiciones del suelo. A pesar del éxito histórico de los pilotes de acero, la corrosión sigue siendo un de los grandes retos a resolver. Un enfoque rentable para combatir los efectos de la corrosión durante la vida útil esperada de los pilotes puede reducir significativamente los costos generales del proyecto.

La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno; la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del medio y las propiedades de los materiales en cuestión, entre ellos puede mencionarse los procesos de desgaste por fricción, por erosión o por diversos otros factores mecánicos. Una característica importante de los procesos de corrosión es que los eventos ocurren espontáneamente en la naturaleza, en términos termodinámicos, esto equivale a decir que la variación de energía libre de la reacción global es menor que cero. Como se ilustra en la figura 8.1, la corrosión ordinaria es un proceso de reacciones de oxidación-reducción (redox) por el cual los metales se oxidan por medio del oxígeno,  $O_2$ , en presencia de humedad. El oxígeno en estado gaseoso es un agente oxidante, y la mayoría de los metales tienen potenciales de reducción menores que éste, por lo tanto son fácilmente oxidables. Se sabe que la

oxidación de los metales tiene lugar más fácilmente en puntos donde la tensión es mayor (donde los metales son más "activos").

Así, por ejemplo un clavo de acero que en su mayor parte es hierro, se corroe primero en la punta y en la cabeza. Un clavo doblado se corroe más fácilmente en el dobles. Un punto de tensión en un objeto de acero actúa como ánodo donde el hierro se oxida a iones  $Fe^{2+}$  y se forman hendiduras. Los electrones producidos fluyen a través del clavo hacia las áreas expuestas al  $O_2$ . Estas actúan como cátodos donde el  $O_2$  se reduce a iones hidróxido ( $OH^-$ ). Al mismo tiempo, los iones  $Fe^{2+}$  migran a través de la superficie húmeda. La reacción global se obtiene ajustando la transferencia electrónica y sumando las dos semirreacciones. Los iones  $Fe^{2+}$  pueden migrar desde el ánodo a través de la disolución hacia la región catódica, donde se combinan con los iones ( $OH^-$ ) para formar óxido de hierro. El hierro se oxida aún más por el  $O_2$  hasta el estado de oxidación, formándose el óxido de hierro o también llamado herrumbre  $Fe_2O_3$ , de color rojo. Algunos de los procesos más familiares de corrosión son la herrumbre del hierro y el acero, y la formación de pátina verde en el cobre y sus aleaciones bronce y latón. No siempre que se presenta la oxidación de un metal existe corrosión, en algunos casos el óxido formado es resistente y forma una capa gruesa de óxido que impide que el resto del material continúe oxidándose. Esto fenómeno es común en materiales de aluminio, zinc y magnesio. Sin embargo, la corrosión es un fenómeno mucho más amplio que afecta aún materiales no metálicos (cerámicas, polímeros, etc.) que sufren corrosión mediante otros mecanismos dependiendo del medio ambiente (Enríquez 2015).

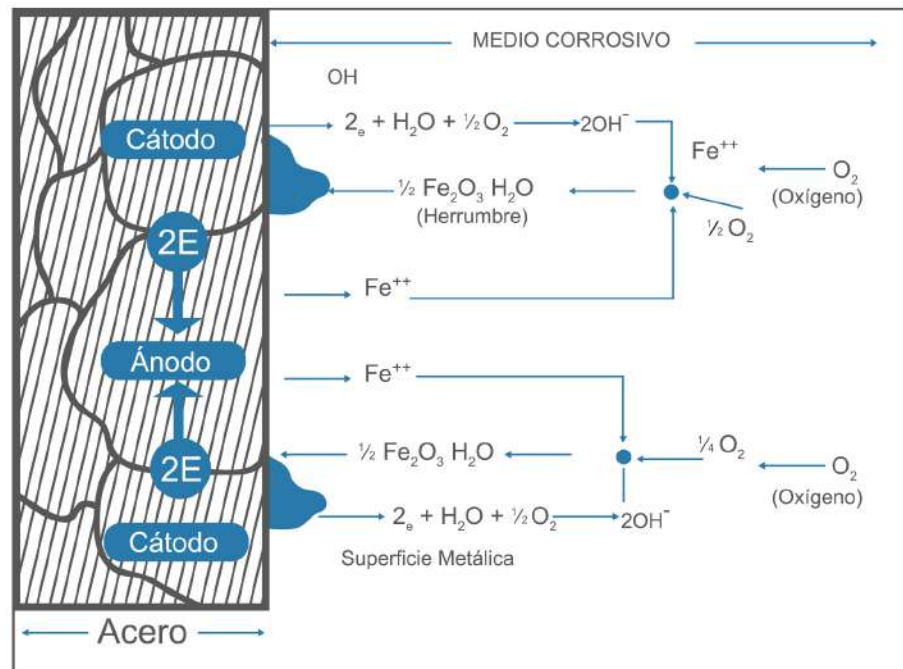


Figura 8.1 Proceso de reacciones de oxidación-reducción (nervion.com.mx)



La corrosión también puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal, y de las propiedades de los metales en cuestión. Otros materiales no metálicos también sufren corrosión mediante otros mecanismos.

La corrosión del hierro y del acero ocasionado por el suelo, el agua, o la humedad es causa de una reacción electroquímica. Es un proceso natural en el que la energía intrínseca dentro de los átomos de acero se debilitan hasta el punto que uno o más electrones dejan la estructura atómica del metal. La corriente eléctrica se conduce a través del agua por el transporte de los iones metálicos. Se requiere la presencia del oxígeno, un electrolito, y las condiciones que producen área de superficies anódicas y catódicas sobre el metal. La reacción anódica (oxidación) representa la adquisición de cargas por el metal corroído, mientras la adquisición catódica (reducción) representa la pérdida de cargas por los iones de hidrógeno que son descargados. La pérdida del metal corrosivo ocurre en las regiones anódicas sobre la superficie del metal, donde el pérdida del metal está acompañada por la dislocación de iones ferrosos.

## 8.2 Corrosión atmosférica

Los aceros al carbono se oxidan en atmósferas con una humedad relativa de más del 50 por ciento (nivel severo), y en 80 por ciento o más (nivel severo extremo) la corrosión del acero es mucho peor. Los factores críticos que determinan la velocidad de exposición atmosférica del acero son la humedad, especialmente en ambientes de agua salada del mar. Las figuras 8.2 y 8.3 muestran propuestas de mapas de corrosión atmosférica de México por dos distintas fuentes.

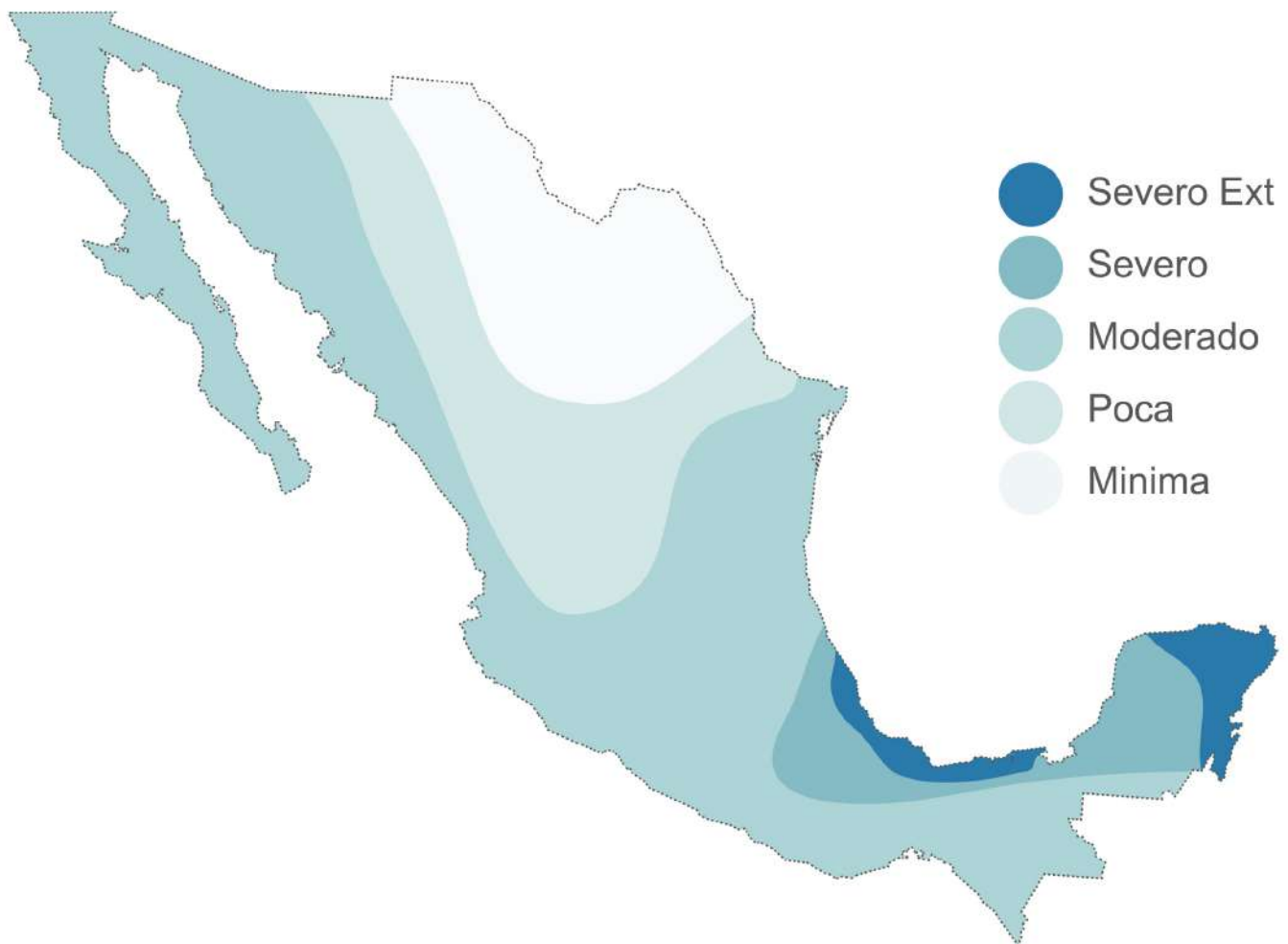
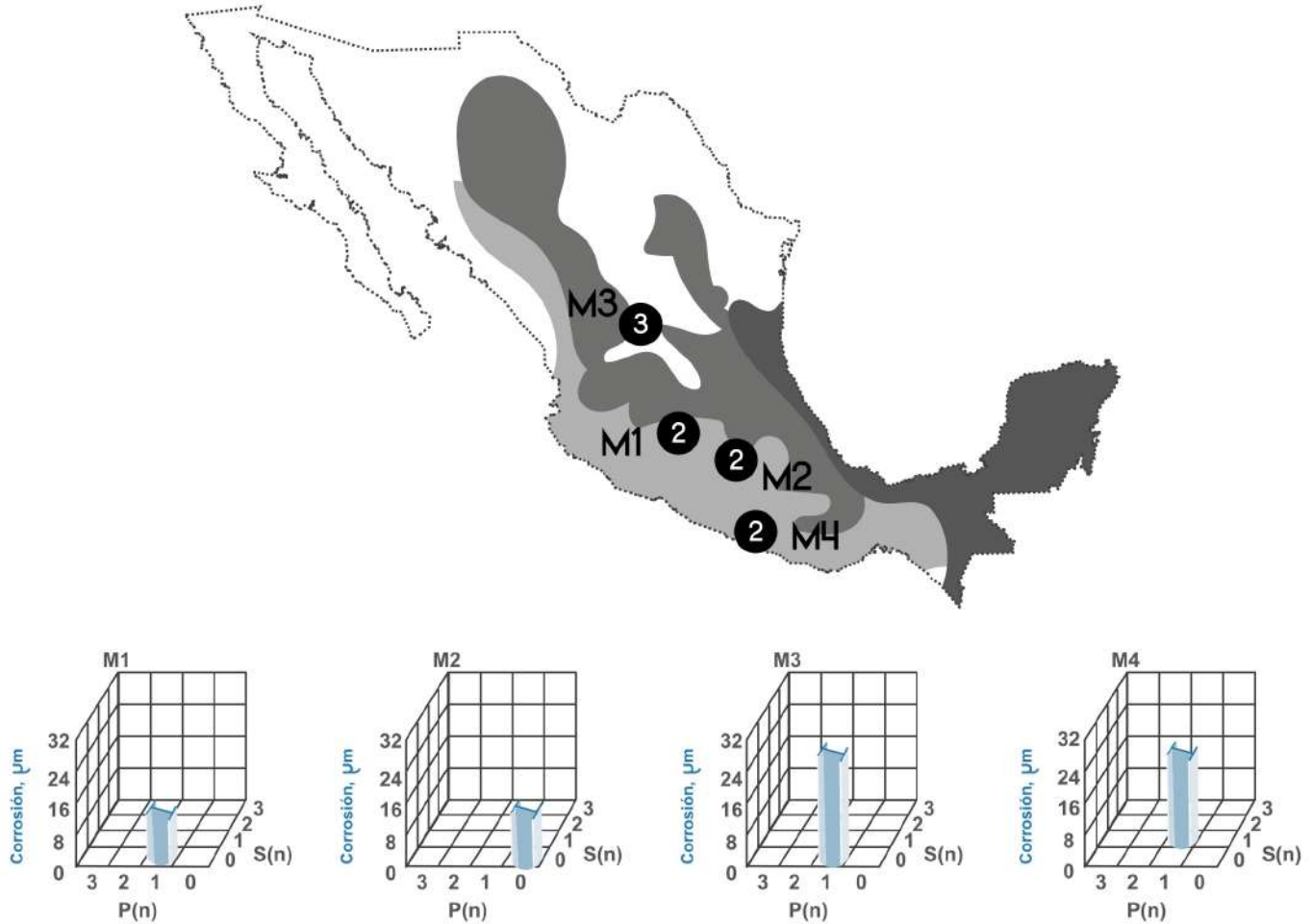


Figura 8.2 Mapa de corrosión atmosférica en México (costacool.mx)

# ACERO AL CARBONO



**Figura 8.3** Mapa de corrosión anual del acero al carbono para México (Mariaca et al. 1999)

Los pilotes expuestos a la atmósfera son generalmente objeto de baja corrosión. Sin embargo, existen condiciones en las estructuras de cimentación que son conducentes a la corrosión severa donde la humedad, cloruros y oxígeno son abundantes, como en el escurrimiento en puentes.

Cabe mencionar que en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) están trabajando en el desarrollo de un mapa de corrosión en suelos de México, el cual contendrá información a partir de mediciones de campo sobre la corrosión en suelos del país. Este mapa será publicado y estará disponible a finales de 2015 (Mena 2015).

## 1.1 Estudios previos sobre corrosión en pilotes

Como lo documenta Domingos (2004), la corrosión de pilotes de acero enterrados en el suelo ha sido estudiada extensivamente; entre los estudios que destacan en este tema se pueden mencionar los siguientes: Bjerrum (1957), Romanoff (1957), Booth et al. (1967),









Morley (1977, 1978), Biddle (1977), Morley y Bruce (1978), Bruce (1979), Ohsaki (1982), y Trethwey (1988).

Morley (1978) concluye a partir de datos obtenidos en Inglaterra y en varios otros países que, a menos que el suelo sea extremadamente ácido ( $\text{pH} < 4$ ), la corrosión de pilotes enterrados en suelos naturales es insignificante, independientemente del tipo de suelo y de sus características. El pequeño ataque es atribuido a los bajos niveles de oxígeno presentes en los suelos naturales.

Romanoff (1957) describe resultados de ensayos efectuados en Estados Unidos con más de 36,500 cuerpos de prueba, representando 333 variedades de materiales ferrosos, no ferrosos y materiales de protección expuestos en 128 diferentes localidades, comprendiendo desde suelos arenosos bien drenados hasta arcillas muy compactas, con resistividades que varían entre 300  $\Omega \cdot \text{cm}$  a 50,200  $\Omega \cdot \text{cm}$  y  $\text{pH}$  entre 2.3 a 8.6. Los datos confirman que los suelos naturales son tan deficientes en oxígeno que el acero no se ve afectado por la corrosión, independientemente del tipo de suelo y sus propiedades.



En Japón, Ohsaki (1982) evaluó el desgaste por corrosión de 126 pilotes de acero por 10 años, periodo en el cual evaluó variados tipos de suelos y diferentes niveles freáticos, y reportó las siguientes conclusiones:

-  No hubo variación, en la magnitud de la corrosión para diferentes tipos de acero o de suelos.
-  El grado de corrosión en la región próxima a la superficie del terreno es poco mayor de lo que en el restante del pilote, aunque muy pequeña.
-  No fue observada ninguna correlación entre la consistencia o compacidad de los suelos con la corrosión.
-  Se confirmó un ligero aumento de la velocidad de corrosión en suelos ácidos.
-  Ninguna relación fue establecida entre la corrosión y la variación del nivel freático.
-  La renovación del agua del subsuelo por circulación no alteró los niveles de corrosión en los pilotes.
-  Se observó mayor corrosión en las soldaduras que en los pilotes, pero con diferencias pequeñas en las velocidades de corrosión.
-  Las velocidades de corrosión en ambos lados de los pilotes tubulares fueron similares.

## 1.2 Corrosión de pilotes de acero enterrados en el suelo

Como se mencionó previamente, la ocurrencia de corrosión en pilotes de acero requiere de la difusión del oxígeno del suelo a la superficie de acero en presencia de un líquido conductor o el suelo (electrolito). Usualmente, la corrosión requiere que el suelo sea permeable al aire. Las variaciones en las condiciones del suelo crean una aireación diferencial sobre la superficie del pilote que sirve para crear las áreas catódicas y anódicas.







En general, el comportamiento de la corrosión en el acero estructural en contacto con el suelo se puede dividir en dos categorías: la corrosión en el suelo alterado, y la corrosión en suelo no alterado. El suelo alterado es aquel en el que ha tenido lugar la excavación, relleno u otro levantamiento o alteración del suelo. El oxígeno se introduce en el del suelo como consecuencia natural de la alteración del suelo con la presencia de aire. La velocidad de corrosión del acero en suelo alterado está influenciado por diferentes parámetros. Estos incluyen la resistividad del suelo, el grado de acidez o alcalinidad (pH), la humedad del suelo, y el contenido de oxígeno en el suelo. Para el hincado del pilote dentro de rellenos de suelo recientes y, en particular, rellenos de suelo industrial, la protección puede ser necesaria debido a los niveles elevados de químicos corrosivos o un bajo pH. El potencial de corrosión en suelos alterados varía ampliamente, y se asocia más consistentemente con la conductividad en el suelo, es decir, su menor resistencia a la corriente eléctrica. Cuando se requiera protección a corrosión, se debe aplicar una capa protectora a los pilotes.

En general, los suelos no alterados son tan deficientes en oxígeno a niveles de unos pocos metros por debajo de la línea de tierra o por debajo de la zona freática; así, los pilotes de acero en estos

suelos no son sensiblemente afectados por la corrosión. Puesto que la superficie del agua subterránea actúa como una barrera de difusión, la corrosión es más significativa en la zona no saturada (entre la superficie del suelo y un nivel justo por debajo del nivel de las aguas subterráneas). La corrosión disminuye con la profundidad sobre pilotes o tablestacas, aún en agua dulce o salada, debido al contenido reducido de oxígeno. Por lo general, los pilotes de acero enterrados en suelo no alterados no requieren de protección, independientemente de los tipos de suelo encontrados. En el flujo de agua subterránea, sin embargo, la corrosión puede ser importante también a mayor profundidad.

## 1.3 Acciones para la protección de pilotes de acero a la corrosión.

La "protección del acero a corrosión" es un término que se usa para referirse a un número de procedimientos diseñados para minimizar la rapidez de oxidación de algunos materiales de uso cotidiano. Se basa en el hecho, de evitar que el metal entre en contacto con el oxígeno del medio ambiente. Estos procedimientos no evitan la corrosión aunque sí pueden reducirla, hasta hacerla muy lenta. Hay varios métodos para proteger los metales contra la corrosión (Phillips 2012). Los que más se usan son:

-  Recubrimiento del metal con grasas, pinturas o películas de otros metales más nobles aplicados por electro deposición u otros métodos. Se considera un metal más noble aquel que presenta un potencial estándar de reducción menor que el del metal base. Esta película forma una barrera impermeable entre el metal y el oxidante, pero solo es efectiva cuando cubre completamente la estructura a proteger.
-  Conectar el metal a un ánodo de sacrificio, un trozo de otro metal que sea más activo y por lo tanto se oxide preferentemente.
-  Galvanizando o recubriendo acero con zinc, un metal más oxidable.
-  Permitiendo que una película, tal como un óxido metálico, se forme de manera natural sobre el metal.
-  Protección anódica/catódica.
-  Adición de inhibidores de corrosión al medio electrolítico. Son sustancias orgánicas o inorgánicas que tienen la capacidad de adsorberse fuertemente sobre la superficie metálica, provocando un bloqueo parcial de la superficie y afectando la rapidez de las reacciones que ocurren sobre ella.

Los pilotes de acero y tablestacas enterrados en suelo o agua deben permanecer en su lugar por un largo tiempo sin que la corrosión afecte su capacidad de carga. Los ingenieros generalmente se basan en un enfoque teórico cuando se trata de corrosión y se prevén condiciones corrosivas difíciles. Lo ideal sería que sus diseños no resulten en pilotes de acero más costoso para el cliente que aquellos que resulten óptimos al de las condiciones reales de servicio y bajos las demandas última. El reto es equilibrar el costo de prevenir la corrosión con el aumento deseado en la esperanza de vida de servicio del pilote.



Se presentan a continuación algunos métodos comúnmente utilizados para proteger los pilotes o contrarrestar los efectos previstos de la corrosión durante su vida útil en situaciones donde es probable elevadas velocidades de corrosión (Phillips 2012).

### 1.3.1 Sobredimensionamiento

El método más fácil para evitar daño por corrosión es sobredimensionar el área de la sección transversal de los pilotes de acero. Aumentar el espesor de la pared del pilote proporciona un espesor de sacrificio de corrosión para asegurar un soporte de carga adecuado sobre la vida de servicio prevista de la estructura de cimentación. Si un sitio se caracteriza por ser no corrosivo, entonces no es necesario un margen de corrosión (pérdida de metal de sacrificio). Una práctica común es incluir un adicional de entre 1.5 a 3.2 mm (1/16 a 1/8 pulg.) para acumular un grosor como medida de contingencia y contrarrestar las mayores velocidades de corrosión previstas, aunque dicho espesor adicional también depende del tipo de la agresividad a corrosión del suelo, así como del número de años esperado de la vida útil del proyecto.

La cantidad de metal de sacrificio también dependerá de la cantidad de pilotes o área de superficie de acero expuesta al suelo o el agua. Las tablestacas y pilotes I o H pueden experimentar corrosión en toda su área de superficie expuesta; en pilotes tubulares, la corrosión significativa se produce normalmente sólo en su superficie externa si sus extremos están abiertos, y además corrosión interna si sus extremos cerrados. Si la punta del pilote abierta está permanentemente por debajo del nivel freático y su cabeza superior está herméticamente sellada, el pilote forma un recubrimiento hermético y la corrosión de la superficie interna es insignificante.

### 1.3.2 Uso de acero de alta resistencia

El uso de acero de alta resistencia es otro método para contrarrestar las pérdidas potenciales de corrosión durante la vida del proyecto. El aumento de la resistencia a la fluencia mínima del pilote proporciona una medida adicional para que pueda mantener su capacidad de soporte de carga.

### 1.3.3 Recubrimientos

Los recubrimientos protectores de corrosión son muy poco utilizados en pilotes de acero debido a los posibles daños que pueden tener el recubrimiento cuando el pilote es hincado. Sin embargo, cuando se considere necesario algunos revestimientos de resina orgánica pueden ser una opción económica. Existen sistemas de pintura y protección especial diseñados específicamente para tablestacas y pilotes de acero en agua dulce y salada. Los encamisados de concreto y de fibras también puede ser soluciones muy rentables para aplicaciones marinas.

### 1.3.4 Protección catódica

La corrosión de los pilotes de acero también se puede controlar con alta confiabilidad con el uso de protección catódica. La protección catódica es un método de protección contra la corrosión, donde la corriente de corrosión en el pilote se compensa con una corriente inversa protectora. El efecto de la corriente continua (DC) es forzar que la superficie metálica se convierta en catódica (es decir, colectora de corriente). Si la corriente es de magnitud suficiente, todas las superficies metálicas se convierten en catódica al ánodo externo.





## 8.6 Normatividad

En esta sección se comenta las disposiciones de diferentes normas internacionales respecto a la protección que se debe aplicar a pilotes de acero enterrados en el suelo. En general, la mayoría de ellos da valores de espesor mínimo de sacrificio para dar protección adicional a la vida del pilote de acero por corrosión, y algunos otros se menciona la posibilidad de poner recubrimientos protectores.

El Eurocódigo (EC3 2004) menciona que la pérdida del espesor por corrosión atmosférica se puede considerar como 0.01 mm. por año en condiciones normales, y de 0.02 mm. por año para condiciones severas. Respecto a pilotes de acero enterrados en el suelo, indica que el espesor que debe ser descontado del pilote es función de las características del suelo y de la vida útil establecida en el proyecto de la cimentación. La Tabla 1 presenta los valores mínimos de espesores de sacrificio sugeridos en el EC3 (2004) para diferentes tipos de suelo y vida útil; en esta tabla, se incluye en la última columna la velocidad promedio de desgaste por corrosión (VCP) en mm. por año.

Considerando que las velocidades de corrosión en terraplenes compactados son menores que las encontradas en terraplenes no compactados, donde el contenido de oxígeno es muy superior, los valores indicados en la Tabla 8.1 para terraplenes deben ser divididos por dos en el caso de que el terraplén sea considerado compactado. Es importante resaltar que el EC3 (2004) reúne la experiencia práctica de muchos países europeos, con diferentes condiciones de clima y suelos, lo que torna su uso extremadamente amplio y confiable.

TIPO DE SUELO	Vida útil requerida del proyecto (años)					VCP (mm/año)
	5	25	50	75	100	
Suelos naturales (e.g., arena, arcilla.)	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20	<b>0.012</b>
Suelos naturales contaminados y rellenos industriales	0.15	0.75	1.50	2.25	3.00	<b>0.030</b>
Suelos naturales agresivos (e.g., pantanos)	0.20	1.00	1.75	2.50	3.25	<b>0.035</b>
Rellenos no compactados y no agresivos (e.g., arena, arcilla.)	0.18	0.70	1.20	1.70	2.20	<b>0.025</b>
Rellenos no compactados y agresivos (e.g., cenizas, escorias, etc.)	0.50	2.00	3.25	4.50	5.75	<b>0.060</b>

**Tabla 8.1 Espesores de sacrificio sugeridos por el EC3 (2002) para pilotes enterrados en el suelo**

La especificación AASHTO (2012) considera que los pilotes de acero enterrados en suelos naturales no son afectados por la corrosión, y por lo tanto, ninguna protección especial es necesaria. La corrosión localizada, por pilotes, puede ocurrir en la parte superior del pilote, en ciertos suelos aireados. Sin embargo, estas áreas son normalmente protegidas de la corrosión a través de la colocación de los encepados de concreto.

La Norma Brasileña NBR 6122 (2010) prescribe que los pilotes de acero deben resistir a la corrosión por la propia naturaleza del acero o por tratamiento adecuado. Del mismo modo indica que los pilotes enterrados en suelos naturales, independientemente del nivel freático, no requieren tratamiento especial. Para pilotes que permanecen en suelo natural indica descontar un espesor 1.5 mm., excepto que el pilote tenga protección especial de eficiencia comprobada a la corrosión.

En México, el Manual IMCA (IMCA 2014) y la NTC de Acero (NTC 2004) mencionan considerar un espesor de sacrificio para elementos de acero con potencial corrosión, aunque no indican un valor mínimo para cada caso. También sugieren colocar protección especial cuando se considere necesario.

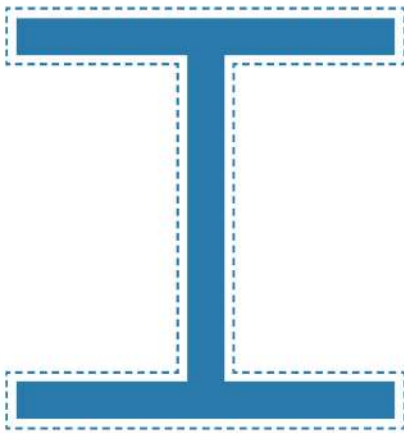


## 9 COMENTARIOS ADICIONALES ACERCA DE LA SUPERFICIE DE FALLA

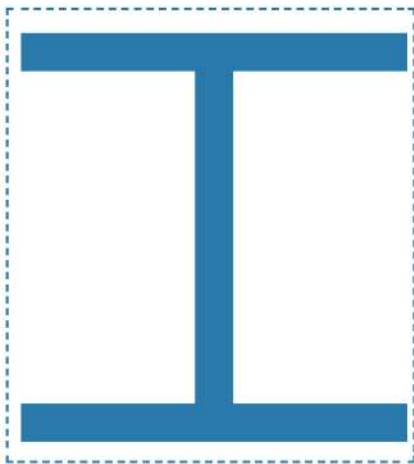


En este estudio exploratorio se han identificado algunos puntos de los cuales se pueden establecer algunas diferencias esperadas entre el comportamiento de los pilotes de perfil I y el comportamiento de elementos de sección maciza. Sin embargo es necesario realizar estudios más detallados acerca de estas diferencias esperadas para corroborar el comportamiento de los pilotes ante estos factores.

Uno de los puntos fundamentales en la capacidad de carga por fricción de los pilotes individuales es la superficie lateral del pilote que se debe considerar. Esta superficie depende de cuál es el mecanismo de falla esperado por fricción. Esta superficie de falla puede desarrollarse de muy diferentes maneras, estableciendo dos posibilidades extremas. La primera es que la superficie de falla se desarrolle a lo largo del todo el perímetro del perfil y la segunda es que se desarrolle en un perímetro equivalente que rodee toda la sección (figura 9.1).



a) Superficie de falla por el perímetro total del perfil



b) Superficie de falla por el perímetro exterior

**Figura 9.1 Superficies de falla potenciales**

Distintos autores plantean diferentes posibilidades de las superficies de falla que deben considerarse en el cálculo de la resistencia a fricción de este tipo de perfiles. Parece claro que esta superficie de falla dependerá fundamentalmente que la adherencia entre el pilote y el suelo sea suficiente para que al momento de que exista el desplazamiento relativo, la porción de suelo incluida

entre los patines del perfil se mueva en conjunto con el perfil mismo. Si esto sucede, la superficie de falla que debe considerarse será la correspondiente al perímetro equivalente. Sin embargo, si el confinamiento que establecen los patines y el alma al suelo incluido en dichas zonas no es suficiente, esta porción de suelo no se desplazará junto con el perfil, por lo cuál la superficie de falla a considerar debería ser el perímetro completo de perfil.

Es de esperarse que estos mecanismos estén definidos fundamentalmente por la adherencia o fricción que exista entre el material del pilote y el suelo, las características geométricas del perfil, las propiedades mecánicas del suelo e incluso la naturaleza de comportamiento del suelo, ya sea cohesivo o friccionante.

Para el caso de pilotes en suelos friccionantes, el caso más común que se esperaría es aquel en el que el suelo no se desplaza junto con el perfil, ya que a diferencia del "pluggin" que se presenta en los perfiles tubulares, en los perfiles I el suelo no se encuentra totalmente confinado, por lo que el perímetro de falla esperado debería ser el perímetro total del perfil. Esta práctica es la que se desarrolla por ejemplo en Brasil en el cuál el uso de perfiles I de acero es en general para arenas.

Por otra parte, para los pilotes en suelos friccionantes, la superficie de falla debe estar definida por la comparación entre la adherencia entre el material del pilote y el suelo y la cohesión interna del suelo. Si la adherencia entre el pilote y el suelo es mayor que la cohesión interna del mismo, es de esperarse que la superficie de falla que se produzca sea en la interfaz suelo-suelo, siendo la menor superficie de falla posible la correspondiente al perímetro equivalente. Sin embargo, para el caso en que la adherencia entre el pilote y el suelo es menor que la cohesión interna del mismo, la superficie de falla tendría que desarrollarse en la interfaz pilote-suelo, la cuál necesariamente debe de ser a lo largo del perímetro del pilote.

Para poder definir cuál de las potenciales superficies de falla se desarrolla, puede realizarse un análisis comparativo de la resistencia de la superficie de falla mínima en la interfaz suelo - suelo ( $Q_{s(eq)}$ ) en el perímetro equivalente  $C_{eq}$  y la superficie de falla en la interfaz pilote-suelo ( $Q_{sl}$ ) en el perímetro del perfil  $C_l$  definidas en las ecuaciones 9.1.

$$(9.1) \quad Q_{s(eq)} = \int_0^L C_l \alpha c_a dz \quad \text{y} \quad Q_{sl} = \int_0^L C_{eq} c_a dz$$

Para los casos en que  $Q_{sl} \leq Q_{s(eq)}$  la superficie de falla que se desarrollará será aquella que corresponde al perímetro total del perfil y viceversa. Desarrollando esta desigualdad se puede establecer fácilmente que para los casos en que  $\alpha \leq C_{eq} / C_l$  la superficie de falla esperada será en la interfaz pilote-suelo, mientras que para  $\alpha > C_{eq} / C_l$ , la superficie de falla será aquella en la interfaz suelo-suelo. Recordemos que el factor  $\alpha$  define la relación que existe entre la adherencia entre el pilote y el suelo y la cohesión interna del mismo (Tomlinson 1987).

En la tabla 9.1 se muestran algunas relaciones de  $C_{eq} / C_l$  para algunos de los perfiles I recomendados para su uso como pilotes (Gerdau ,2015).

Perfil	mm x kg/m	$C_l$ (cm)	$C_{eq}$ (cm)	$C_{eq}/C_l$
IR	152 x 22.4	88.00	62.12	0.71
IR	152 x 29.7	89.00	63.86	0.72
IR	152 x 37.2	91.00	65.52	0.72
IR	203 x 35.9	103.00	75.24	0.73
IR	203 x 41.8	104.00	76.56	0.74
IR	203 x 46.2	119.00	83.40	0.70
IR	203 x 52.2	119.00	84.52	0.71
IR	203 x 59.3	120.00	85.84	0.72
IR	203 x 71.4	122.00	87.88	0.72
IR	203 x 86.6	124.00	90.32	0.73

**Tabla 9.1 Relaciones entre  $C_{eq}/C_l$  para algunos perfiles I comunes para el uso en pilotes.**

De la tabla 4 se puede observar que en la mayoría de los casos la relación  $C_{eq} / C_l$  oscila alrededor de un valor de 0.7, lo que significa que para arcillas en las cuales el factor  $\alpha < 0.7$  se esperará que la superficie de falla se presente en la periferia del pilote. Este es el caso para arcillas relativamente resistentes.

Es necesario desarrollar un trabajo más detallado acerca de las potenciales superficies de falla en distintos tipos de suelo y diferentes tipos y tamaños de perfiles, el cual considere pruebas numéricas con alguna técnica de elementos finitos y pruebas experimentales de carga en perfiles a escala natural.





# REFERENCIAS

- [1] AASHTO (2012), "AASHTO LRFD Bridge Design Specification". American Association of State Highway and Transportation Office, Washington, D.C.
- [2] Biddle, A.R. (1997). "Steel Bearing Piles Guide". Publication Number P156, The Steel Construction Institute (SCI). Askot, UK.
- [3] Bjerrum, L. (1957). "Norwegian Experiences with Steel Piles to Rock", *Geotechnique*, Vol. 7, pp. 73.
- [4] Bjerrum, L., Johannessen, I.J. y Eide, O. (1969). "Reduction of Negative Skin Friction on Steel Piles to Rock", *Soil Mechanics and Soil Foundations Conference Proceedings*, México, p.p. 27-92.
- [5] Booth, G.H., Cooper, A.W. e Wakerley, D.S. (1967). "Criteria of Soil Aggressiveness Towards Buried Metals – Part I, II e III" *British Corros. J.*, 2, May.
- [6] Bowles, J. E. (1997), "Foundation analysis and design", 5ta edición, McGraw Hill.
- [7] Bruce, D.W. (1979), "Corrosion of Steel Piles at BTP Tioxide Site at Hartlepool", Technical Note No T/CS/TN/19/79/D, British Steel Technical, Teesside Laboratories.
- [8] Budhu, M. (2008), "Soil mechanics and foundations", 3ra edición, John Wiley & Sons.
- [9] Das, B. M. (2001). "Fundamentos de ingeniería geotécnica", Thompson Learning.
- [10] Domingos F. (2004), "Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio", 3a Ed. Vol. 2, Gerdau Açominas, São Paulo, Brasil.
- [11] Domingos, F. (2015) "Durabilidad de Pilotes Metálicos enterrados en el suelo", Gerdau Corsa, tercera edición.
- [12] EC3 (2004), "Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 5: Piling", European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgium.
- [13] Gerdau (2015) "Manual de Pilotes Metálicos", Gerdau Corsa, tercera edición.
- [14] GIGS (2015). "Apuntes de la Universidad Politécnica de Madrid-Cimentaciones". Grupo de Ingeniería Grafica y Simulación. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- [15] IMCA (2014), "Manual de Construcción en Acero". 5ª Edición. Instituto Mexicano de la Construcción en Acero (IMCA). Editorial LIMUSA. México, D.F.
- [16] Mariaca L., Genesca J., Uruchurtu J., Hernández L.S. (1999), "Corrosividad atmosférica (MICAT-México). Plaza y Valdés S.A. de C.V. ISBN 968-856-707-8. México, D.F.
- [17] Mena, U. (2015). Comunicación personal.
- [18] Morley, J. (1977). "A Corrosion Examination of Extracted Larsen Piles", Report T/CS/906/3/77/C, British Steel Technical, Teesside Laboratories.
- [19] Morley, J. (1978). "A Review of the Underground Corrosion of Steel Piling", Report T/CS/1114/1/78/C, British Steel Technical, Teesside Laboratories.
- [20] Morley, J. Bruce, D.W. (1978). "A Corrosion Examination of an Extracted H-Bearing Pile: Scotswood Bridge", Report T/CS/906/5/78/C, British Steel Technical, Teesside Laboratories.
- [21] NBR 6122 (2010) "Projeto e Execução de Fundações", Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- [22] NTC (2004), "Norma Técnica Complementaria para el Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas". Gaceta Oficial. Departamento del Distrito Federal. México, D.F.
- [23] NTC-C (2004), "Norma Técnica Complementaria para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto". Gaceta Oficial. Departamento del Distrito Federal. México, D.F.
- [24] Osaki, Y. (1982). "Corrosion of Steel Piles Driven in Soil Deposits", *Soil and Foundations*, Vol. 22, No. 3, September.
- [25] Pancorbo, F. (1970). "Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación", Alfaomega. México D.F.
- [26] Phillips M. (2012), "Dealing with Piling Corrosion". *Piledriver Magazine*. Q2 2012, Vol. 9, No. 2, Pp. 95-99. Pile Driving Contractors Association. USA.
- [27] Rojas, S. (2015) "Apuntes de la Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería: Capitulo V: Tipos de Pilotes".
- [28] Romanoff, M. (1957). "Corrosion of Steel Piling in Soil", National Bureau of Standards, Monograph No. 58, US Dept. of Commerce, Washington, DC, USA.
- [29] Tamez González, E. (2001). Ingeniería de cimentaciones: conceptos básicos de la práctica. TGC Geotecnia, México.
- [30] Tomlinson, M.J. (1987) "Pile Design and Construction Practice" 3ra edición, Viewpoint Publications, Londres, Inglaterra.
- [31] Trethewey, K.R. e Chamberlain, J. (1988). "Corrosion for Students of Science and Engineering", Longman Scientific & Technical, Harlow, UK.
- [32] Urbina, R.F (2004), "Guía para el diseño de pilotes", Universidad de Piura. Perú.



# DIRECTORIO

## OFICINAS COMERCIALES

T. +52 55 5262 7300 / Av. Ejército Nacional 216 P.2, Anzures, Miguel Hidalgo, CDMX, 11590

## PLANTAS

### CD. SAHAGÚN

T. +52 791 913 8105 / Km. 3 Ctra. Mex – Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

### TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

### LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. De México, 54187

## DISTRIBUCIÓN

### CDMX

T. +52 55 5089 8930 / Año 1857 8, Ticomán, Gustavo A. Madero, CDMX, 07330

### MONTERREY

T. +52 81 8748 7610 / Blvd. Carlos Salinas de Gortari 404, Centro Apodaca, Nuevo León, 66600

## PATIOS DE CHATARRA Y CENTROS DE RECOLECCIÓN

### CD. SAHAGÚN

T. +52 791 9138 105 / Km. 3 Ctra. Mex – Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

### LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. de México, 54187

### LOS REYES

T. +52 55 5856 1651 / Tepozanes Los Reyes, Acaquilpan, México, 56428

### GUADALAJARA

T. +52 33 3668 0285 / 36702769 / Av. 18 de Marzo 531, La Nogalera, Guadalajara, Jalisco, 44470

### SAN JUAN

T. +52 55 2603 3275 / 5262 7359 / San Juan 675, Granjas Modernas, CDMX, 07460

### TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

### VERACRUZ

T. +52 229 923 1359 / Ctra. Fed. Aluminio L. 7 o Camino Puente Roto Km. 1.5, Nuevo Veracruz, Veracruz, 91726





**GERDAU** CORSA

El futuro se moldea

Somos más allá del acero.

[gerdaucorsa.com.mx](http://gerdaucorsa.com.mx)



**Gerdau Corsa. El futuro se moldea.**