

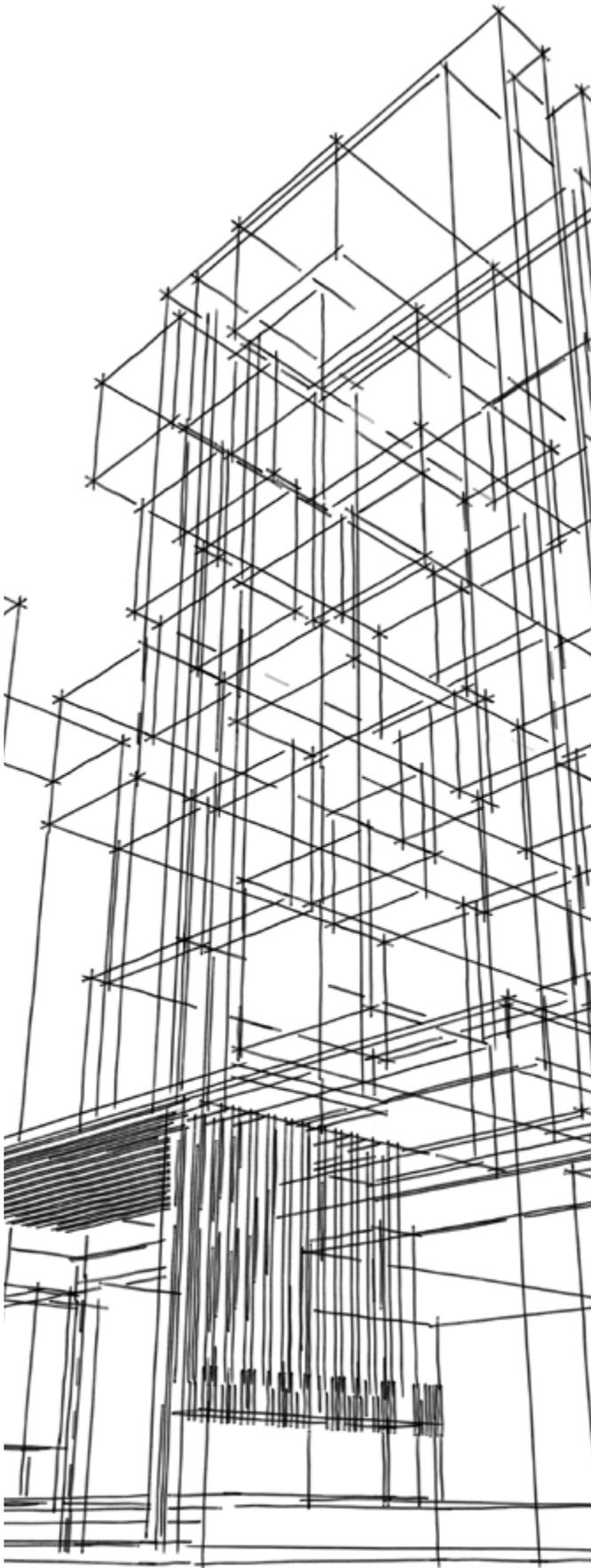
MANUAL DE PILOTES METÁLICOS SECCIÓN IR



Hazlo en grande, piensa en acero.

 **GERDAU** CORSA





NOTA

El contenido presentado en este manual se ha elaborado bajo principios generales de ingeniería y con base a pruebas experimentales reconocidas en el medio, por lo que se trata de información de consulta. Este manual no constituye una norma, especificación o reglamento y no se debe utilizar o depender de ella para aplicaciones específicas sin la supervisión y evaluación de un ingeniero especialista en mecánicas de suelos.

Quien haga uso de este material tiene la responsabilidad profesional de evaluar la aplicación de este manual y asume toda responsabilidad derivada de dicha utilización.

CONSULTORÍA

Urbano Alonso Consultoría
y Proyectos Ltda.
Geotecnia Global

REALIZACIÓN

Equipo de Desarrollo de Mercado y
Asistencia Técnica de GERDAU CORSA

DISEÑO

Artroom Innovative Thinking
Valeria Uribe

PRESENTACIÓN

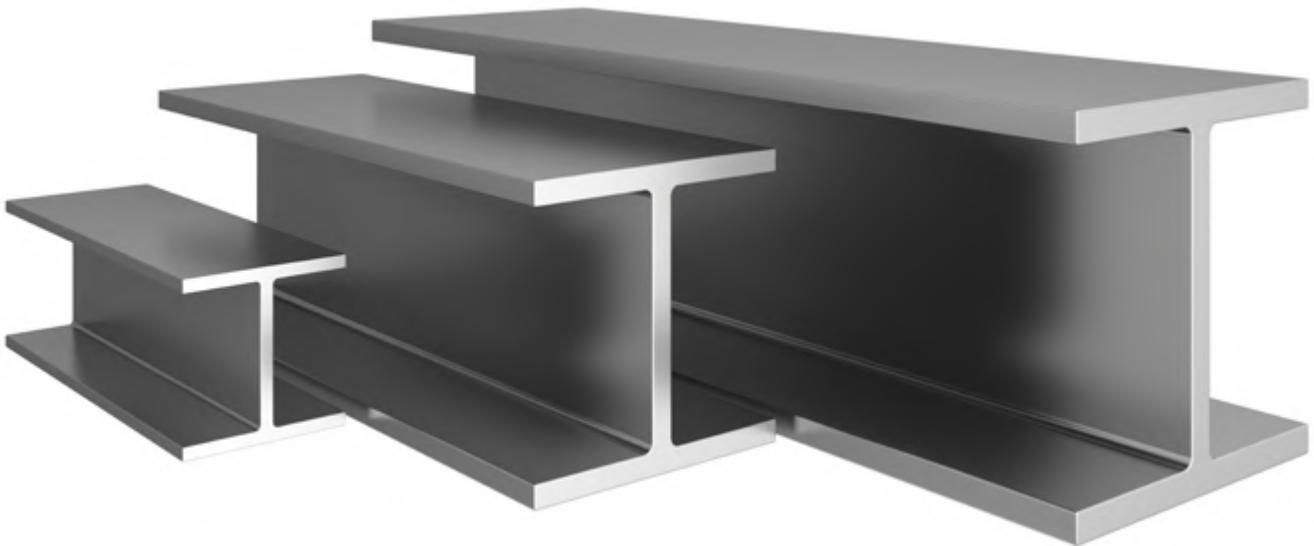
Esta es la segunda edición del Manual de Pilotes Metálicos Gerdau Corsa, haciendo referencia como antecedente la existencia del Manual de Pilotes Metálicos en su octava edición de la colección del “Uso del Acero” de GERDAU ACOMINAS en Brasil.

A través de este manual se pretende presentar y difundir información técnica de referencia basada en métodos de ingeniería aceptados por reglamentos, pruebas experimentales y de obras ejecutadas empleando perfiles metálicos como elementos de cimentación.

Continuando con la investigación técnica, GERDAU ha realizado diversas pruebas de carga estáticas y también pruebas de carga dinámica con el fin de entender mejor el comportamiento de carga-descarga de estas soluciones en particular y a lo que se refiere con la resistencia por fricción y resistencia desarrollada en la punta de los pilotes metálicos. Estas pruebas de carga forman parte de una base de datos que se mencionan en este manual para los profesionales interesados en el estudio de este tipo de soluciones, y que fueron utilizados como referencia para poder entender el comportamiento de los Pilotes Metálicos en suelo de diferente constitución.

Conjuntamente con los ensayos de carga estática, se realizaron pruebas instrumentadas con el uso de “*strain gages*”, que nos han proporcionado información importante en la interpretación del mecanismo de transferencia de carga, no solamente por fricción sino también en la punta del pilote. Es demostrado además, que cuando la punta se sitúa en suelos de baja resistencia no es válido considerar el área en la punta para el cálculo de resistencia del pilote. Dicho aporte a la resistencia solamente es aplicable en el caso de que la punta del pilote esté apoyada en suelo de alta resistencia o en estratos de roca sana.

Se abordan también consideraciones para la ejecución e hincado de los pilotes metálicos definiendo los diferentes procedimientos, equipos, describiendo las ventajas y limitaciones de cada metodología de hincado, así como las recomendaciones del tipo de uniones o empalmes de los pilotes entre sí y de los pilotes a la superestructura.



CONTENIDO

NOMENCLATURA

1. MANUAL DE PILOTES METÁLICOS GERDAU

- 1.1 Introducción
- 1.2 Propósito de este manual
- 1.3 Alcances del manual
- 1.4 Aplicaciones y características de los pilotes metálicos
 - 1.4.1 Aplicaciones
 - 1.4.2 Pilotes mixtos
 - 1.4.3 Ventajas

2. CRITERIOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE PILOTES METÁLICO

- 2.1 Diseño estructural
 - 2.1.1 Pandeo y capacidad estructural
 - 2.1.2 Capacidad de carga estructural trabajando como pilote
- 2.2 Diseño geotécnico
 - 2.2.1 Capacidad de carga geotécnica
- 2.3 Corrosión (Durabilidad de pilotes metálicos hincados en el suelo)
 - 2.3.1 Introducción
 - 2.3.2 El mecanismo electroquímico
 - 2.3.3 La corrosión de pilotes de acero
 - 2.3.4 Recomendaciones normativas respecto a la corrosión
 - 2.3.4.1 BS 8004:1986 “British Standard Code of Practice for Foundations”
 - 2.3.4.2 ENV 1993-5 “Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 5: Piling”
 - 2.3.4.3 LRFD Design Specifications for Highway Bridges da AASHTO
 - 2.3.4.4 NBR 6122: 1996 “Proyecto y ejecución de cimentaciones”
 - 2.3.4.5 Conclusiones
- 2.4 Pilotes de sección decreciente con la profundidad.

3. DETALLES Y RECOMENDACIONES PARA LA EJECUCIÓN E HINCADO DE PILOTES METÁLICOS

- 3.1 Uniones y conexiones de los pilotes metálicos

- 3.2 Unión de los pilotes a la cimentación
 - 3.2.1 Caso 1 - Pilotes comprimidos
 - 3.2.2 Caso 2 – Pilotes en tensión
- 3.3 Cabezales de concreto
- 3.4 Métodos de hincado
 - 3.4.1 Martillos de impacto
 - 3.4.2 Martillos diésel
 - 3.4.3 Martillos hidráulicos
 - 3.4.4 Vibro hincadores
 - 3.4.5 Hincado mixto (vibro hincador y martillo de impacto)

4. CONTROL Y MONITOREO DE PILOTES METÁLICOS

- 4.1 Pruebas dinámicas durante el hincado
- 4.2 Rechazo
- 4.3 Repique
- 4.4 Pruebas de cargas
 - 4.4.1 Dinámicas
 - 4.4.2 Estáticas
 - 4.4.3 Instrumentación

5. CASOS DE EJECUCIÓN DE OBRAS

- 5.1 Primera cimentación con pilotes metálicos Gerdau Corsa, hincadas con martillo vibratorio, ejecutada en Brasil.
- 5.2 Obras de hincado de pilotes en México.
 - 5.2.1 Hincado de pilotes para cimentación de equipos
 - 5.2.2 Hincado de pilotes para cimentación de columnas en naves industriales
 - 5.2.3 Hincado de pilotes para cimentación de edificio de oficinas
 - 5.2.4 Hincado de pilotes para recimentación de edificio de 4 niveles
- 5.3 Prueba de carga dinámica
 - 5.3.1 Prueba de carga dinámica para pilotes de acero

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7. ANEXOS

- 7.1 Ejemplo de aplicación
- 7.2 Tablas de capacidad estructural

NOMENCLATURA

| Designación | Descripción | Unidades |
|-------------|--|-------------------|
| b_f | Ancho del patín | L |
| c | Velocidad de propagación de onda en pilotes | LT ² |
| d | Peralte de la sección transversal del perfil | L |
| e | Distancia entre ejes de pilotes | L |
| f_u | Límite de resistencia del acero en tensión | F.L ⁻² |
| f_y | Límite de fluencia del acero | F.L ⁻² |
| h | Peralte de bloque | L |
| r_x | Radio de giro en el eje X-X | L |
| r_y | Radio de giro en el eje Y-Y | L |
| r_1 | Adherencia media suelo-pilote, en la ruptura | F.L ² |
| r_p | Resistencia unitaria (a la ruptura) del suelo en la punta del pilote | F.L ² |
| s | Rechazo del pilote | L |
| t_0 | Espesor del patín del perfil | L |
| t_w | Espesor del alma del perfil | L |
| A | Área del rectángulo envolvente a la sección transversal del pilote | L ² |
| A_p | Porcentaje del área "A" a considerar en la capacidad de carga del pilote | L ² |
| A_s | Área de sección | L ² |
| A'_s | Área útil de la sección transversal del perfil (reducida por corrosión) | L ² |
| C_2 | Deformación elástica del fuste del pilote | L |
| C_3 | Desplazamiento elástico del suelo debajo de la punta del pilote | L |
| E | Módulo de elasticidad del material del pilote | F.L ⁻² |
| G | Módulo de elasticidad de transversal del material del pilote | F.L ⁻² |
| I_x | Momento de inercia en eje X-X de la sección transversal del pilote | L ⁴ |
| I_y | Momento de inercia en eje Y-Y de la sección transversal del pilote | L ⁴ |
| L_n | Longitud de pandeo | L ⁴ |
| K | Rigidez | F*L |
| P | Carga estructural admisible del pilote | F |
| PL | Carga de ruptura por fricción lateral a lo largo del fuste del pilote | F |
| PP | Carga de ruptura del suelo bajo la punta del pilote | F |
| PR | Carga de ruptura del suelo que da soporte a un pilote | F |
| W_x | Momento resistente en eje X-X de la sección transversal del pilote | L ³ |
| W_y | Momento resistente en eje Y-Y de la sección transversal del pilote | L ³ |
| β | Coefficiente de dilatación térmica lineal | /°C |
| γ | Peso específico | F.L ⁻³ |
| γ_p | Coefficiente de ponderación de las resistencias | - |
| γ_p | Coefficiente de ponderación de las acciones | - |
| η_h | Constante del coeficiente de reacción horizontal | F.L ⁻³ |
| λ | Relación de esbeltez | - |
| ν | Coefficiente de Poisson del material del pilote | - |
| k_y | Coefficiente de pandeo | - |
| Q | Factor de reducción total asociado al pandeo local | - |
| γ_m | Coefficiente de ponderación medio de las acciones | - |
| Q | Factor de reducción asociado a la resistencia a la compresión | - |
| d' | Peralte efectiva del alma | L |
| λ_m | Relación de esbeltez reducida | - |
| λ_t | Relación de esbeltez límite del patín | - |
| λ_w | Relación de esbeltez límite del alma | - |

L = Longitud (mm, cm, m) F = Fuerza (N, kN, kgf, ton)
T = (minutos, segundos)

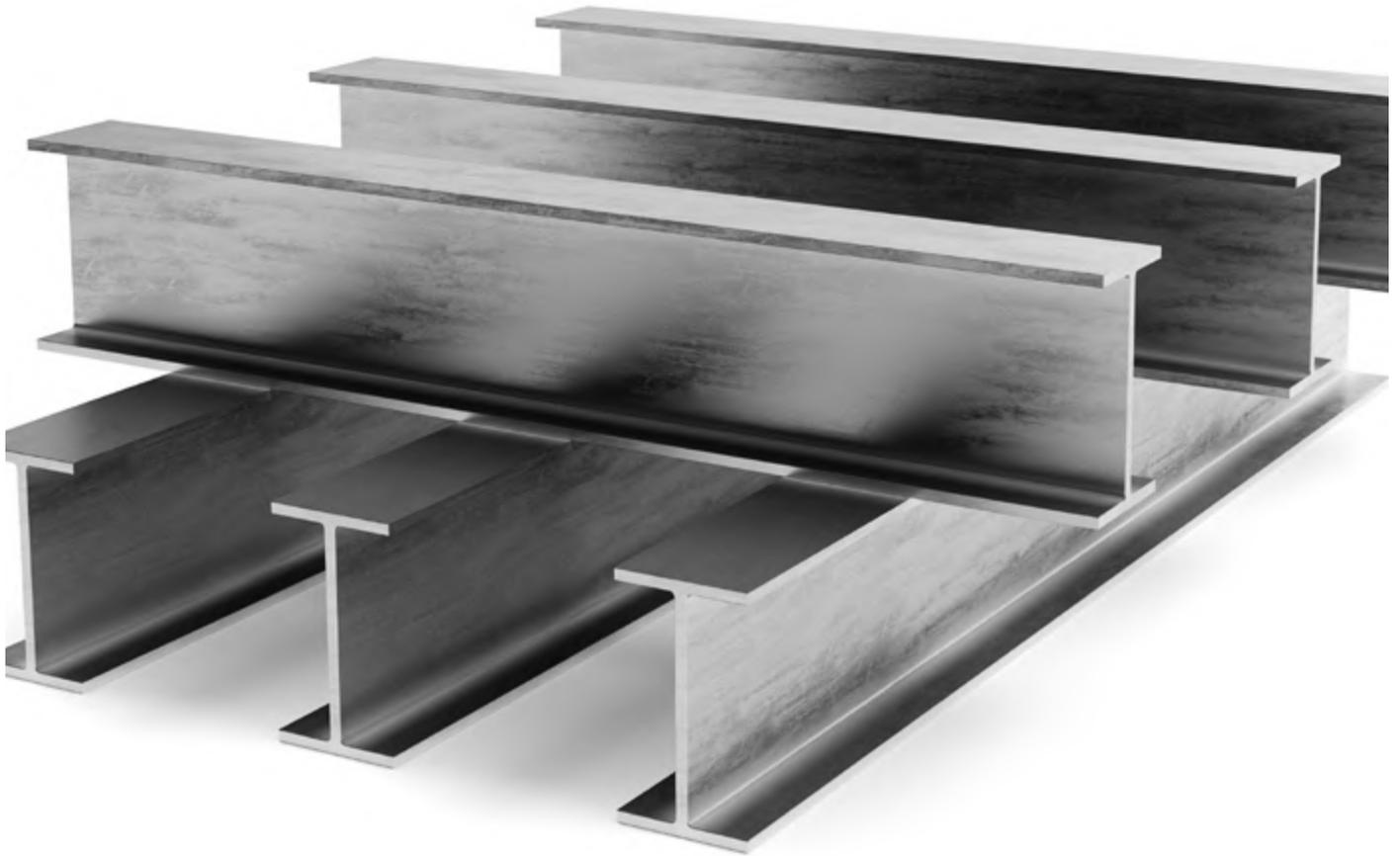
CARACTERÍSTICAS DEL ACERO ASTM A-572 GRADO 50 / A-992

| | |
|---|--|
| Límite de fluencia (f_y) | 345 MPa = 3,5 ton/cm ² |
| Límite de resistencia (f_u) | 50 MPa = 4,5 ton/cm ² |
| Módulo de elasticidad (E) | 200.000 MPa = 2.039 ton/cm ² |
| Coefficiente de Poisson (ν_p) | 0,30 |
| Módulo de elasticidad transversal (ν_p) | 77.000 MPa = 785 ton/cm ² |
| Coefficiente de dilatación térmica lineal (β) | 2×10^{-5} / °C |
| Peso específico (γ) | 77 kN/m ³ = 7,85 ton/m ³ |





1. MANUAL DE PILOTES METÁLICOS GERDAU



1.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el uso de pilotes ha sido la solución a problemas de cimentación de estructuras desplantadas en suelos poco competentes que requieren desplantar los elementos de la cimentación en estratos profundos con mejor comportamiento mecánico.

La evolución en los procedimientos constructivos y la necesidad de ejecutar obras de infraestructura rápidamente, han llevado a innovar en el tipo de material con que se fabrican los pilotes.

El uso de pilotes metálicos en un principio, se relacionaba directamente con usos en obras marítimas y portuarias con elementos tubulares de acero hincados en el lecho marino.

Hoy en día el sistema de pilotes metálicos en obras tierra adentro con secciones I o H ya es una realidad, GERDAU CORSA ha invertido en el desarrollo y difusión de información técnica que sirva a los profesionistas para diseñar soluciones de cimentación competitivas frente a sistemas tradicionales.

Los ingenieros que diseñen con esta solución de cimentaciones deben tomar en cuenta las mismas consideraciones que para cualquier otro tipo de cimentación, estimando todas las características del sitio y con base a un estudio detallado de mecánica de suelos que proporcione la suficiente información geotécnica para estimar con mayor apego a la realidad la capacidad de carga de los pilotes y para evaluar el método de hincado más adecuado para garantizar una buena ejecución en los trabajos de instalación de los pilotes.



1.2 PROPÓSITO DE ESTE MANUAL

El objetivo de este manual radica primordialmente en mostrar todos los factores involucrados para el diseño y ejecución de cimentaciones con pilotes metálicos. Recopilarlos en una guía técnica al alcance de profesionales de la práctica y brindarles una herramienta práctica sustentada en principios de ingeniería y pruebas de carga.

Desafortunadamente, la literatura al respecto es escasa o nula para países de habla hispana, y los pocos libros o publicaciones sobre el tema tienden a orientarse única y exclusivamente por consideraciones teóricas. Los ingenieros que diseñan y ejecutan a menudo encuentran esta información carente de aspectos prácticos. Uno de los principales objetivos de este manual es difundir y promover el uso de perfiles metálicos como elementos de cimentaciones profundas, de manera que el ingeniero tenga a la mano; procedimientos de diseño y ejecución de soluciones de cimentación.

1.3 ALCANCES DEL MANUAL

El manual está limitado a mostrar consideraciones sobre el diseño y ejecución de soluciones de cimentación con pilotes metálicos y consta técnicamente de dos partes: la primera mitad del manual cubre los aspectos de diseño de los pilotes metálicos incluyendo recopilación y análisis de consideraciones teóricas, así como aspectos geotécnicos y estructurales del diseño de los pilotes y métodos de verificación de la resistencia nominal mediante pruebas de carga; la segunda parte consta de información sobre el equipo de hincado, los accesorios y los procedimientos de inspección. Se incluyen anexos a este manual, resultados de pruebas de carga, así como tablas de la capacidad de carga estructural de los pilotes y casos de éxito realizados en México.

1.4 APLICACIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS PILOTES METÁLICOS

1.4.1 Aplicaciones.

Las cimentaciones con pilotes metálicos pueden ser usadas prácticamente en cualquier tipo de obra que requieran cimentación profunda como solución de cimentación e incluso en aquellas en que los elementos de cimentación son superficiales pero muy robustos, con el fin de economizar y agilizar el procedimiento constructivo. El uso de perfiles metálicos como parte de sistemas de contención de excavaciones ha sido un campo importante para el uso de elementos metálicos que son hincados parcialmente para soportar los empujes del suelo.

Otra aplicación se ha dado en obras carreteras en las defensas metálicas las cuales requieren perfiles hincados que integran el sistema de contención. Son utilizados también como soportes para paneles en parques fotovoltaicos.

1.4.2 Pilotes mixtos.

Cuando son usados como complemento de otro tipo de pilotes (por ejemplo, con prefabricados de concreto), los denominados pilotes mixtos pueden resolver varios problemas de cimentaciones profundas, según se muestra en las fotografías 1 y 2. En el primer caso (fotografía 1), el tramo metálico tiene como finalidad permitir el hincado de una longitud significativa del pilote en suelos arenosos compactos o arcillas rígidas a duras o para empotrar el pilote en estratos de roca.

En el segundo caso (fotografía 2), el segmento metálico tiene por finalidad permitir que el pilote mixto pueda ser hincado hasta alcanzar un estrato rocoso sin que haya riesgo de ruptura de la punta del pilote de concreto; es común que en los proyectos donde se encuentra roca, ésta se encuentra inclinada, imponiendo a la punta del pilote esfuerzos no uniformes durante el hincado. Estas tensiones dinámicas del hincado no pueden ser resistidas por el concreto, sino por la una punta metálica. El acero es un material que por deformaciones diferenciales redistribuye esos esfuerzos de contacto y los transmite de modo más uniforme a la sección de concreto.

Su aplicación más significativa ocurre en obras marítimas (muelles), donde es común la existencia de esas capas resistentes como estrato de cimentación, pero el pilote es proyectado con un largo estimado para resistir los esfuerzos elevados a los que estará sometido el elemento. El hincado de pilotes de concreto en este caso puede tornarse inviable debido a los problemas para alcanzar la profundidad definida por el proyectista. Así, el pilote mixto tendrá un tramo en concreto armado (región en contacto con el agua), y un trecho metálico (región hincada en el suelo), con un largo tal que permita atravesar los estratos del suelo de alta resistencia alcanzando la profundidad definida en proyecto manteniendo la integridad estructural del pilote.



Fotografía 1. Pilote mixto (concreto-perfil metálico), para atravesar suelos rígidos sin desplazamiento de terreno.



Fotografía 2. Pilote mixto (concreto-perfil metálico), para apoyo en roca.



1.4.3 Ventajas.

Son muchas las razones para su utilización ofreciendo ventajas sobre otros tipos de sistemas, entre las cuales resaltamos:

- *Bajo nivel de vibración durante el hincado, tanto con martillos de caída libre como con los martillos hidráulicos.*
- *Posibilidad de hincado en suelos de difícil penetración, como arcillas rígidas a duras, estratos rocosos, arenas mal graduadas sin el inconveniente de la “extracción” de pilotes vecinos existentes ya hincados (tal es el caso de los pilotes prefabricados de concreto y tipo “Franki”), y sin pérdidas por pilotes dañados (aspectos de costo y plazo).*
- *Resistencia a esfuerzos elevados de tensión (del orden de la carga de compresión, excepto cuando los pilotes se apoyan en roca), y de flexión (razón de su gran utilización en las estructuras de contención).*
- *Posibilidad de tratamiento a base de pintura especial, con la finalidad de reducir el efecto de la fricción negativa.*
- *Facilidad de corte y empalmes a modo de reducir desperdicios consecuentes de la variación de la cota de apoyo del estrato resistente, principalmente en suelos residuales.*
- *Pueden ser hincados en longitudes muy largas, no desplazan gran cantidad de material para su hincado, por lo que requieren menor energía y facilitan una mayor profundidad de empotre dentro de la capa dura.*
- *La sección transversal de un pilote metálico no necesita ser constante en toda su extensión, ya que la carga que en ella irá a actuar decrece con la profundidad. O sea, la sección de un pilote podrá variar (decrecer), con la profundidad, desde que atiende a la carga axial.*



2. CRITERIOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE PILOTES METÁLICOS

2.1 DISEÑO ESTRUCTURAL

2.1.1 Pandeo y capacidad estructural

En pilotes axialmente comprimidos que permanecen totalmente enterrados normalmente no ocurre pandeo. Esto sólo se debe verificar cuando los pilotes tengan su cota cabeza por encima del nivel del suelo, considerando la eventual socavación del terreno, o atraviesen suelos muy blandos.

Los pilotes metálicos con perfiles estructurales no sufren el efecto de pandeo, incluso al atravesar terrenos blandos. Para demostrarlo, tomaremos los perfiles, que tienen el menor radio de giro y por lo tanto tienen la mayor relación de esbeltez.

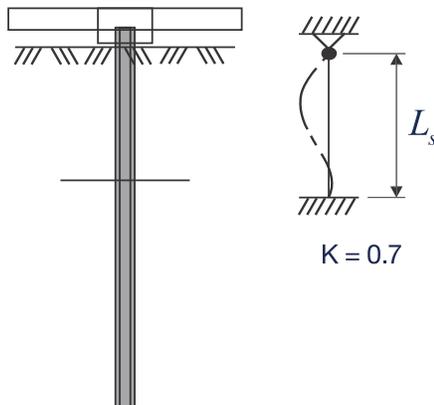
$$(\lambda = \frac{K_y L_s}{r_y})$$

Para este cálculo, adoptaremos la hipótesis de que la parte superior del pilote esté unido al cabezal (pilote articulado en el dado de concreto y empotrado a una profundidad "Ls"), calculado por el método de Davisson y Robinson [1]. Esta suposición es válida porque los pilotes trabajan, por lo general, en grupos unidos a un cabezal rígido donde no es necesario tener en cuenta las excentricidades de segundo orden en la aplicación de la carga.

El perfil estructural GERDAU CORSA que tiene el menor radio de giro es:

| | |
|---|--|
| IR 305 x 21.1 (W12x14) | $A_s = 26.80 \text{ cm}^2$ $r_y = 1.90 \text{ cm}$ $I_y = 98 \text{ cm}^4$ |
|---|--|

Para este perfil, la carga admisible a compresión se calcula como:



$$L_s = 1.8 \sqrt[5]{\frac{EI}{\eta_h}} \quad (\text{Davisson \& Robinson, [1]})$$

$K = 0.7$



Valor típico para arena poco compacta sumergida o arcillas suaves:

$$\eta_h = 0.0095 \text{ kg/cm}^3$$

$$L_s = 132 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{K_y L_s}{r_y} = \frac{(0.70)(132 \text{ cm})}{1.90 \text{ cm}} = 48.2 \text{ (esbeltez máxima)}$$

Según el IMCA [2], la carga estructural nominal a compresión considerando elementos esbeltos será:

Esbeltez local

$$\text{Patines} \rightarrow \frac{b_f}{2_t} = 8.60 < 0.56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 13.48$$

$$\text{Alma} \rightarrow \frac{d'}{t_w} = 58.32 < 1.49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 35.89 \rightarrow Q_a = 0.827$$

Por otro lado, el esfuerzo de pandeo elástico es calculado como:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = 848.9 \text{ MPa}$$

El esfuerzo crítico de la sección de acero entonces será:

$$F_{cr} = Q \cdot [0.658^{Q \cdot F_y / F_e}] F_y = 247.2 \text{ MPa}$$

A) Por lo tanto la carga resistente del perfil de mayor esbeltez de la serie, IR 305 x 21.1, trabajando como pilote enterrado en suelo de baja resistencia

$$P_R = \phi F_{cr} \cdot A_g = 0.9 \cdot F_{cr} \cdot A_g = 60.8 \text{ ton (LRFD)}$$

$$P_R = \frac{F_{cr} \cdot A_g}{\Omega_t} = \frac{F_{cr} \cdot A_g}{1.67} = 40.4 \text{ ton (Esfuerzos admisibles ASD)}$$

(B) La carga estructural admisible a la compresión del perfil IR 305x21.1 calculada con la reducción de la sección de 1.5 mm en todo el perímetro debido a la corrosión (50 años, terrenos industriales) según la Norma Europea EN 1993-5:2007 [3] será:

$$P_R = \phi F_{cr} \cdot A_g = 0.9 \cdot F_{cr} \cdot (11.18 \text{ cm}^2) = 25.3 \text{ ton (LRFD)}$$

$$P_a = \frac{F_{cr} \cdot A_g}{\Omega_t} = \frac{F_{cr} \cdot (11.18 \text{ cm}^2)}{1.67} = 16.8 \text{ ton (Esfuerzos admisibles ASD)}$$

Considerando que el valor calculado en (B), obtenido con el perfil más esbelto de la serie en suelo de baja resistencia es cerca del 40% mayor que el valor calculado en (A) antes de la corrosión. En estas condiciones, obtenido con una reducción de sección por corrosión en un suelo contaminado industrial y considerando el pandeo elástico de la sección, adoptaremos para la tabla de carga estructural admisible la expresión utilizada en (B) que deberá cumplir para perfiles utilizados como pilotes en suelos normales.

2.1.2 Capacidad de carga estructural trabajando como pilote.

Según la **Norma Europea EN 1993-5:2007** [3], los pilotes metálicos pueden ser dimensionados considerando una sección reducida de pilote descontando un espesor de sacrificio en todo el perímetro en contacto con el suelo. Ver Tabla 1.

Los pilotes metálicos que estén total y permanentemente enterrados, independientemente del nivel de agua freática, no requieren tratamiento especial, considerando un espesor indicado en la Tabla 1.

Tabla 1. Pérdida de espesor por corrosión [mm] para pilotes en suelos con o sin agua (Norma Europea EN 1993-5:2007).

| Vida útil del proyecto | 5 años | 25 años | 50 años | 75 años | 100 años |
|---|--------|---------|---------|---------|----------|
| Suelos naturales no alterados (arena, limo, arcilla, etc.) | 0.00 | .30 | 0.60 | 0.90 | 1.20 |
| Suelos contaminados y terrenos industriales | 0.15 | 0.75 | 1.50 | 2.25 | 3.00 |
| Suelos naturales agresivos (pantanos, salinas, turbas, etc.) | 0.20 | 1.00 | 1.75 | 2.50 | 3.25 |
| Rellenos compactados y no agresivos (arcillas, esquistos, arenas, limos) | 0.18 | 0.70 | 1.20 | 1.70 | 2.20 |
| Rellenos compactados agresivos (cenizas, escorias, etc.) | 0.50 | 2.00 | 3.25 | 4.50 | 5.75 |
| Rellenos no compactados y no agresivos (arcillas, esquistos, arenas, limos) | 0.09 | 0.35 | 0.60 | 0.85 | 1.10 |
| Rellenos no compactados agresivos (cenizas, escorias, etc.) | 0.25 | 1.00 | 1.63 | 2.25 | 2.88 |

Con base en lo explicado anteriormente la carga admisible estructural de los perfiles estructurales utilizados como pilotes será determinada por:

$$P_R = \phi F_t F_{cr} \cdot A_g \quad (2) \quad P_a = \frac{F_{cr} \cdot A_g}{\Omega_t} \quad (3)$$

(LRFD)

(ASD)

Y bajo las siguientes consideraciones

1) Como los pilotes enterrados, normalmente no presentan pandeo, conforme se mostró anteriormente, por lo que no es necesario reducir la capacidad de la sección salvo en casos extremos de suelos blandos o sueltos.

2) Para aceros grado 50 ($F_y = 345$ MPa), la mayor parte de las secciones son compactas:

- Todos los perfiles de la serie H son secciones compactas, o sea $Q = 1.0$.
- Algunos perfiles de la Serie "I", tienen alma que no atienden a los límites de esbeltez mencionados y pueden tener una pequeña reducción en la capacidad global del elemento, o sea $Q < 1.0$.

$$\text{Para el patín} \rightarrow \lambda_f = \frac{b_f}{2t_0} < 0.56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 13.48$$

$$\text{Para el alma} \rightarrow \frac{d'}{t_w} \Rightarrow 1.49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 35.87$$



Donde:

d'= Peralte efectivo del alma

3) Considerando que en muchos casos no se conoce el origen exacto de las cargas, adoptaremos, para una determinación de la carga estructural resistente (LRFD), y admisible (ASD), las cuales deberán compararse con las cargas factorizadas de la estructura.

4) Usaremos el área reducida ($A's$), que fue calculada descontándose del área bruta (A_s), un espesor de 1.0 mm de todo el perímetro del perfil, asumiendo un caso extremo de suelos industriales contaminados para una vida de la estructura de 75 años conforme a la Tabla 1.

Nota: Ver en el Anexo 7.2 la tabla de la carga estructural admisible para toda la serie de perfiles estructurales de GERDAU CORSA calculados sobre la base de la expresión (2), y teniendo en cuenta la reducción del espesor de 1.5 mm.

La carga admisible a adoptar para el pilote deberá atender también la carga geotécnica admisible, obtenida tras el análisis de los parámetros geotécnicos en donde se hincó el pilote. Se obtendrá esta carga admisible geotécnica usando uno de los métodos (teórico o semi-empíricos), de capacidad de comúnmente usados en la práctica.

Este manual técnico propone varios métodos de análisis y muestra a detalle el método de Alonso (4), para el cálculo de la capacidad de carga geotécnica del pilote.



2.2 DISEÑO GEOTÉCNICO

2.2.1 Capacidad de carga geotécnica.

La carga estructural admisible, también denominada carga característica, presentada en el Anexo I, es la máxima carga que el pilote podrá resistir, ya que corresponde a la resistencia estructural del acero que compone el pilote. Sin embargo, es necesario un pilote con una longitud tal que permita alcanzar esa carga desde el punto de vista del contacto pilote-suelo. Este procedimiento constituye lo que se denomina “previsión de la capacidad de carga”.

La figura 1 muestra dos situaciones de pilotes del mismo tipo, hincados en el mismo suelo. El caso (a) corresponde a pilotes con mismo perímetro “U” y misma área de punta “A”, pero con diferentes longitudes, de tal suerte que el pilote con mayor longitud presentará mayor capacidad de carga. Análogamente, el caso (b) presenta dos pilotes con la misma longitud, pero con perímetro “U” y área de punta “A” diferentes. En este caso el pilote de mayor perímetro y área presentará mayor capacidad de carga. Por lo tanto, el proyecto de una cimentación consiste en optimizar perímetros y áreas de punta en función de las características de resistencia del suelo y de las limitaciones de los equipos de hincado.

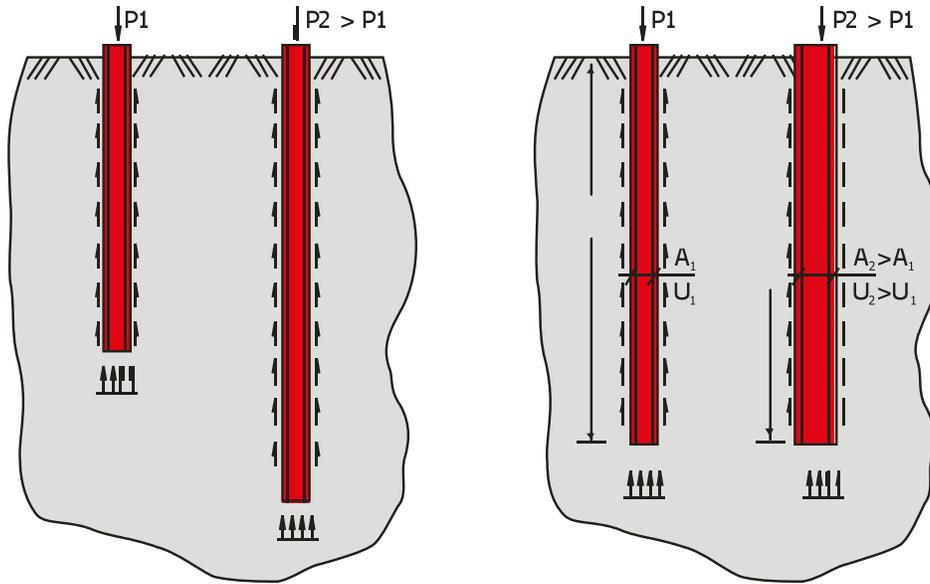
Es evidente que, en esa optimización y siempre que sea posible, se deben utilizar pilotes y equipos que permitan instalarlos en una longitud tal que la carga estructural admisible pueda ser alcanzada, pues ésta es la máxima carga que el pilote puede soportar. Pero no siempre eso es posible y, de una manera general, la carga admisible del pilote será menor a la mostrada en el Anexo I. Por esta razón es que no existen tablas de cargas admisibles de pilotes metálicos (o de otro tipo).

La estimación de la capacidad de carga puede llevarse a cabo por diferentes vías, ya sea mediante factores de capacidad de carga a partir de parámetros de resistencia al corte (mecánica de suelos clásica), o métodos empíricos basados en los resultados de exploraciones de campo. Debido al éxito en la difusión y práctica en el continente Americano de la Prueba de Penetración Estándar (SPT), y Cono Eléctrico (CPT); de entre ellos se destacan los siguientes métodos de análisis:

- o Meyerhof (1976), SPT*
- o Schmertmann-Nottinham (1978), CPT*
- o Normund & Thurman (1979), CPT*
- o Shioi and Fukui (1982), SPT*
- o Bustamante and Ganeselli (1982)*
- o Eurocódigos (1993) CPT*
- o Alonso (2008)*

En el anexo 7.1 se presenta un ejemplo del cálculo de la capacidad de carga de un pilote metálico por diversos métodos aquí citados y se presenta una comparativa de los resultados obtenidos.





Caso (a): Mismos U y A (perímetro y área) y diferentes longitudes.

Caso (b): Mismas longitudes diferentes U y A (perímetro y área).

Figura 1. Capacidad de carga de pilotes del mismo tipo en un mismo suelo.

Todos los métodos semi-empíricos parten del concepto mostrado en la figura 2, en el que la carga de ruptura geotécnica “PR” del suelo que soporta a un pilote es igual a la suma de dos factores:

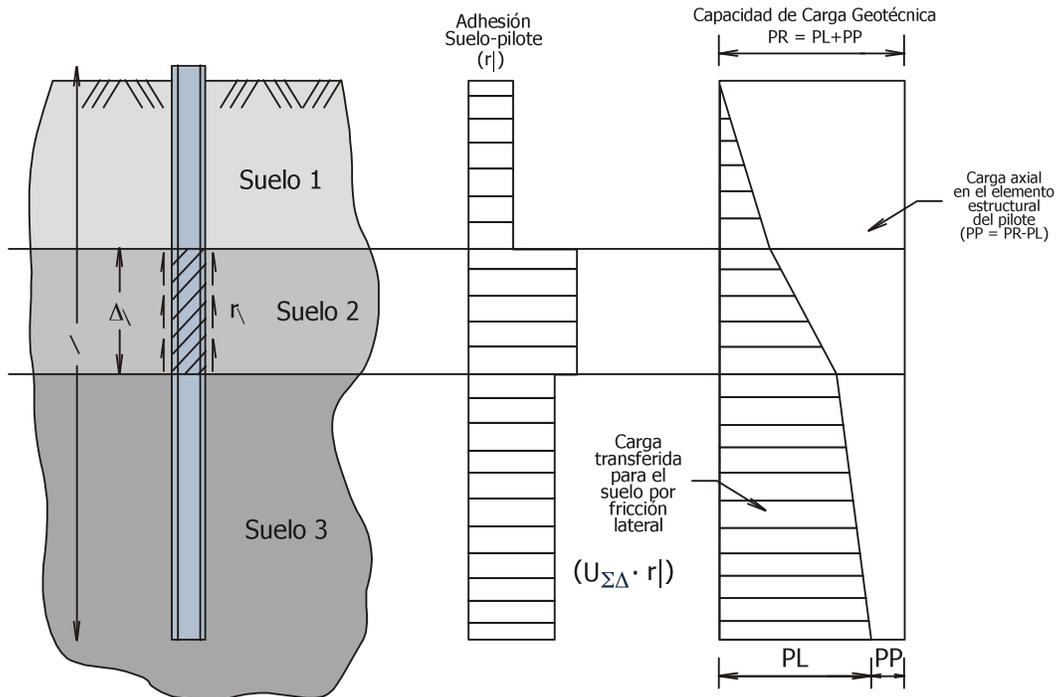


Figura 2. Capacidad geotécnica de pilotes metálicos.

$PR = PL + PP$ Capacidad de carga del suelo que da soporte al pilote
 $PL = U \cdot \sum \Delta_l \cdot r_l$ Capacidad de carga por fricción lateral a lo largo del fuste del pilote
 $PP = A_p r_p$ Capacidad de carga debido a la punta del pilote
 $U =$ Perímetro desarrollado en la sección transversal del pilote
 $\Delta_l =$ Tramo de suelo donde se admite r_l constante
 $A_p =$ Área de la punta del pilote que contribuye para la capacidad de carga (su valor máximo será de $b_f \cdot d$)

La diferencia entre los diversos métodos de capacidad de carga está en la evaluación de los valores de r_l y r_p , ya que los demás factores involucrados son geométricos.

Se propone estimar la carga admisible geotécnica de acuerdo al método presentado por Alonso en 2008 en SEFE VI [4].

Según este autor el área en la punta del pilote, cuando el suelo es poco resistente, debe ser considerada como se muestra en la figura 3.

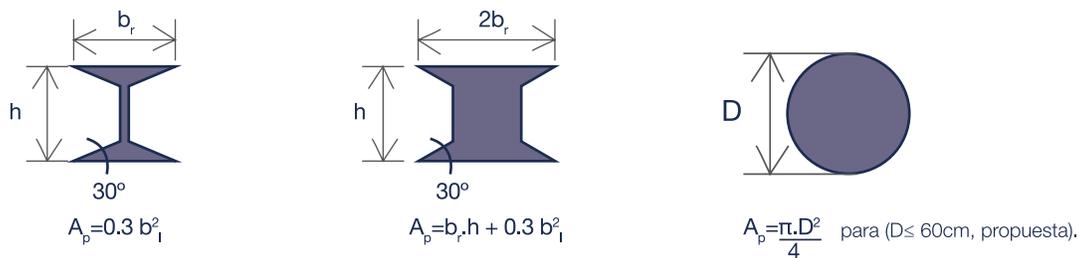


Figura 3. Área de la punta del pilote metálico que contribuye a la capacidad de carga geotécnica en suelos poco resistentes.

Para la adherencia lateral r_l , Alonso propone:

$$r_l = 0.28 N_{\text{SPT}} < 20 \text{ ton/m}^2$$

Para la resistencia unitaria de punta r_p , Alonso propone:

$$r_p = K \cdot N_{\text{SPT}} \text{ siendo:}$$

$K = 40 \text{ ton/m}^2$ para arenas
 $K = 30 \text{ ton/m}^2$ para arenas limosas y arcillosas
 $K = 25 \text{ ton/m}^2$ para limos
 $K = 15 \text{ ton/m}^2$ para arcillas



2.3 CORROSIÓN (DURABILIDAD DE PILOTES METÁLICOS HINCADOS EN EL SUELO)

2.3.1 Introducción.

Los pilotes de acero se han utilizado en todo el mundo desde hace más de 120 años y su durabilidad ha superado todas las estimaciones teóricas de durabilidad, especialmente en suelos muy agresivos o contaminados por productos químicos. No hay casos reportados en la literatura internacional de falla estructural causada por corrosión de pilotes de acero. La abundante literatura disponible ha indicado que los suelos naturales son tan deficientes en oxígeno que el acero no es apreciable afectado por la corrosión, independientemente del tipo de suelo y de sus propiedades. Características tales como el tipo de suelo, drenaje, resistividad eléctrica, pH o la composición química no son de validez en la determinación de la corrosión de un suelo.

Este artículo técnico discurre sobre los mecanismos básicos que participan en el proceso de corrosión de pilotes de acero enterrados en el suelo y de como la falta de oxígeno acaba por controlar todo el proceso. El artículo relata también los requisitos de sobre-espesor metálico prescritas en algunos códigos internacionales y en la norma brasileña.

Cabe señalar no hay algún estudio en específico respecto al tema, pero es de esperar que los procesos de corrosión sean prácticamente los mismos que se han estudiado en normas internacionales.

2.3.2 El mecanismo electroquímico.

La corrosión metálica en el medio acuoso es un proceso fundamentalmente electroquímico. Para que ello ocurra, reacciones de oxidación (por ejemplo: Disolución del metal, formando iones solubles) y reacciones de reducción (como, por ejemplo, la reducción del protón o el oxígeno) deben acontecer simultáneamente sobre la superficie metálica. Las reacciones de oxidación liberan electrones que, fluyendo a través del metal, son consumidos por las reacciones de reducción.

Las reacciones de oxidación y de reducción, por lo tanto, están conectadas por el flujo de electrones en el interior del metal y por un flujo de iones en el medio acuoso. Así pues, todo el proceso está condicionado a la existencia de un electrolito, por donde los iones pueden difundirse, y del mantenimiento, junto a la superficie metálica, de las especies químicas que puedan mantener las reacciones de reducción activas.

Por ejemplo, la corrosión del acero en las soluciones acuosas ácidas aireadas ($\text{pH} < 4$) puede ser descrita de manera sintética como lo muestra la figura 4.

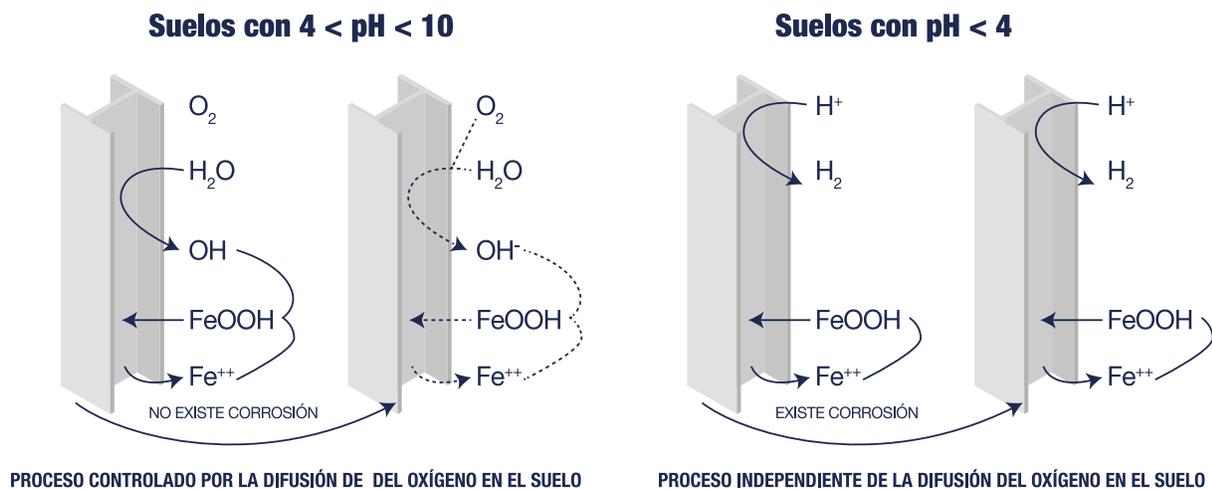
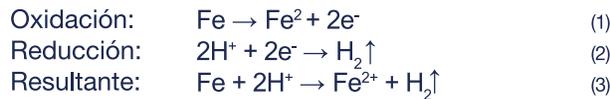
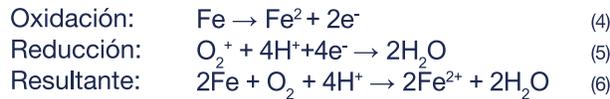


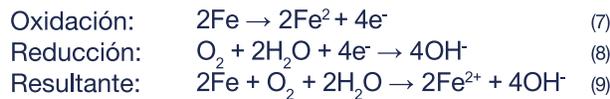
Figura 4. Ilustración del comportamiento de los pilotes de acero enterrados en suelos con diferentes pH's. Pilotes inmersos en suelos con $\text{pH} > 4$ no presentan corrosión, pues dependen de la difusión de oxígeno en el suelo, que es muy pequeña. Por otro lado, pilotes (de acero o concreto), enterrados en suelos con $\text{pH} < 4$ presentan corrosión, pues la reacción catódica es independiente de la difusión del oxígeno.



Como segundo ejemplo, tenemos la corrosión del acero en soluciones acuosas aireadas cuyo pH Situado entre 4 y 6:



Un tercer ejemplo trata de la corrosión del acero en soluciones acuosas aireadas en las que el pH está situado entre 6 y 10:



Así mismo la reacción de disolución metálica ($\text{M} \rightarrow \text{M}^{n+}$) se une a la reacción catódica ($\text{O} \rightarrow \text{R}$), formando una reacción global:



Estas regiones, espacialmente distintas, son como el ánodo (el lugar donde ocurre una disolución metálica) y el cátodo (el lugar donde se produce la reacción de reducción).

Como los electrones son liberados por la reacción anódica y consumidos por la reacción catódica, la corrosión puede considerarse en términos de una corriente electroquímica que fluye del área anódica para el área catódica.

2.3.3. La corrosión de pilotes de acero.

La reacción global que describe la oxidación de un pilote hincado en el suelo en un suelo con $\text{pH} \approx 7$ puede ser descrita por las mismas reacciones (Anteriormente 7 - 9).

Siempre que haya libre de tránsito de los iones en el suelo, tendremos la combinación, en la fase acuosa, de los iones Fe^{2+} y OH^{-} , formando el $\text{Fe}(\text{OH})_2$.

Habiendo un cierto oxígeno disponible, esta especie química se convertirá rápidamente en FeOOH (Óxido) sobre la superficie metálica. Por lo tanto, se supone que la velocidad de corrosión es controlada tanto por el proceso anódico como catódico.

Para que la corrosión ocurra el agente oxidante debe llegar a la superficie del acero. Del mismo modo, los productos de reacción deben eliminar de la superficie metálica a través del transporte hacia el interior del electrolito, es decir, del agua existente entre las partículas constituyentes en el caso del suelo. Si el transporte de masa de los reactivos o productos es lento, la concentración de elementos químicos próxima a la superficie del pilote será bastante diferente de aquellas verificadas en el seno del suelo, distante de la ciudad.

Bajo estas nuevas condiciones, las reacciones envueltas en el proceso de corrosión acaban por consumir especies químicas que, debido a la difusión no se repiten rápidamente. Debido al hecho de que la velocidad de la reacción catódica es proporcional a la concentración del reactivo en la superficie metálica, la velocidad de reacción será limitada por la disminución de la concentración oxidante. De este modo, el proceso de corrosión será totalmente controlado por el transporte de masa.

Tres mecanismos contribuyen al desarrollo transporte de masa en el interior del electrolito:





Difusión, convección y migración. Para las especies neutras tales como el oxígeno disuelto y para las especies iónicas presentes en las pequeñas cantidades en el suelo, las contribuciones de la migración y la convección son despreciables. El transporte se produce, básicamente, por difusión. La descripción del transporte por difusión se realiza en general, por el modelo de la capa de difusión de Nerst (una simplificación de la ecuación de Fick), que postula que el volumen de electrólito puede ser dividido en dos regiones.

El oxidante (O), se transportará a una velocidad que es proporcional al gradiente del mismo. Perfil concentración-distancia. Este es la postura de la primera ley de Fick, que se aplica bajo condiciones de equilibrio, es decir, la concentración del oxidante y el gradiente de concentración son con el tiempo:

$$J = -D \left[\frac{\delta C_o}{\delta x} \right] \quad (11)$$

Fotografía 3. Pilote metálico del Puente Wandenkolk, removido después de más de 20 años de uso.

Donde J es el flujo, D es la constante de proporcionalidad conocida como coeficiente de difusión y Co es la concentración en el punto x.

La línea continua en la figura 4 representa el perfil de la concentración calculada por la Ley de Fick. Se puede obtener un análisis simplificado a través de la linealización del perfil concentración-distancia de acuerdo con el tratamiento conocido como capa de difusión de Nerst.

La resistencia al transporte de masa ocurre dentro de la capa de difusión y la linealización proporciona una clara demarcación en la distancia de la superficie metálica, de modo que, para la concentración del oxidante en el suelo es mantenida por procesos de convección (que no se producen de manera apreciable). En contraste, para $x > \delta$, el reactivo "O" se transporta hasta sólo por difusión.

Utilizando el tratamiento simplificado, la eq. (11), se puede escribir como:

$$J = \frac{-D (C_o^{\text{superficie}} - C_o^{\text{interior}})}{\delta} \quad (12)$$

Donde $C_o^{\text{Superficie}}$ es la concentración del reactivo (Catódico) en la superficie $x = 0$ y C_o^{Interior} es la concentración para $x \geq \delta$. Para que el estado de equilibrio se mantenga, todo el reactivo transportado debe reaccionar electroquímicamente, generando una corriente:

$$\frac{(i_{\text{catódico}})}{nF} = \frac{-D (C_o^{\text{superficie}} - C_o^{\text{interior}})}{\delta} \quad (13)$$

Bajo la condición límite $C_o^{\text{Superficie}} \rightarrow 0$ una corriente máxima se obtiene:

$$(i_{\text{catódico}})_{\text{límite}} = \frac{nFD C_o^{\text{superficie}}}{\delta} \quad (14)$$

Como esta es la máxima corriente catódica que puede fluir, esta también representa la máxima velocidad de corrosión que puede alcanzarse:

$$(i_{\text{corrosión}})_{\text{max}} = (i_{\text{catódico}})_{\text{límite}} = \frac{nFD C_o^{\text{superficie}}}{\delta} \quad (15)$$

La ecuación anterior indica que, para una reacción catódica controlada por el transporte de masa la velocidad es directamente proporcional a la concentración del reactivo catódico y es inversamente proporcional al espesor de la superficie de la capa de difusión, que está determinada por la velocidad del fluido.

Un punto fundamental, ya visto anteriormente, debe ser resaltado: para que la corrosión del pilote ocurra, en suelos cuyo pH se sitúa entre 4 y 10 (es decir, casi la mitad de la totalidad de los suelos naturales encontrados), se hace necesaria la presencia simultánea de agua y oxígeno. En ausencia de uno de ellos, no se producirá la corrosión.

Es justamente esta la situación que se observa en la mayoría de los suelos naturales encontrados:

La concentración de oxígeno es tan pequeña por debajo del primer metro de suelo que la velocidad de corrosión se vuelve pequeña. Esto es por lo que los resultados experimentales disponibles han revelado que el acero no es apreciablemente afectado por la corrosión, independientemente del tipo de suelo o de las propiedades del sitio. En la condición específica e inusual de suelos con $\text{pH} < 4$, la baja concentración de oxígeno en el suelo ya no es a causa del ambiente, ya que ahora es independiente de la existencia del oxígeno. Pilotes inmersos en suelos con esta condición, independientemente de su constitución, acero o concreto, necesitarán protección contra el riesgo del ataque corrosivo.

La figura 4 ilustra el comportamiento de los pilotes de acero inmersas en suelos con diferentes PH.

Es importante resaltar que la adición de cobre a los aceros estructurales no parece tener ningún efecto apreciable en la reducción de la velocidad con que se corrompen cuando se sumergen en el suelo o en la superficie (Morley y Bruce 1983). Por lo tanto, no se justifica el uso de aceros estructurales resistentes a la corrosión atmosférica, como los aceros laminados, en estructuras enterradas.

2.3.4 Recomendaciones normativas.

La corrosión de pilotes de acero hincados en el suelo se ha estudiado extensivamente (Bjerrum 1957, Booth et al. 1967, Bruce 1979, Morley 1977, Morley y Bruce 1978c, Steel Bearing Piles Guide 1977, Trethwey 1988). Una revisión de Morley (1978a), utilizando los datos obtenidos en Inglaterra y en otros países, concluye que, a menos que el suelo sea extremadamente ácido ($\text{pH} < 4$), la corrosión de los pilotes hincados en suelos naturales es despreciable, independientemente del tipo de suelo y de sus características. El pequeño ataque es atribuido a los bajos niveles de oxígeno en los suelos naturales.

Las observaciones de estas pruebas se pueden encontrar en las prescripciones de durabilidad de códigos internacionales, como la BS 8004 (1986), el código AASHTO (1994) y Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 5: Piling (1993), que se detallarán a continuación.



2.3.4.1 BS 8004:1986 British Standard Code of Practice for Foundations.

La Norma Inglesa BS 8004 (1986), en su más reciente versión, afirma que la velocidad de corrosión pilotes de acero hincados en suelos naturales, incluyendo suelos de playas, ríos, lagos, suelos marinos y puertos, es muy pequeña, independientemente del tipo de suelo encontrado.

Las propiedades del suelo tales como composición química, resistividad, potencial redox y pH no son de ayuda en la previsión de la velocidad de corrosión son del acero. Por el contrario, su uso parece acarrear una sobreestimación de las velocidades de corrosión.

La norma cita un gran número de casos, como Romanoff (1957), Shreir (1976), Morley (1978b), Beckwith (1979), Eadie (1979), Eadie y Kinson (1980) y Morley y Bruce (1983). La lectura de estos artículos muestra que, en muchos casos, los espesores residuales del pilote de acero hincado en suelos naturales se encuentran dentro de las tolerancias de los espesores de laminación, incluso después de muchas décadas de servicio.

2.3.4.2 ENV 1993-5 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 5: Piling.

Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 5: Piling (1993), indica que el espesor a ser descontado del pilote es función de las características del suelo y de la vida útil del proyecto la tabla 2 contempla la recomendación del Eurocode.

Se considera que las velocidades de corrosión de terrenos compactados sean menores que las encontradas en terrenos no compactados, donde el contenido de oxígeno es muy superior. Así, los valores prescritos en la Tabla 2 para los terrenos deben dividirse en dos, en caso de que el terreno deba considerarse compactado. Es importante resaltar que Eurocode reúne la experiencia práctica de muchos países europeos, con diferentes condiciones de clima y suelos, que hace que su uso sea extremadamente amplio y confiable.

2.3.4.3 LRFD Design Specifications for Highway Bridges da AASHTO.

La AASHTO considera que los pilotes de acero hincados en suelos naturales no se ven afectados de manera considerable por la corrosión, y por lo tanto ninguna protección es necesaria. La corrosión localizada, puede ocurrir en la parte superior del pilote en ciertos suelos aerados. Sin embargo, estas áreas normalmente se protegen de la corrosión a través de recubrimientos de concreto.

Tabla 2. Pérdida del espesor (mm) debido a la corrosión en pilotes de acero enterrados en diferentes tipos de suelos independientemente del nivel de aguas freáticas.

| VIDA ÚTIL DEL PROYECTO | 5 años | 25 años | 50 años | 75 años | 100 años |
|--|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Suelos naturales (arenas, limos arcillas) | | 0.30 | 0.60 | 0.90 | 1.20 |
| Suelos naturales contaminados y vertedores industriales. | 0.15 | 0.75 | 1.50 | 2.25 | 3.00 |
| Suelos naturales agresivos (pantanos) | 0.20 | 1.00 | 1.75 | 2.50 | 3.25 |
| Suelos no compactados y no agresivos (arcillas, arenas, limos) | 0.18 | 0.70 | 1.20 | 1.70 | 2.20 |
| Suelos no compactados y agresivos (cenizas, escorias etc.) | 0.50 | 2.00 | 3.25 | 4.50 | 5.75 |

El código presenta, al igual que el Eurocode, ciertas condiciones del suelo que son indicativos de su posible agresividad:

1. Suelos con resistividad menor que $100 \Omega\text{mm}^{-1}$
2. Suelos con $\text{pH} < 5,5$
3. Suelos con $5,5 < \text{pH} < 8,5$ que contienen un alto contenido de materia orgánica
4. Suelos con $(\text{SO}_4^{2-}) > 0.10\%$
5. Terrenos recientes o suelos que contengan cenizas
6. Suelos sujetos al drenaje de minas o de industrias
7. Mezclas de suelos altamente alcalinos, de alta y baja resistividad

Como respuesta, tenemos que los pilotes hincados en suelos naturales no necesitan ningún tipo de protección.

Para los suelos que posean una o más de las condiciones descritas anteriormente, se convierte necesaria una evaluación técnica para establecer el mejor modo de protección requerido (Por ejemplo, pintura, protección catódica, etc.).

Es importante resaltar que estas condiciones son válidas tanto para el acero como para el concreto.

2.3.4.4 NBR 6122: 1996 “Proyecto y ejecución de cimentaciones”.

La Norma Brasileña NBR 6122 (1996), prescribe que los pilotes de acero deben resistir a la corrosión por la propia naturaleza del acero o por tratamiento adecuado. De la misma manera que los códigos internacionales, indica que los pilotes, cuando son hincados en suelos naturales, independientemente de la situación del nivel freático, dispensan cualquier tratamiento especial una visión compartida por el código norteamericano.

Sin embargo, en el párrafo 7.8.2.3.2, afirma que “cuando el pilote trabaja total y permanentemente enterrado en suelo natural, se debe descontar de su espesor 1.5 mm por que pueda entrar en contacto con el suelo, exceptuando los pilotes que dispongan de protección especial contra la corrosión.”

Aunque no existen registros claros del origen de esta imposición, parece orientarse del código inglés, visto anteriormente. Es importante resaltar que la BS 8004 (1986) utiliza, en esta prescripción, datos procedentes de Inglaterra y también de otros países. Se han incorporado algunos datos japoneses (Osaki 1982), obtenidos en algunos suelos especiales ($\text{PH} < 4$). Así pues, el valor sugerido para el descuento de espesor prescrito por la BS 8004 (1986) es, sabidamente, exagerado. Trae un enfoque más realista: Un conjunto muy grande de datos fue analizado, y los datos obtenidos en aquella región específica de Japón acabó siendo “diluidos” en el gran, conjunto de datos considerado.

2.3.4.5 Conclusiones.

Los pilotes de acero hincados en el suelo presentan una gran durabilidad debido a la baja concentración y difusión del oxígeno en los suelos naturales. Así, el control del proceso de la corrosión es dada por el transporte de masa (del oxígeno) hasta la superficie metálica, limitando el proceso de reducción catódica.

Algunos de los códigos más importantes normativas internacionales consideran que la corrosión del pilote, en suelos naturales, es muy pequeña, o incluso inexistente: el código norteamericano no recomienda sobre-espesor; el Eurocode muestra una tabla donde se presenta el sobre-espesor a ser aplicado, que es función de las características del suelo y de la vida útil del proyecto de la cimentación.

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 de corrosión, aunque no indican un valor mínimo para cada caso. También sugieren colocar protección especial cuando se considere necesario.



2.4 PILOTES DE SECCIÓN DECRECIENTE CON LA PROFUNDIDAD

Hasta 2006, los pilotes metálicos se proyectaban utilizando únicamente perfiles de sección constante. Sin embargo, conforme se puede ver en la figura 5 la carga axial que deberá ser resistida por un pilote metálico disminuye con la profundidad, desde el valor máximo (PR), en la cabeza, hasta el valor mínimo en la punta (PP). Como estos valores de carga son consecuentes de los valores de “ruptura” del suelo, la carga (admisible o característica) a ser resistida por el pilote equivale a la mitad de ese valor, o sea, $P = PR / 2$ en el tope. Así, se puede concluir que la sección transversal de un pilote metálico no necesita ser constante a lo largo de toda su longitud, ya que la carga que actuará disminuye con la profundidad. O sea, la sección de un pilote podrá variar (decrecer), con la profundidad, desde que atiende la carga axial (con los respectivos coeficientes de ponderación), mostrados en la figura 5.

Este es un concepto nuevo, desarrollado en 2005 por Alonso, e introducido al mercado brasileño en el año de 2006, y denominado “pilotes metálicos de sección transversal decreciente con la profundidad”, que tiene como ventaja principal la reducción de peso en los pilotes metálicos. Es decir, con la variación decreciente de la sección transversal de los pilotes, se pueden lograr idénticas capacidades de carga con una economía sustancial en el peso de las mismas.

El concepto es muy simple y se basa en la utilización de perfiles de un mismo grupo para componer los pilotes de sección transversal decreciente. Son considerados perfiles de un mismo grupo, aquellos cuyas medidas son de la misma altura nominal, con variaciones en el espesor del alma y patín (variación de masa, pero sin un cambio significativo en el perímetro). Siendo del mismo grupo, las uniones de los perfiles de diferentes dimensiones serán ejecutadas con facilidad, idénticas a los pilotes con perfiles de misma sección.

Los Perfiles Estructurales GERDAU CORSA, disponibles en amplia variedad de medidas para un mismo grupo, ofrecen extraordinaria flexibilidad para el uso de este nuevo concepto de pilotes. Usando como ejemplo las medidas del grupo con 305 mm (4 diferentes tipos de perfil IR), el perímetro varía entre el de menor al de mayor peso de 0.5% al 2%, en cuanto a las reducciones de masa van de 13% a 58%. Dependiendo, obviamente, del proyecto, de la condición de la obra y de la combinación de los diferentes perfiles que compondrán los pilotes, se puede economizar, de una manera general, para pilotes “largos”, entre 15% a 25% de peso total de los pilotes metálicos de una obra, utilizando sección transversal decreciente.

Es recomendable analizar la aplicación de este nuevo concepto en toda y cualquier obra que requiera el uso de cimentaciones profundas, con pilotes compuestos, por lo menos, por dos secciones de perfiles. Como para cualquier otra solución, el tipo de suelo necesita ser considerado, pero, en los estudios ya realizados, la aplicación de pilotes metálicos de sección transversal decreciente se ha mostrado alta eficiencia, principalmente para diferentes tipos de suelo en estado natural.

En Brasil, obras ya fueron realizadas utilizando este nuevo concepto y para comprobar la eficiencia de esta solución, se han realizado rigurosas pruebas de cargas.

Para entender este nuevo concepto se presentan los resultados de una obra en la ciudad de Santos (SP), cuya capacidad de carga geotécnica fue obtenida en base al método de Alonso (2008), que da origen a la tabla 3 que se resume en la figura 4. Conforme se verifica la carga axial de compresión aplicada en el pilote se puede ver como decrece con la profundidad, de un valor máximo (PR), en la parte superior a un valor mínimo (PP), en la punta.



Tabla 3. Transferencia de carga utilizando el método Alonso (2008).

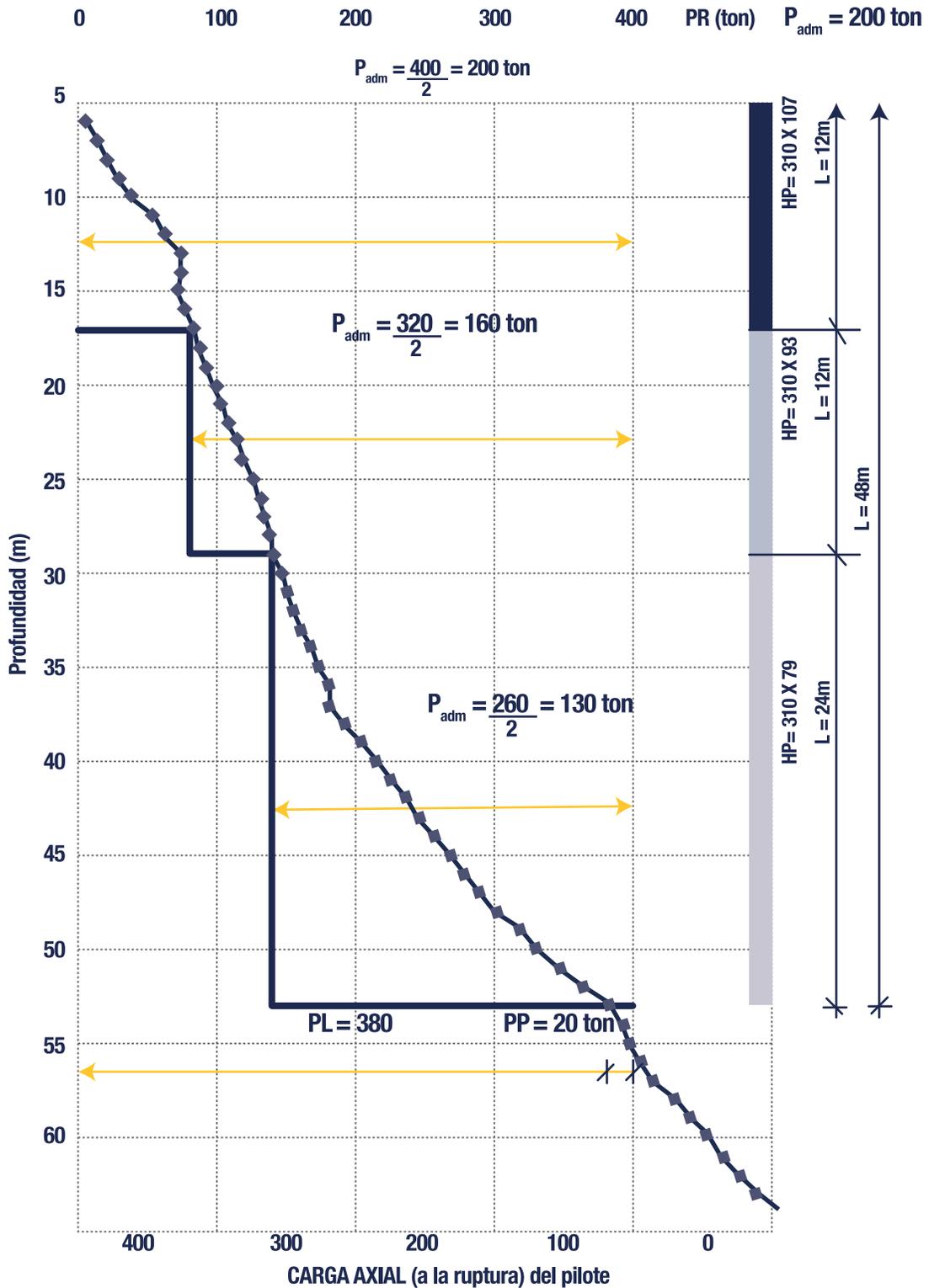
| GRUPO 310 | Perímetro = 180 cm | | | Área = 280 cm ² | | PR (ton) |
|-----------|-------------------------------|----------|----------|----------------------------|-------------|-------------|
| | Prof. medida al brocal (m) | l (m) | SPT - | Tipo de Suelo | PL (ton) | |
| 1 | 1,00 | 12 | 120 | 6 | 12 | 18 |
| 2 | 1,00 | 13 | 120 | 14 | 13 | 26 |
| 3 | 1,00 | 11 | 120 | 19 | 11 | 30 |
| 4 | 1,00 | 16 | 120 | 28 | 16 | 44 |
| 5 | 1,00 | 18 | 120 | 38 | 18 | 55 |
| 6 | 1,00 | 26 | 120 | 52 | 25 | 77 |
| 7 | 1,00 | 20 | 120 | 63 | 20 | 82 |
| 8 | 1,00 | 17 | 120 | 72 | 17 | 88 |
| 9 | 1,00 | 6 | 120 | 75 | 6 | 81 |
| 10 | 1,00 | 3 | 120 | 77 | 3 | 80 |
| 11 | 1,00 | 1 | 600 | 82 | 0 | 82 |
| 12 | 1,00 | 1 | 600 | 87 | 0 | 88 |
| 13 | 1,00 | 1 | 600 | 93 | 0 | 93 |
| 14 | 1,00 | 1 | 600 | 98 | 0 | 99 |
| 15 | 1,00 | 1 | 600 | 104 | 0 | 104 |
| 16 | 1,00 | 1 | 600 | 109 | 0 | 109 |
| 17 | 1,00 | 2 | 600 | 114 | 1 | 115 |
| 18 | 1,00 | 2 | 600 | 120 | 1 | 120 |
| 19 | 1,00 | 1 | 600 | 125 | 0 | 126 |
| 20 | 1,00 | 1 | 600 | 131 | 0 | 131 |
| 21 | 1,00 | 7 | 600 | 136 | 2 | 138 |
| 22 | 1,00 | 6 | 123 | 139 | 6 | 145 |
| 23 | 1,00 | 8 | 123 | 144 | 8 | 151 |
| 24 | 1,00 | 5 | 123 | 146 | 5 | 151 |
| 25 | 1,00 | 4 | 600 | 152 | 1 | 153 |
| 26 | 1,00 | 4 | 600 | 157 | 1 | 158 |
| 27 | 1,00 | 6 | 123 | 160 | 6 | 166 |
| 28 | 1,00 | 5 | 123 | 163 | 5 | 168 |
| 29 | 1,00 | 11 | 123 | 169 | 11 | 180 |
| 30 | 1,00 | 10 | 123 | 174 | 10 | 184 |
| 31 | 1,00 | 10 | 123 | 180 | 10 | 190 |
| 32 | 1,00 | 5 | 123 | 183 | 5 | 187 |
| 33 | 1,00 | 6 | 700 | 193 | 2 | 195 |
| 34 | 1,00 | 4 | 700 | 204 | 1 | 205 |
| 35 | 1,00 | 5 | 700 | 215 | 1 | 216 |
| 36 | 1,00 | 4 | 700 | 226 | 1 | 227 |
| 37 | 1,00 | 6 | 700 | 237 | 2 | 238 |
| 38 | 1,00 | 5 | 700 | 247 | 1 | 249 |
| 39 | 1,00 | 4 | 700 | 258 | 1 | 259 |
| 40 | 1,00 | 5 | 700 | 269 | 1 | 270 |
| 41 | 1,00 | 9 | 700 | 280 | 3 | 282 |
| 42 | 1,00 | 10 | 700 | 291 | 3 | 293 |
| 43 | 1,00 | 24 | 120 | 303 | 24 | 327 |
| 44 | 1,00 | 31 | 120 | 320 | 30 | 351 |
| 45 | 1,00 | 23 | 120 | 333 | 23 | 355 |
| 46 | 1,00 | 33 | 120 | 350 | 32 | 383 |
| 47 | 1,00 | 26 | 120 | 365 | 25 | 390 |
| 48 | 1,00 | 33 | 120 | 382 | 32 | 415 |
| 49 | 1,00 | 16 | 120 | 391 | 16 | 407 |
| 50 | 1,00 | 15 | 120 | 399 | 15 | 414 |
| 51 | 1,00 | 15 | 120 | 407 | 15 | 422 |
| 51 | 1,00 | 16 | 120 | 416 | 16 | 431 |
| 53 | 1,00 | 26 | 120 | 430 | 25 | 455 |
| 54 | 1,00 | 23 | 120 | 442 | 23 | 465 |
| 55 | 1,00 | 23 | 120 | 455 | 23 | 477 |
| 56 | 1,00 | 23 | 120 | 467 | 23 | 490 |
| 57 | 1,00 | 22 | 120 | 479 | 22 | 501 |
| 58 | 1,00 | 24 | 120 | 492 | 24 | 515 |
| 59 | 1,00 | 27 | 120 | 507 | 26 | 533 |



CÓDIGO DE SUELO / CONVENCION

1 = Arena 600 = SFL PR~ 400 ton
 2 = Limo 700 = AT
 3 = Arcilla

Figura 5. Ejemplo de pilotes de sección decreciente con la profundidad.



3. DETALLES Y RECOMENDACIONES PARA LA EJECUCIÓN E HINCADO DE PILOTES METÁLICOS

En suelos que requieren cimentaciones profundas, los perfiles metálicos constituyen una solución alternativa a los demás tipos de cimentación.

Los pilotes que son fabricadas en concreto son normalmente compuestos por secciones que precisan ser modificadas para lograr las profundidades definidas del proyecto.

El sistema de hincado debe estar siempre bien ajustado a fin de que, durante la ejecución, se garantice la integridad de los perfiles. El uso de accesorios como el de un cabezal, con una geometría adecuada a la sección del conjunto de perfiles y sin holguras, ayuda a no dañarlos. Si la parte superior del elemento inferior del conjunto está dañado, este debe ser enrasado a través de un corte mecánico para nuevamente crear un plano que garantice un apoyo uniforme con el elemento siguiente y un empalme de calidad.

Los empalmes o uniones deben ser diseñados para resistir todas las solicitaciones que puedan ocurrir durante la manipulación, hincado y uso del pilote. Aunque las conexiones pueden ser hechas con soldadura a tope de penetración, según las dificultades de la obra, se recomienda traslapar uniones soldadas, siguiendo las recomendaciones generales contenidas en el manual del Instituto Americano de la Construcción en Acero AISI por sus siglas en inglés o el manual del Instituto Mexicano de Construcción en Acero en sus versiones más recientes.

Las placas de conexión pueden ser obtenidas de placas de acero con resistencia equivalente a los perfiles, más, por una cuestión de practicidad, las conexiones son tradicionalmente ejecutadas utilizando un segmento del propio perfil, recortado conforme se muestra en la figura 6, de igual manera se obtienen las placas de conexión de patines y del alma que conformarán las uniones del pilote en la obra.

La reducción de tiempo de ejecución de las uniones es un factor importante para la productividad del proceso de hincado. En ese sentido, es práctico ejecutar previamente las soldaduras en la base de la sección superior a ser hincada. De esa forma las placas soldadas del segmento superior sirven de guía para su posicionamiento y alineamiento para el segmento inferior, reduciendo el tiempo de inactividad del hincado, tardando apenas lo necesario para soldar las placas en la sección ya hincada.

En caso de los pilotes que trabajan a tensión, el cálculo sigue el mismo criterio despreciando la soldadura de penetración total en el perímetro del alma y los patines. Para estas conexiones, el espesor mínimo de las placas deberá ser, como mínimo, 5 cm mayor que lo presentado en la tabla 4.

3.1 UNIONES Y CONEXIONES DE LOS PILOTES METÁLICOS

Tabla 4. Criterios utilizados para el cálculo de las conexiones de los pilotes.

| | | |
|---|---|---------------------|
| Límite de fluencia del acero del perfil y de las placas (f_y) | 34.5 kN/cm ² (3.5 tf/cm ²) | |
| Límite de resistencia del electrondo - E70XX (f_w) | 48.3 kN/cm ² (4.9 tf/cm ²) | |
| Soldadura de penetración total en el perímetro libre del alma (sin chaflán) | $e \leq t_w/2 \leq 5.0$ mm | |
| Soldadura de penetración total en el perímetro libre de los patines (sin chaflán) | $e \leq t_w/2 \leq 10.0$ mm | |
| Filete mínimo para la soldadura de las placas, siendo: | $\leq e$ | 6 mm 3.0 mm |
| e - Espesor del alma (t_w) y del patín (t_f) (ver tabla 4) | $< 6 \leq e$ | 8 mm 5.0 mm |
| s1 - Filete mínimo para soldadura de placas del alma $\leq t_w$ (ver tabla 4) | $< 8 \leq e$ | 12.5 mm 6.0 mm |
| s2 - Filete mínimo para soldadura de placas de patines $\leq t_f$ (ver tabla 4) | $12.5 \leq e$ | 19 mm 8.0 mm |
| | $> e$ | 19 mm 10.00 mm |
| Holgura de las placas de los bordes para permitir las soldaduras laterales | 15.0 mm | |
| Longitud mínima para el corte del perfil (base para las placas) | L (mm) - ver tabla 4 | |

Las consideraciones y verificaciones del cálculo podrán ser solicitadas al equipo técnico de GERDAU CORSA



Nota: Los parámetros adoptados tomaron en consideración las condiciones normalmente encontradas en campo, y pueden ser conservadores. A criterio del proyectista estas placas pueden ser reducidas en función de ensayos y otras variables de campo.

Las figuras 6, 7 y 8 ilustran los detalles geométricos descritos anteriormente.

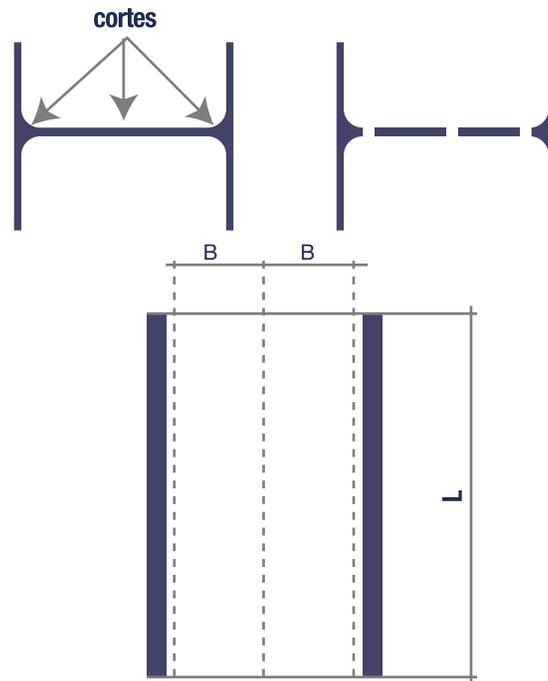


Figura 6. Segmento del perfil que será recortado en las posiciones indicadas para la obtención de las placas de conexión.

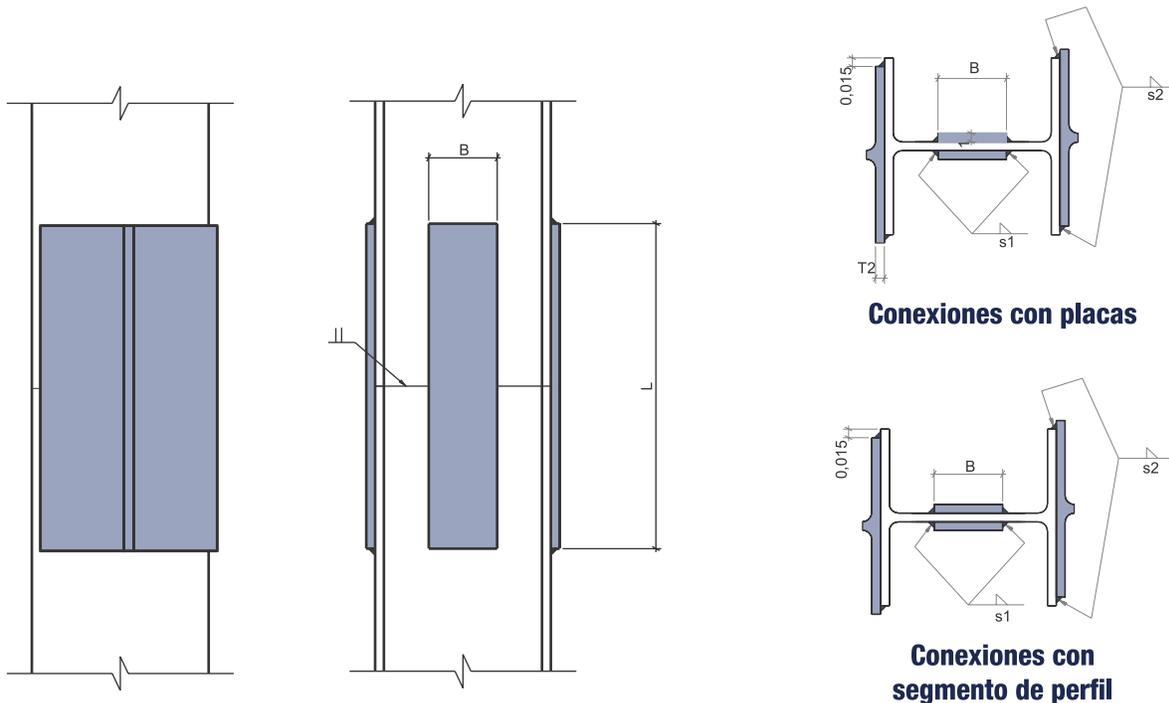


Figura 7. Detalle de conexión con el posicionamiento de las placas y soldaduras.

Tabla 5. Conexión de Pilotes Comprimidos

| PERFILES I MEDIDA DESIGNACIÓN mm x kg/m | CONEXIONES DE PILOTES | | | | CARGA ADMISIBLE DEL PERFIL (Q _A 's, F _y L1,65) | | CARGA ADMISIBLE DE CONEXIÓN Cordón + placa (alma + pantines) | | L mm | FILETES MÍNIMOS | |
|--|-----------------------|---------|----------------------|----------------------|---|-----|---|-----|---------|------------------|-------------------|
| | d mm | b mm | ESPESOR | | KN | tf | KN | tf | | ALMA S1 mm | PATÍN S2 mm |
| | | | t _w mm | t _f mm | | | | | | | |
| W 150 x 22,5 | 152 | 152 | 5,8 | 6,6 | 421 | 43 | 706 | 72 | 200 | 3 | 5 |
| W 150 x 29,8 | 157 | 153 | 6,6 | 9,3 | 617 | 63 | 877 | 89 | 200 | 5 | 6 |
| W 150 x 37,1 | 162 | 154 | 8,1 | 11,6 | 811 | 83 | 994 | 101 | 200 | 6 | 6 |
| W 200 x 35,9 | 201 | 165 | 6,2 | 10,2 | 740 | 75 | 1000 | 102 | 200 | 5 | 6 |
| W 200 x 41,7 | 205 | 166 | 7,2 | 11,8 | 901 | 92 | 1081 | 110 | 200 | 5 | 6 |
| W 200 x 46,1 | 203 | 203 | 7,2 | 11,0 | 976 | 100 | 1205 | 123 | 200 | 5 | 6 |
| W 200 x 52,0 | 206 | 204 | 7,9 | 12,6 | 1150 | 117 | 1439 | 147 | 200 | 5 | 8 |
| H 200 x 53,0 | 204 | 207 | 11,3 | 11,3 | 1175 | 120 | 1401 | 143 | 200 | 6 | 6 |
| W 200 x 59,0 | 210 | 205 | 9,1 | 14,2 | 1338 | 136 | 1559 | 159 | 200 | 6 | 8 |
| W 200 x 71,0 | 216 | 206 | 10,2 | 17,4 | 1649 | 168 | 1751 | 179 | 200 | 6 | 8 |
| W 200 x 86,0 | 222 | 209 | 13,0 | 20,6 | 2060 | 210 | 2074 | 211 | 200 | 8 | 10 |
| H 250 x 62,0 | 246 | 256 | 10,5 | 10,7 | 1356 | 138 | 1761 | 180 | 200 | 6 | 6 |
| W 250 x 73,0 | 253 | 254 | 8,6 | 14,2 | 1628 | 166 | 2029 | 207 | 300 | 6 | 8 |
| W 250 x 80,0 | 256 | 255 | 9,4 | 15,6 | 1819 | 186 | 2147 | 219 | 300 | 6 | 8 |
| H 250 x 85,0 | 254 | 260 | 14,4 | 14,4 | 1956 | 199 | 2323 | 237 | 300 | 8 | 8 |
| W 250 x 89,0 | 260 | 256 | 10,7 | 17,3 | 2068 | 211 | 2295 | 234 | 300 | 6 | 8 |
| W 250 x 101,0 | 264 | 257 | 11,9 | 19,6 | 2376 | 242 | 2670 | 272 | 300 | 6 | 10 |
| W 250 x 115,0 | 269 | 259 | 13,5 | 22,1 | 2735 | 279 | 2762 | 282 | 300 | 8 | 10 |
| H 310 x 79,0 | 299 | 306 | 11,0 | 11,0 | 1699 | 173 | 2091 | 213 | 300 | 6 | 6 |
| H 310 x 93,0 | 303 | 308 | 13,1 | 13,1 | 2118 | 216 | 2555 | 261 | 300 | 8 | 8 |
| W 310 x 97,0 | 308 | 305 | 9,9 | 15,4 | 2210 | 225 | 2512 | 256 | 300 | 6 | 8 |
| W 310 x 107,0 | 311 | 306 | 10,9 | 17,0 | 2477 | 253 | 2655 | 271 | 300 | 6 | 8 |
| H310x110,0 | 308 | 310 | 15,4 | 15,5 | 2571 | 262 | 2754 | 281 | 300 | 8 | 8 |
| W 310 x 117,0 | 314 | 307 | 11,9 | 18,7 | 2758 | 281 | 2756 | 281 | 300 | 6 | 8 |
| H310 x 125,0 | 312 | 312 | 17,4 | 17,4 | 2946 | 300 | 2862 | 292 | 300 | 8 | 8 |
| W 360 x 91,0 | 353 | 254 | 9,5 | 16,4 | 2074 | 211 | 2400 | 245 | 300 | 6 | 8 |
| W 360 x 101,0 | 357 | 255 | 10,5 | 18,3 | 2355 | 240 | 2517 | 257 | 300 | 6 | 8 |
| W 360 x 110,0 | 360 | 256 | 11,4 | 19,9 | 2586 | 264 | 2820 | 288 | 300 | 6 | 10 |
| W 360 x 122,0 | 363 | 257 | 13,0 | 21,7 | 2891 | 295 | 3002 | 306 | 300 | 8 | 10 |

Nota: Cuando un hincado de pilotes es realizado con martillo vibratorio o cuando los pilotes trabajen a tensión se debe aumentar la longitud de las placas, mostrado en la tabla 4.



| PERFILES H | CONEXIONES DE PILOTES | | | | CARGA ADMISIBLE DEL PERFIL (Q.A's. Fy _u 1,65) | | CARGA ADMISIBLE DE CONEXIÓN Cordón + placa (alma + pantes) | | L mm | FILETES MÍNIMOS | | |
|---------------|------------------------------------|---------|----------------------|----------------------|---|-----|---|-----|---------|-----------------|------------------|-------------------|
| | MEDIDA DESIGNACIÓN mm x kg/m | d mm | b _f mm | ESPESOR | | KN | tf | KN | | tf | ALMA S1 mm | PATÍN S2 mm |
| | | | | t _w mm | t _m mm | | | | | | | |
| W 150 x 13,0 | 148 | 100 | 4,3 | 4,9 | 207 | 21 | 375 | 38 | 200 | 3 | 3 | |
| W 150 x 18,0 | 153 | 102 | 5,8 | 7,1 | 346 | 35 | 565 | 58 | 200 | 3 | 5 | |
| W 150 x 24,0 | 160 | 102 | 6,6 | 10,3 | 512 | 52 | 717 | 73 | 200 | 5 | 6 | |
| W 200 x 15,0 | 200 | 100 | 4,3 | 5,2 | 237 | 24 | 449 | 46 | 200 | 3 | 3 | |
| W 200 x 19,3 | 203 | 102 | 5,8 | 6,5 | 361 | 37 | 612 | 62 | 200 | 3 | 5 | |
| W 200 x 22,5 | 206 | 102 | 6,2 | 8,0 | 440 | 45 | 720 | 73 | 200 | 5 | 6 | |
| W 200 x 26,6 | 207 | 133 | 5,8 | 8,4 | 524 | 53 | 848 | 87 | 200 | 3 | 6 | |
| W 200 x 31,3 | 210 | 134 | 6,4 | 10,2 | 650 | 66 | 922 | 94 | 200 | 5 | 6 | |
| W 250 x 17,9 | 251 | 101 | 4,8 | 5,3 | 276 | 28 | 552 | 56 | 300 | 3 | 3 | |
| W 250 x 22,3 | 254 | 102 | 5,8 | 6,9 | 410 | 42 | 716 | 73 | 300 | 3 | 5 | |
| W 250 x 25,3 | 257 | 102 | 6,1 | 8,4 | 494 | 50 | 824 | 84 | 300 | 5 | 6 | |
| W 250 x 28,4 | 260 | 102 | 6,4 | 10,0 | 578 | 59 | 938 | 96 | 300 | 5 | 6 | |
| W 250 x 32,7 | 258 | 146 | 6,1 | 9,1 | 654 | 67 | 1097 | 112 | 300 | 5 | 6 | |
| W 250 x 38,5 | 262 | 147 | 6,6 | 11,2 | 811 | 83 | 1215 | 124 | 300 | 5 | 6 | |
| W 250 x 44,8 | 266 | 148 | 7,6 | 13,0 | 976 | 99 | 1507 | 154 | 300 | 5 | 8 | |
| W 310 x 21,0 | 303 | 101 | 5,1 | 5,7 | 315 | 32 | 667 | 68 | 300 | 3 | 3 | |
| W 310 x 23,8 | 305 | 101 | 5,6 | 6,7 | 391 | 40 | 767 | 78 | 300 | 3 | 5 | |
| W 310 x 28,3 | 309 | 102 | 6,0 | 8,9 | 514 | 52 | 932 | 95 | 300 | 5 | 6 | |
| W 310 x 32,7 | 313 | 102 | 6,6 | 10,8 | 643 | 66 | 1093 | 111 | 300 | 5 | 6 | |
| W 310 x 38,7 | 310 | 165 | 5,8 | 9,7 | 733 | 75 | 1257 | 128 | 300 | 3 | 6 | |
| W 310 x 44,5 | 313 | 166 | 6,6 | 11,2 | 905 | 92 | 1378 | 140 | 300 | 5 | 6 | |
| W 310 x 52,0 | 317 | 167 | 7,6 | 13,2 | 1136 | 116 | 1705 | 174 | 300 | 5 | 8 | |
| W 360 x 32,9 | 349 | 127 | 5,8 | 8,5 | 564 | 57 | 1033 | 105 | 300 | 3 | 6 | |
| W 360 x 39,0 | 353 | 128 | 6,5 | 10,7 | 740 | 75 | 1282 | 131 | 300 | 5 | 6 | |
| W 360 x 44,6 | 352 | 171 | 6,9 | 9,8 | 870 | 89 | 1444 | 147 | 300 | 5 | 6 | |
| W 360 x 51,0 | 355 | 171 | 7,2 | 11,6 | 1025 | 104 | 1523 | 155 | 300 | 5 | 6 | |
| W 360 x 58,0 | 358 | 172 | 7,9 | 13,1 | 1204 | 123 | 1822 | 186 | 300 | 5 | 8 | |
| W 360 x 64,0 | 347 | 203 | 7,7 | 13,5 | 1388 | 142 | 1886 | 192 | 300 | 5 | 8 | |
| W 360 x 72,0 | 350 | 204 | 8,6 | 15,1 | 1602 | 163 | 2024 | 206 | 300 | 6 | 8 | |
| W 360 x 79,0 | 354 | 205 | 9,4 | 16,8 | 1806 | 184 | 2158 | 220 | 300 | 6 | 8 | |
| W 410 x 38,8 | 399 | 140 | 6,4 | 8,8 | 671 | 68 | 1301 | 133 | 300 | 5 | 6 | |
| W 410 x 46,1 | 403 | 140 | 7,0 | 11,2 | 864 | 88 | 1480 | 151 | 300 | 5 | 6 | |
| W 410 x 53,0 | 403 | 177 | 7,5 | 10,9 | 1035 | 106 | 1657 | 169 | 300 | 5 | 6 | |
| W 410 x 60,0 | 407 | 178 | 7,7 | 12,8 | 1198 | 122 | 1913 | 195 | 300 | 5 | 8 | |
| W 410 x 67,0 | 410 | 179 | 8,8 | 14,4 | 1443 | 147 | 2101 | 214 | 300 | 6 | 8 | |
| W 410 x 75,0 | 413 | 180 | 9,7 | 16,0 | 1674 | 171 | 2185 | 223 | 300 | 6 | 8 | |
| W 410 x 85,0 | 417 | 181 | 10,9 | 18,2 | 1954 | 199 | 2264 | 231 | 300 | 6 | 8 | |
| W 460 x 52,0 | 450 | 152 | 7,6 | 10,8 | 953 | 97 | 1632 | 166 | 300 | 5 | 6 | |
| W 460 x 60,0 | 455 | 153 | 8,0 | 13,3 | 1156 | 118 | 1976 | 201 | 300 | 6 | 8 | |
| W 460 x 68,0 | 459 | 154 | 9,1 | 15,4 | 1423 | 145 | 2094 | 214 | 300 | 6 | 8 | |
| W 460 x 74,0 | 457 | 190 | 9,0 | 14,5 | 1542 | 157 | 2235 | 228 | 300 | 6 | 8 | |
| W 460 x 82,0 | 460 | 191 | 9,9 | 16,0 | 1780 | 181 | 2324 | 237 | 300 | 6 | 8 | |
| W 460 x 89,0 | 463 | 192 | 10,5 | 17,7 | 2000 | 204 | 2386 | 243 | 300 | 6 | 8 | |
| W 460 x 97,0 | 466 | 193 | 11,4 | 19,0 | 2232 | 228 | 2625 | 268 | 300 | 6 | 10 | |
| W 460 x 106,0 | 469 | 194 | 12,6 | 20,6 | 2475 | 252 | 2862 | 292 | 300 | 8 | 10 | |

| PERFILES H MEDIDA DESIGNACIÓN mm x kg/m | CONEXIONES DE PILOTES | | | | CARGA ADMISIBLE DEL PERFIL (Q.A's. $F_y \geq 1,65$) | | CARGA ADMISIBLE DE CONEXIÓN Cordón + placa (alma + pantes) | | L mm | FILETES MÍNIMOS | |
|--|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---|-----|---|-----|---------|-----------------|----|
| | d mm | b _f mm | ESPESOR | | | | | | | KN | tf |
| | | | t _w mm | t _f mm | | | | | | | |
| W 530 x 66,0 | 525 | 165 | 8,9 | 11,4 | 1205 | 123 | 1961 | 200 | 300 | 6 | 6 |
| W 530 x 72,0 | 524 | 207 | 9,0 | 10,9 | 1340 | 137 | 2098 | 214 | 300 | 6 | 6 |
| W 530 x 74,0 | 529 | 166 | 9,7 | 13,6 | 1463 | 149 | 2245 | 229 | 300 | 6 | 8 |
| W 530 x 82,0 | 528 | 209 | 9,5 | 13,3 | 1618 | 165 | 2416 | 246 | 300 | 6 | 8 |
| W 530 x 85,0 | 535 | 166 | 10,3 | 16,5 | 1743 | 178 | 2339 | 238 | 300 | 6 | 8 |
| W 530 x 92,0 | 533 | 209 | 10,2 | 15,6 | 1911 | 195 | 2524 | 257 | 300 | 6 | 8 |
| W 530 x 101,0 | 537 | 210 | 10,9 | 17,4 | 2208 | 225 | 2551 | 260 | 300 | 6 | 8 |
| W 530 x 109,0 | 539 | 211 | 11,6 | 18,8 | 2442 | 249 | 2601 | 265 | 300 | 6 | 8 |
| W 610 x 101,0 | 603 | 228 | 10,5 | 14,9 | 2047 | 209 | 2667 | 272 | 300 | 6 | 8 |
| W 610 x 113,0 | 608 | 228 | 11,2 | 17,3 | 2380 | 243 | 2758 | 281 | 300 | 6 | 8 |
| W 610 x 125,0 | 612 | 229 | 11,9 | 19,6 | 2717 | 277 | 3057 | 312 | 300 | 6 | 10 |
| W 610 x 140,0 | 617 | 230 | 13,1 | 22,2 | 3177 | 324 | 3304 | 337 | 300 | 8 | 10 |
| W 610 x 155,0 | 611 | 324 | 12,7 | 19,0 | 3471 | 354 | 3831 | 391 | 300 | 8 | 10 |
| W 610 x 174,0 | 616 | 325 | 14,0 | 21,6 | 4061 | 414 | 3890 | 397 | 300 | 8 | 10 |

Para información sobre una solución alternativa de conexiones de pilotes con placas ASTM A-572 Gr 50, consulte al equipo técnico de GERDAU CORSA o cualquier metodología para uniones de elementos de acero propuestas en los manuales del AISC o IMCA:

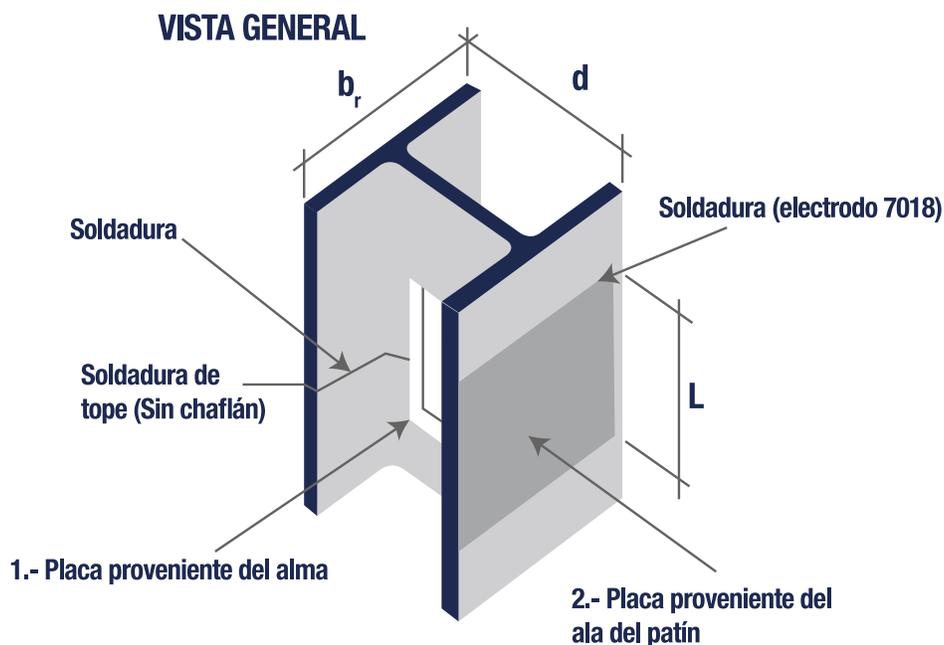


Figura 8. Detalle típico de conexión con placas y soldadura.

Nota: Las consideraciones y verificaciones de cálculo pueden ser solicitadas al equipo técnico de GERDAU CORSA.



3.2 UNIÓN DE LOS PILOTES A LA CIMENTACIÓN

La unión de los pilotes metálicos al encepado debe ser hecha de modo que las cargas resistidas por el encepado sean transmitidas adecuadamente y con garantía de continuidad a los pilotes.

3.2.1 Caso 1 - Pilotes comprimidos

El detalle, mostrado en la figura difundido entre los calculistas de concreto armado, mostrado en la figura 8, que consiste en soldar una placa en el tope del pilote no es recomendable, pues, tiene como principal inconveniente el hecho del corte del perfil metálico, en la cota de enrase (después del hincado) donde será soldada la placa, con soplete y en posición muy desfavorable para el operador, trabajando dentro del hueco para la construcción del encepado y, en la mayoría de las veces próximo al nivel del agua. En estas condiciones adversas de corte, resultará una superficie sin garantía de perpendicularidad al eje del pilote, además en forma irregular y, de una manera general, no plana. Por esta razón el contacto de la placa con el área plana del perfil metálico es perjudicial. Para agravar la situación, normalmente la placa es mayor que la proyección de la sección transversal del perfil, necesitando que la soldadura de ésta al perfil sea realizada por debajo de la misma, y, por lo tanto, sin cualquier control de la calidad de esa soldadura.

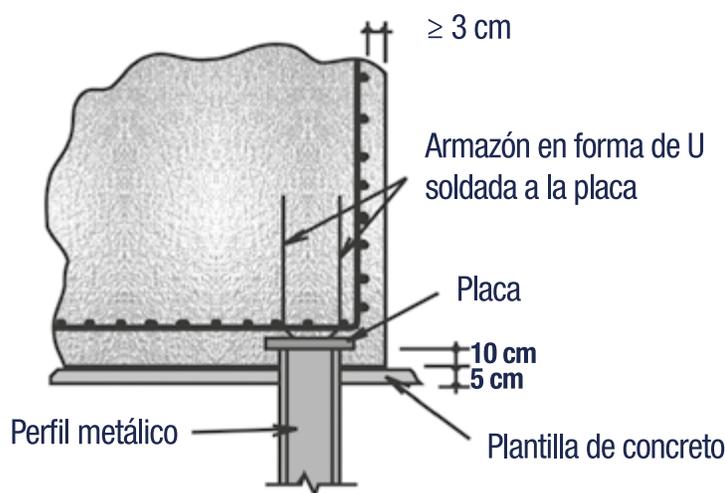


Figura 9. Solución no recomendada para la unión del pilote metálico al encepado.

La unión más eficiente y recomendada para una unión de pilote metálico con un encepado puede ser hecha empotrando el pilote 20 a 30 cm en el bloque, conforme a la figura 9, complementada por un fragmento a través de la espiral posicionada por encima de la armadura de flexión del bloque.

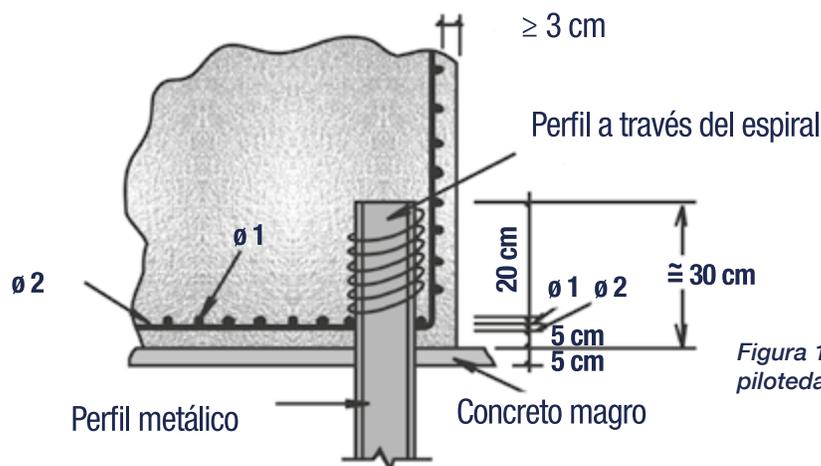


Figura 10. Solución de unión pilotado de concreto.

Hoy en día utilizamos el detalle presentado en la figura 11 (y una vista en la fotografía 4), en que se envuelve el pilote, debajo de la cota de nivelación ("cuello"), con concreto armado y equipado para garantizar la transferencia de carga, por adherencia, del bloque al pilote. Para mejorar esa transferencia de carga del bloque del pilote a la armadura, en esa región del "cuello", debe ser soldada en el pilote.

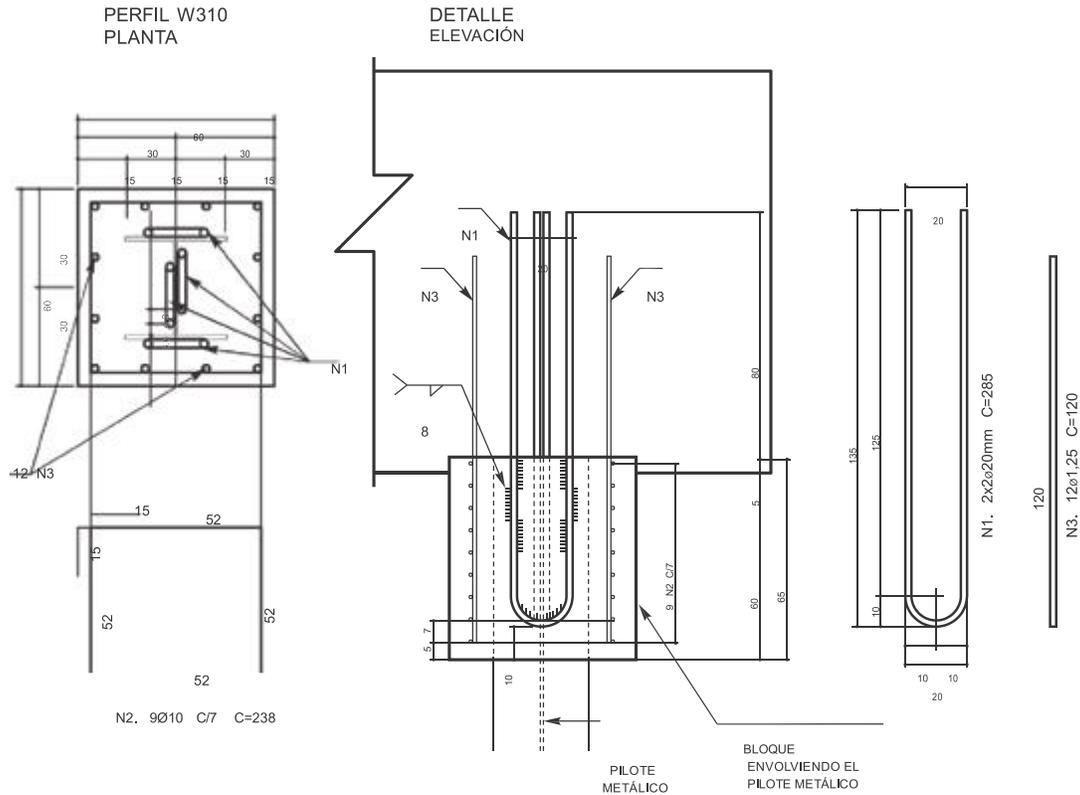


Figura 11. Propuesta de unión del pilote metálico al bloque (perfiles de la familia 310).



Fotografía 4. Vista de unión pilote metálico encepado conforme detalle de la figura 10.

El detalle presentado en la figura 11 y en la fotografía 4 puede ser utilizado como referencia para otros grupos de perfiles. Normalmente el concreto inicia el “cuello” antes del encepado, se retira el material del cuello, se compacta el terreno y finalmente se ejecuta el encepado.

3.2.2 Caso 2 – Pilotes en tensión.

En caso de pilotes que trabajen a la tensión, la unión con el encepado es hecha a través de un armado convenientemente calculado, soldado al perfil, análogamente al mostrado en la figura 11 y que deberá penetrar en el encepado la longitud necesaria para transmitirle la carga de tensión, por adherencia. Un detalle típico de esta unión es presentado en la fotografía 5.

Fotografía 5. Detalle de armadura para transferir carga de tensión del pilote al encepado.



3.3 CABEZALES DE CONCRETO

La diversidad de proyectos y las condiciones particulares que presentan cada uno, producto de las propiedades mecánicas del suelo y de la magnitud de las cargas que serán transmitidas al suelo provoca que la descarga sobre el pilote sea de una magnitud muy grande, por lo que es aconsejable repartir esta carga a más de un pilote a través de cabezales de concreto que tendrán la función de distribuir la carga a más de un pilote.

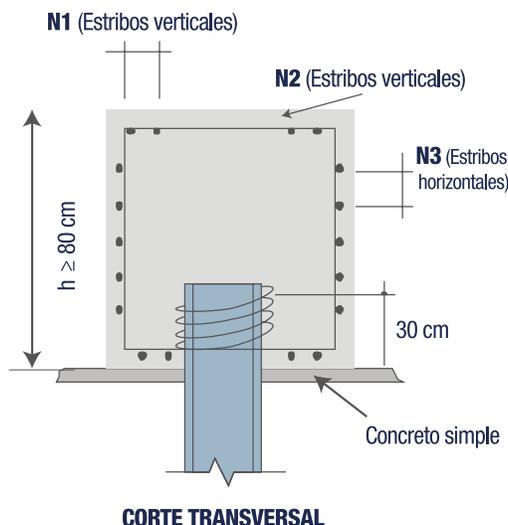
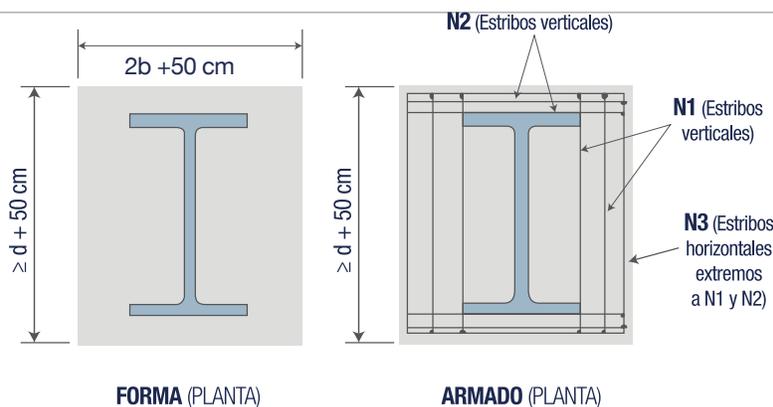
En este capítulo se presenta la disposición típica del acero de refuerzo para la solución recomendada para el embebido de los perfiles en el cabezal, como se muestra en la figura 10. Esta opción, también recomendada por nosotros, presupone que el bloque sea calculado como rígido. El cálculo del acero de refuerzo (estribos), no forma parte de este trabajo, pues depende de las cargas aplicadas por las columnas al cabezal, de las dimensiones de las columnas, del tipo de concreto, de la rigidez del cabezal, etc.

Cuando no es posible utilizar un bloque rígido, se debe envolver el tramo embebido del pilote metálico en el bloque por una espiral de acero, para garantizar que no haya ruptura por penetración.

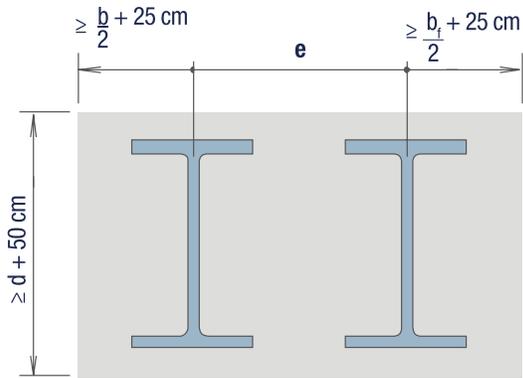
La NBR 6122/1996 no estipula un espaciamiento entre pilotes. Sin embargo, en el ítem 7.7.2 de esta Norma se exige que la carga admisible de un grupo de pilotes no sea superior a la de una zapata del mismo contorno que el del grupo, a efectos prácticos, no se debe utilizar un espaciamiento inferior a 100 cm entre el eje de pilotes. Este espaciamiento se puede utilizar para los perfiles metálicos con peralte ($d < 40$ cm). Para los demás perfiles se puede proponer 150 cm como espaciamiento mínimo.

A continuación, se presentan ejemplos típicos de cabezales con 1, 2, 3 y 4 pilotes embebidos en él:

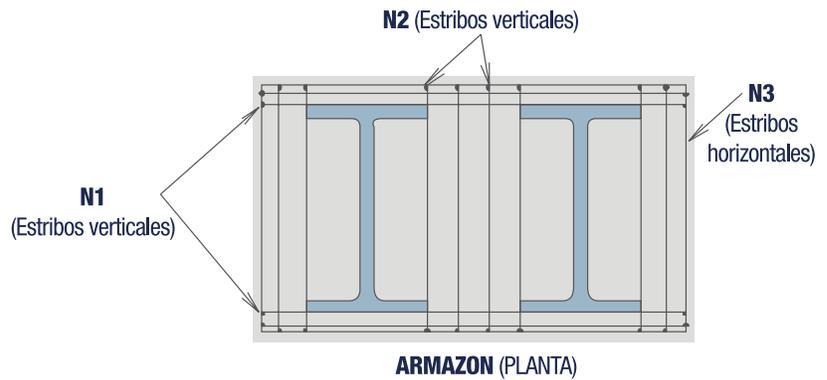
Cabezal con un pilote.



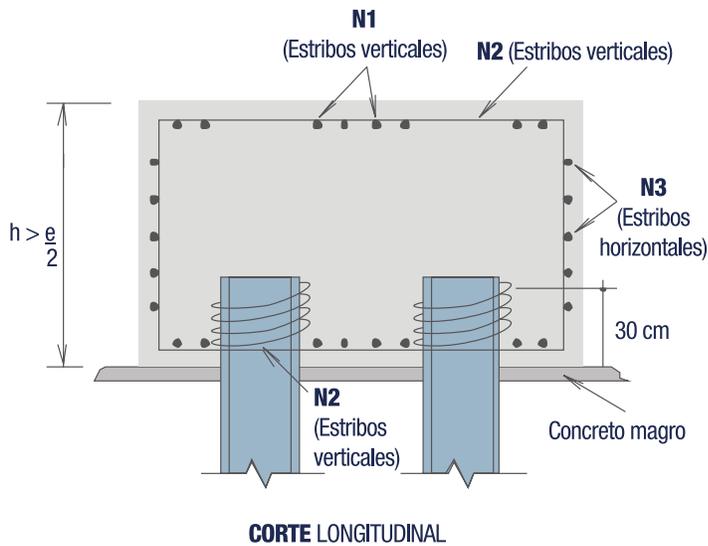
Cabezal con dos pilotes.



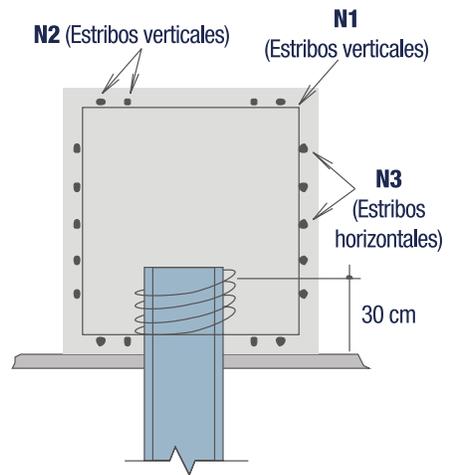
FORMA (PLANTA)



ARMAZON (PLANTA)



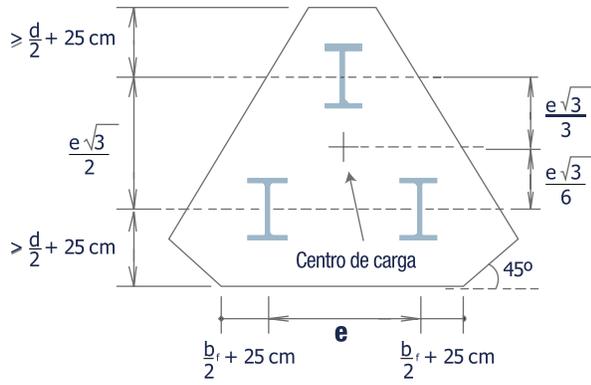
CORTE LONGITUDINAL



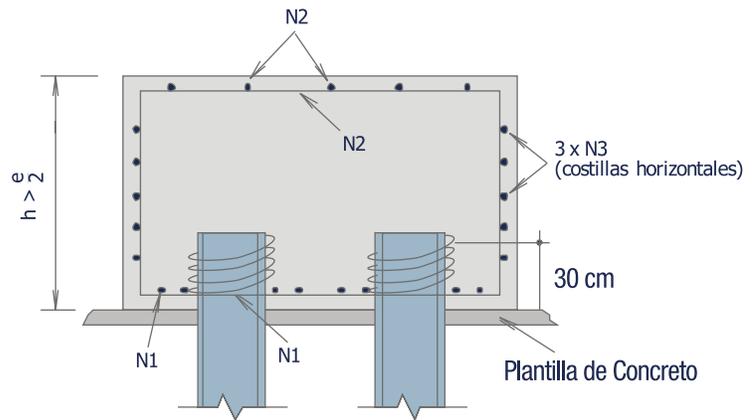
CORTE TRANSVERSAL



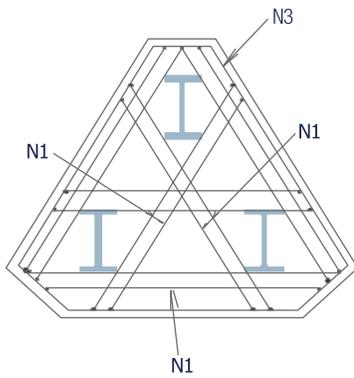
Cabezal con tres pilotes



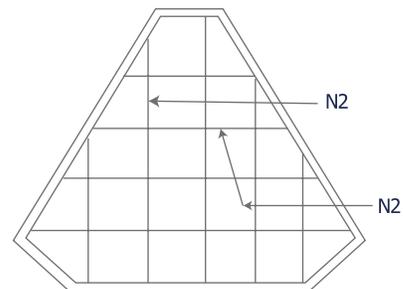
FORMA



CORTE



ARMADURA INFERIOR

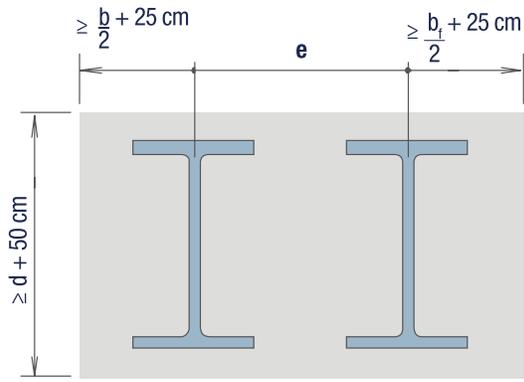


ARMADURA SUPERIOR

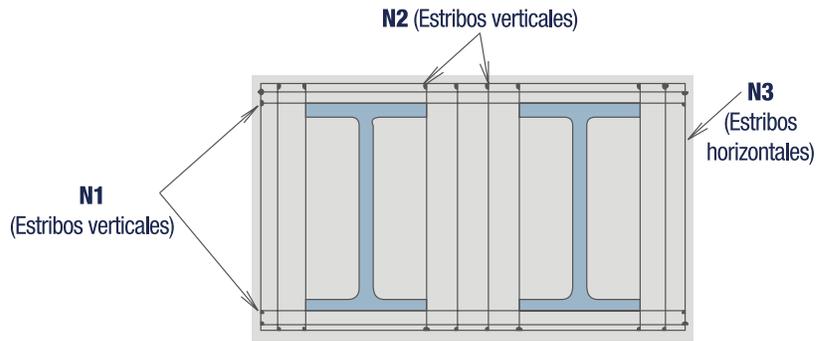


N3 estribos en 3 caras.

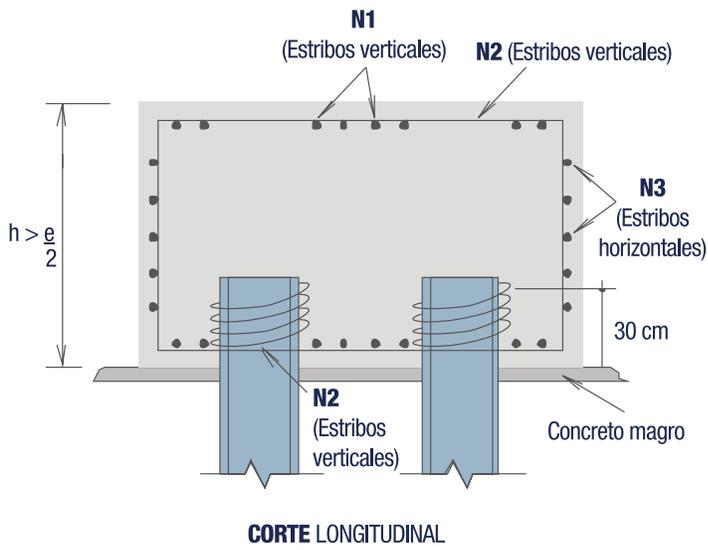
Cabezal con cuatro pilotes



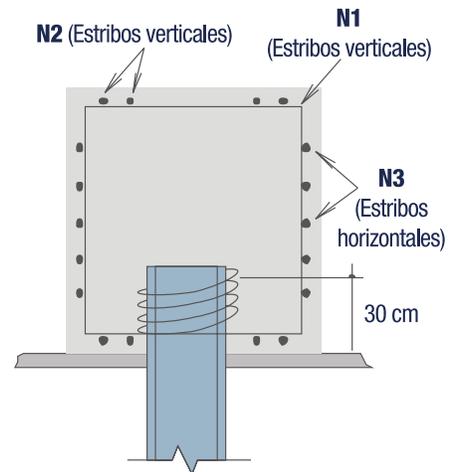
FORMA (PLANTA)



ARMAZON (PLANTA)



CORTE LONGITUDINAL



CORTE TRANSVERSAL



3.4 MÉTODOS DE HINCADO

3.4.1 Martillos de impacto.

Uno de los métodos más utilizados para el hincado de pilotes es por medio de martillos o martinetes de impacto. El sistema consiste en levantar la maza del martillo por medio de algún tipo de energía externa y dejar caer la maza por gravedad. Si la caída no es acompañada de alguna otra fuerza se le denomina de acción simple, pero si la caída es adicionada con alguna fuerza externa, ya sea vapor, aire comprimido o alguna fuerza hidráulica el martinete se llama de doble acción.

3.4.2 Martillos diésel.

Estos son los más utilizados para el hincado de pilotes en sitios fuera de la costa. Estos están compuestos esencialmente de un martinete, un yunque y un sistema de inyección de combustible.

Los martinetes diésel pueden tener dos variantes, de extremo abierto y de extremo cerrado. En la base de la cubierta de ambos tipos, entre el extremo inferior del martillo y del yunque está una cámara confinada, dentro de la cual se produce la explosión del combustible que a su vez libera una mezcla de gases que al estar en confinamiento la fuerza generada eleva el martillo.

En los martinetes de extremo abierto, el martillo cae por la fuerza de gravedad y aplica energía al yunque producto del impacto de la caída libre de la masa. Sin embargo, al descender se inyecta combustible en la cámara de combustión, que se encuentra entre el martillo y el yunque. Aproximadamente en el instante del impacto, el combustible se enciende provocando una explosión que nuevamente levanta el martillo. Durante un tiempo significativo, la presión de los gases en combustión también actúa sobre el yunque y aumenta la magnitud y duración de la fuerza impulsora, lo que produce una fuerza de impacto aún mayor que la producida por simple caída libre.

En los martinetes de extremo cerrado, la cubierta se extiende sobre el cilindro para formar una cámara de amortiguamiento o de rebote, en la que se comprime el aire al subir el martillo, acortando por lo tanto su trayectoria de regreso. Regresa su energía almacenada al martillo en la carrera hacia abajo. Debido a que la carrera es más corta, aumenta el número de golpes por minuto con respecto a los martinetes de extremo abierto, pero con menor energía de impacto.

Aunque los martillos diésel son muy competitivos desde el punto de vista de costo y mantenimiento, este tipo de martillos tienen una baja relación de eficiencia de hincado debido a la pérdida de energía en el transcurso de la acción de los mecanismos. La eficiencia del martillo está en proporción de la energía efectiva transmitida al pilote por el golpe de la maza del martillo, que como ya vimos se puede ir reduciendo por la pérdida de distancia de recorrido y dividida por la pérdida de energía de la maza. Las pruebas experimentales durante el proceso de hincado han mostrado que la eficiencia del martillo diésel raramente llega al 50% y por lo regular su eficiencia promedio oscila entre 30 y 35%.

3.4.3 Martillos hidráulicos.

Los primeros martillos hidráulicos aparecieron hace ya una década atrás en trabajos costa dentro (plataformas petroleras), en donde su buen desempeño en el hincado de elementos sumergidos bajo el agua garantizó su éxito. En pocos años se desarrollaron obras con este método de hincado en puertos y obras fuera de la costa. Como ya se había mencionado pueden ser de acción simple y de doble acción, en este caso los martillos de doble acción utilizan la presión hidráulica para levantar el martillo y luego acelerar la caída del martinete brindándole un mayor impulso.

El tipo de acero que se utiliza (acero de impacto), y la existencia de un único componente intermedio que transmite la energía (el yunque), reduce las pérdidas de energía y da como resultado una eficiencia global muy alta. La instrumentación durante el hincado ha demostrado que la eficiencia es generalmente muy aceptable rondando arriba del 75%. Además, estos martillos tienen un amplio uso porque la fuerza hidráulica se regula con mucha facilidad, y además la instrumentación interna que acompaña a estos mecanismos mide la energía cinética del martillo instantáneamente.

3.4.4 Vibro hincadores.

Los martillos vibro hincadores fueron inicialmente desarrollados en Alemania en la antigua Unión Soviética (actual Rusia), alrededor de 1930-1931. Básicamente su funcionamiento consiste en girar masas excéntricas, en sentido contrario, conforme se muestra, esquemáticamente, en la figura 16.

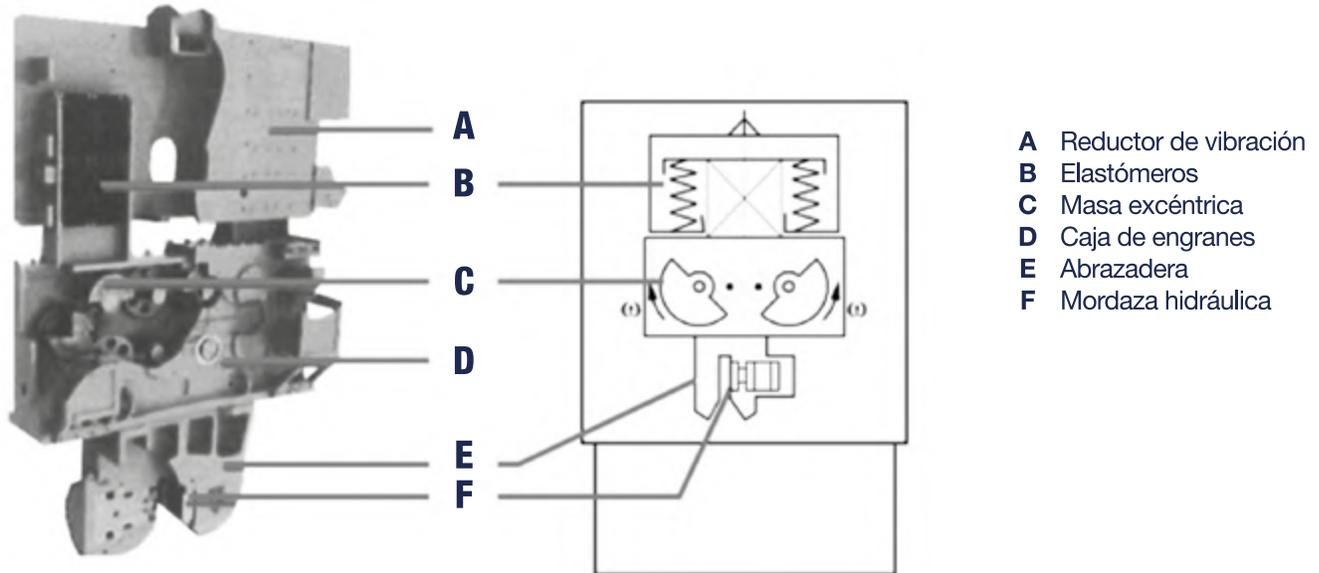


Figura 16. Principio de funcionamiento de un martillo vibro hincador.

La central de energía para accionar las masas excéntricas puede ser hidráulica (martillos vibratorios, hidráulicos), o eléctricos (martillos vibratorios eléctricos), conforme lo mostrado respectivamente en las fotografías 6 y 7.

Los martillos vibratorios son generalmente clasificados de acuerdo con la frecuencia que imponen las masas excéntricas en:

- **Baja frecuencia:** Son aquellas con frecuencia inferior a 20 Hz (1.200 rpm).
- **Frecuencia normal:** Presentan frecuencias entre 20 Hz (1.200 rpm) y 33 Hz (2.000 rpm).
- **Alta frecuencia:** Presentan frecuencias superiores a 35Hz (2.000 rpm).

Las masas excéntricas deben girar con sincronización creando fuerzas centrífugas ascendentes y descendentes (+F_v e - F_v), cuyo mecanismo se expone en la figura 17. La sincronización es necesaria para que se anulen los componentes horizontales de las fuerzas (F_h), conforme se muestra en la figura 17 (ii), a fin de evitar la propagación de vibraciones horizontales en el terreno.

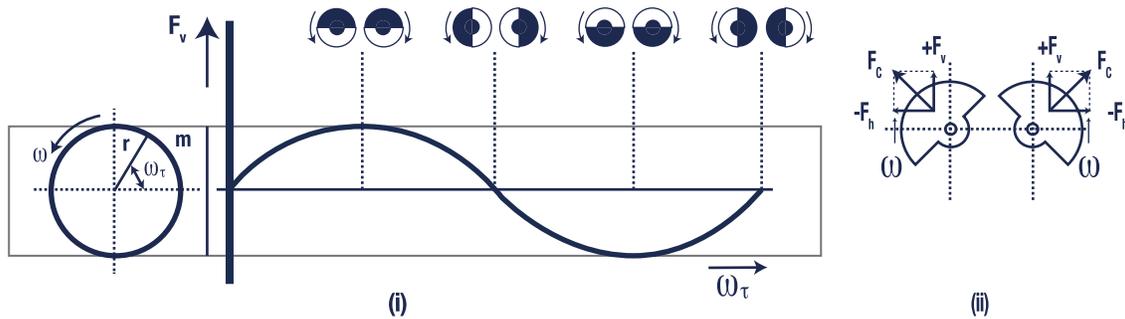


Figura 17. Fuerza centrífuga (F_v e F_h) generadas por las masas excéntricas (m) girando con velocidad angular ω.



Los martillos vibratorios pueden ser usados tanto para hincar pilotes como para extraerlos y causan menos ruido ambiental que los martillos de impacto. Su alta frecuencia y la sincronización de giro de las masas excéntricas solo crean vibración vertical siendo la horizontal poco perceptible. Además, el tiempo en hincado es mucho menor que el de martillos de impacto.

La alta velocidad de vibración provoca “licuefacción” del suelo y el pilote penetra casi sin ningún esfuerzo. Este es el motivo por el cual los martillos vibratorios son de menor peso comparados con otros tipos de martillos.

3.4.5 Hincado mixto (vibro hincador y martillo de impacto).

En casos particulares en donde la estratigrafía del sitio presenta capas o lentes de material rígido, que por condiciones de proyecto debemos a travesar se recomienda hacer uso de un hincado de impacto seguido de un vibro hincado, o viceversa. Los métodos pueden ser alternados a medida que se requiera según la estratigrafía del sitio. Algunas veces el sitio permite el vibro hincado a través de toda la longitud del pilote. Sin embargo, por condiciones de diseño se requiere un empote en el estrato resistente del suelo, por lo que el vibro hincador no es capaz de realizar este empote, por lo que se haría uso de un martillo de impacto.



Fotografía 6. Martillo vibratorio eléctrico.



Fotografía 7. Martillo vibratorio hidráulico.

Otro aspecto de utilidad de terminar el hincado de los elementos con martillos de impacto es por el tema de la instrumentación. La instrumentación de los pilotes durante el vibro hincado no ha sido muy utilizado para obtener datos y no hay suficiente información para correlacionar un criterio rechazo bajo vibrado con la resistencia dinámica del suelo.

Por esta razón, el hincado por impacto después del vibro hincado es generalmente necesario si se requiere obtener una mejor estimación de la capacidad de carga del pilote.

4. CONTROL Y MONITOREO DE PILOTES METÁLICOS

Los pilotes metálicos pueden ser hincados con la utilización de martillos de caída libre, martillos hidráulicos, martillos diésel, martillos neumáticos y martillos vibratorios. La elección de uno u otro martillo depende, principalmente, de las características del suelo, de la longitud del pilote y del nivel de ruido y de la vibración. De la buena elección del martillo resultará un mejor desempeño del proceso de hincado, en particular en cuanto a las vibraciones y el ruido que generado, hoy en día, acaban siendo la condicionante para la elección del tipo de hincado del pilote, y del tipo de martillo.

Cualquier martillo que sea empleado, el control de hincado es hecho tradicionalmente por el rechazo, por el repique y, en algunas obras, por el ensayo de carga dinámico (NBR13208: 2007).

Para garantizar que el perfil sea hincado en la posición de proyecto, se debe proveer una guía de madera “enterrada” conforme se muestra en la figura 18.

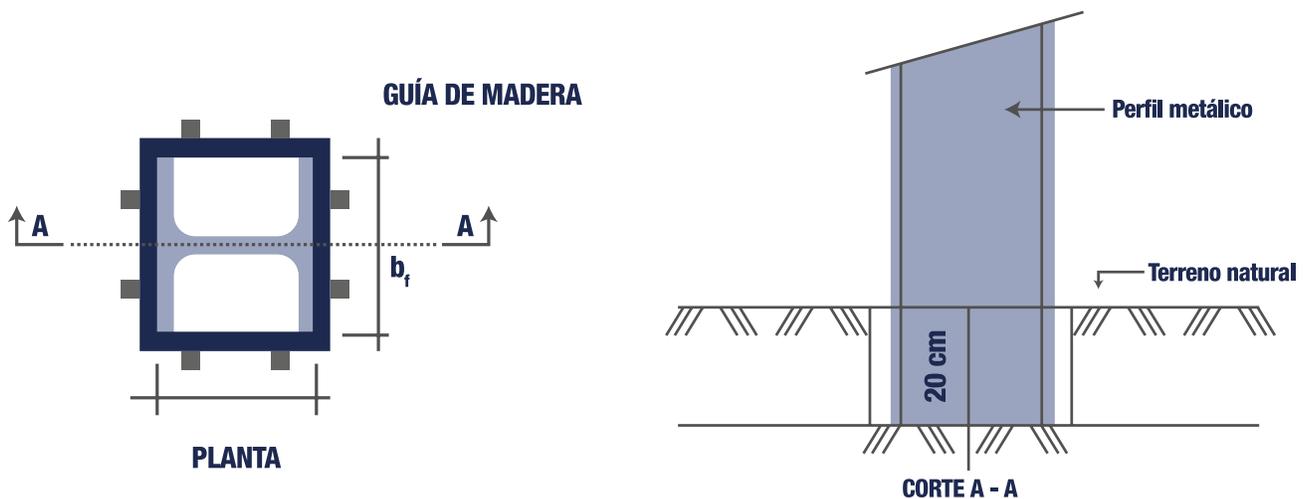


Figura 18. Guía para el hincado del pilote.

4.1 PRUEBAS DINÁMICAS DURANTE EL HINCADO

El tener una buena instrumentación y monitoreo del proceso de hincado nos garantizará que los pilotes trabajen de la forma en que fueron idealizados. La instrumentación debe garantizar brindar la siguiente información:

- La instrumentación en pilotes debe medir aceleraciones y esfuerzos generados en la cabeza del pilote producto de cada golpe del martillo.
- Un análisis en tiempo real con software de alta calidad debe indicar esencialmente:
 - Los esfuerzos máximos en el pilote
 - La energía real desarrollada en el pilote a través del impacto del martillo.
 - La resistencia total del suelo a cada golpe.
- Un análisis detallado del hincado utilizando programas de simulación, los cuáles proporcionan información sobre el comportamiento del sistema suelo-pilote durante el hincado.



Toda esta información recopilada, le ayuda al ingeniero a prever y a estimar:

- **El riesgo de daño al pilote cuando esté siendo hincado a través de suelos duros o con estratos heterogéneos (variedad de estratos en la profundidad de hincado).**
- **El comportamiento del martillo y su eficiencia comparada con el valor estimado en los pronósticos de hincado o en las simulaciones.**
- **Es importante conocer el incremento de la resistencia dinámica durante el hincado para ajustar la eficiencia del hincado.**

Todas las informaciones sobre estos datos del sitio son extremadamente útiles para estimar un evento prematuro de rechazo. Para evitar contratiempos en el hincado siempre hay que considerar:

- **Estimar si el rechazo se debe a una mayor resistencia del suelo de lo esperado o a un mal funcionamiento del martillo.**
- **El riesgo prematuro de rechazo debido a datos insuficientes del desempeño del martillo sobre los pilotes, siempre se debe contar con equipo con fichas técnicas de confianza que nos brinden datos reales de desempeño del martillo.**
- **Información geotécnica inadecuada y la incertidumbre de la capacidad de carga final de los pilotes, debido a los factores antes mencionados.**
- **Un sitio con variaciones locales en la estratigrafía y en las propiedades mecánicas del suelo. El suelo por su origen siempre tendrá un estado heterogéneo que siempre generará grandes incertidumbres, las cuales tratamos de mitigar a mayor medida, aunque a veces es insuficiente.**
- **Un sitio con una densidad alta de pilotes.**

El número y diseño de la instrumentación de los pilotes depende obviamente de los problemas a resolver y de la envergadura de la cimentación, si tenemos una cimentación en donde las características del proyecto requiere un sembrado muy denso de pilotes, debemos considerar el incremento de resistencia a la penetración del suelo debido al confinamiento producido por los pilotes.

4.2 RECHAZO

El rechazo es una medida tradicional, aunque hoy en día, sea más usada para el control de la uniformidad del sembrado de los pilotes cuando se busca mantener, durante el hincado, rechazos aproximadamente iguales para pilotes con cargas iguales. El rechazo corresponde a la penetración permanente del pilote, cuando sobre la misma se aplica un golpe del martillo. En general, es obtenida como un décimo de la penetración total para diez golpes.

A pesar de las críticas a las fórmulas de los rechazos (entre otras, el hecho de que fueron desarrolladas a partir de la Teoría de Choque de Cuerpos Rígidos), lo que está muy lejos de representar un pilote largo, pues bajo la acción del golpe de la maza la punta del mismo no se desplaza al mismo tiempo que el tope. Éstas aún son parte del “recetario” de los encargados de los hincados de los pilotes.

El rechazo también puede ser medido después de un cierto tiempo del hincado del pilote. Es denominado “rechazo de rehincado o de recuperación”, y es comparada con la medida al final del hincado para verificar si el suelo presenta el fenómeno de la cicatrización (disminución del rechazo con el tiempo), o relajación (aumento del rechazo con el tiempo).

4.3 REPIQUE

Al contrario del rechazo, el repique ya está incluido dentro del contexto de la Teoría de Propagación de Onda, y, por lo tanto, presenta resultados con mucho menos dispersión que el rechazo. El repique representa el tramo elástico del desplazamiento máximo de una sección del pilote, consecuente de la aplicación de un golpe de la maza. Su control puede ser hecho a través del registro gráfico en una hoja de papel fijada al pilote y moviéndose un lápiz, apoyado en un referencial, en el instante del golpe, conforme se muestra en la fotografía 8.

El valor obtenido corresponde a la solución de la Ecuación de Onda, en términos de desplazamiento máximo y sin la escala de tiempo. La interpretación de la señal obtenida permite estimar la carga movilizada durante el golpe en el pilote. Análogamente al rechazo, esa señal puede ser lograda recorrido un cierto tiempo después del hincado para verificar los fenómenos de la “cicatrización” (aumento de la capacidad de carga con el tiempo), o “relajación” (diminución de la capacidad de carga con el tiempo), del pilote.

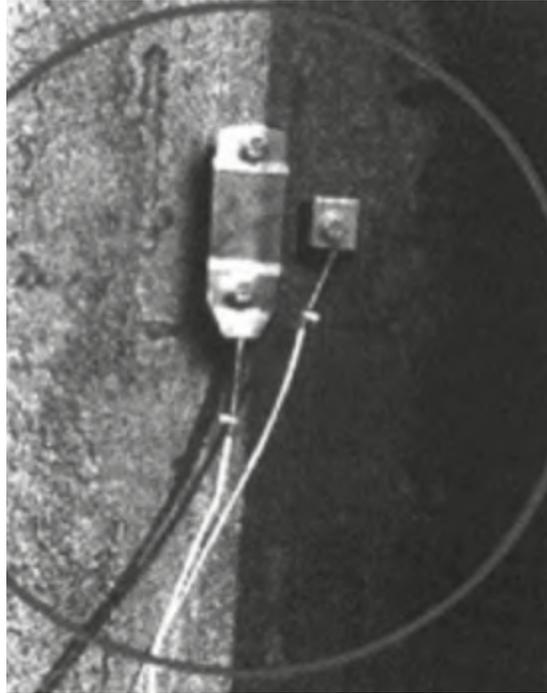


Fotografía 8. Registro de repique.

4.4 PRUEBAS DE CARGAS

4.4.1 Dinámicas.

Esta prueba, basada en la Ecuación de la Onda, y más completo que el repique. Consiste en acoplar al pilote un par de transductores de deformación específica y un par de acelerómetros, posicionados en planos ortogonales, para poder corregir eventuales efectos debido a la flexión del pilote en función de la no coincidencia del golpe del pilar con el eje del pilote (fotografía 9). Esos transductores son conectados "on line" a un analizador PDA (Pile Driving Analyser) mostrado en la fotografía 10.



Fotografía 9. Transductores de aceleración y deformación específica.



Fotografía 10. Equipamientos PDA para procesamiento de las señales de los transductores acoplados al pilote.



El PDA procesa los datos recibidos de los transductores y los procesa obteniendo señales de velocidad (integración de la aceleración), y de fuerza (Ley de Hooke aplicado a la señal de deformación específica).

La interpretación de las señales indica la estimativa de la carga movilizada durante cada golpe de la maza. Cabe recordar que la carga movilizada por los golpes de la maza no siempre corresponde a la capacidad de carga geotécnica del pilote, pues la misma depende de la energía aplicada al pilote por los golpes de la maza.

Solamente en el caso que esa energía sea suficiente para movilizar toda la resistencia del suelo alrededor del pilote es que ese valor medido por el ensayo de carga dinámica podrá aproximarse a la capacidad de carga del pilote.

4.4.2 Estáticas.

Las pruebas de carga estática consisten en aplicar al pilote una carga y medir los desplazamientos correspondientes. Por lo tanto, se emplea un gato hidráulico que reacciona contra un sistema de vigas metálicas, que a su vez se ancla en tirantes o en pilotes de tracción. La utilización de pilotes metálicos facilita la ejecución de pruebas de carga estática, pues se pueden utilizar pilotes del propio conjunto como elementos de tracción, conforme se muestra en la fotografía 11.

Una o varias pruebas estáticas pueden ser realizadas y deben ser una herramienta para verificar que los pilotes instalados tengan una capacidad de carga al menos igual a la requerida por el proyecto.

Las pruebas de carga se pueden realizar en diferentes elementos:

- **Sobre pilotes diseñados específicamente para llevar al fallo (no forman parte de la estructura final).**
- **En cimentaciones con pilotes que forman parte de la estructura. En este caso las pruebas de carga estática no necesitan llegar a la falla. En efecto, la aplicación de una prueba de carga no deberá el 150% de la carga permisible. Esta es suficiente para evaluar correctamente el comportamiento del pilote y evaluar su desempeño.**

La mayoría de los pilotes no son instrumentados y el desplazamiento medido en la cabeza del pilote en relación con la carga aplicada suele ser suficiente, pero es importante que el procedimiento de carga sea monitoreado y ejecutado con precisión.



Fotografía 11. Prueba de Carga Estática.

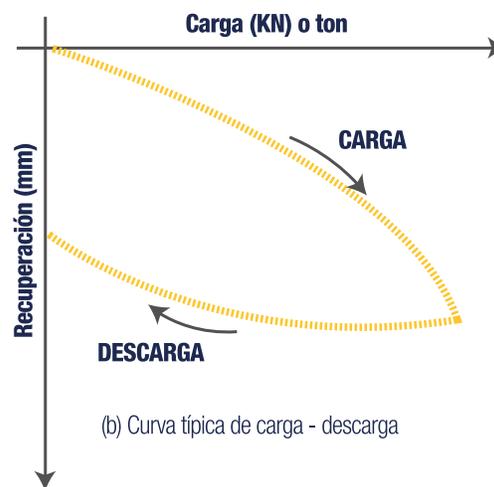


Figura 19. Curva típica de una prueba de carga.

La prueba de carga estática es el método más confiable e indiscutible para evaluar la capacidad de carga de un pilote aislado. Los ensayos de carga dinámica, aunque sean atractivos del punto de vista de costo, siempre necesitarán de correlaciones. Y por esta razón es que algunos proyectistas de cimentaciones cuestionan los resultados de los ensayos PDA y sugieren que los mismos sean respaldados, por lo menos, por una prueba de carga estática.

4.4.3 Instrumentación.

Cuando se pretende verificar la transferencia de carga pilote suelo se utilizan “strain gages” unidos al pilote, y en puntos estratégicos conforme se muestra en la fotografía 9, donde se quería verificar la transferencia de carga en las capas de arena y en la punta del pilote.

Los “strain gages” se basan en el principio de la variación de la resistencia eléctrica de hilos que experimentan variaciones de longitud, utilizándose el “Puente de Wheastone”. Una adquisición de datos y la interpretación de los mismos son mostrados en la figura 20. Con base en esos valores medidos es posible determinar, para cada profundidad instrumentada, la carga actuante en el pilote para cada nivel de carga. El resultado de la prueba de carga instrumentada de la figura 20 y mostrada en la figura 19. Con base en esa figura se percibe que después de la descarga del pilote quedó una carga residual en la misma, o sea, el pilote “quedó preso”, no consiguiendo volver totalmente.

Pero un hecho importante (posteriormente constatado en otras instrumentaciones), es que la carga de punta de los pilotes metálicos, cuando están apoyados en suelo poco resistente (como en el presente caso), es muy próxima a cero, mostrando que no se puede considerar, para ese tipo de pilote. El concepto ampliamente divulgado en el medio geotécnico de que el área de la punta que contribuye para la capacidad de carga corresponde a aquella obtenida con el rectángulo envolvente a la sección transversal del perfil metálico.

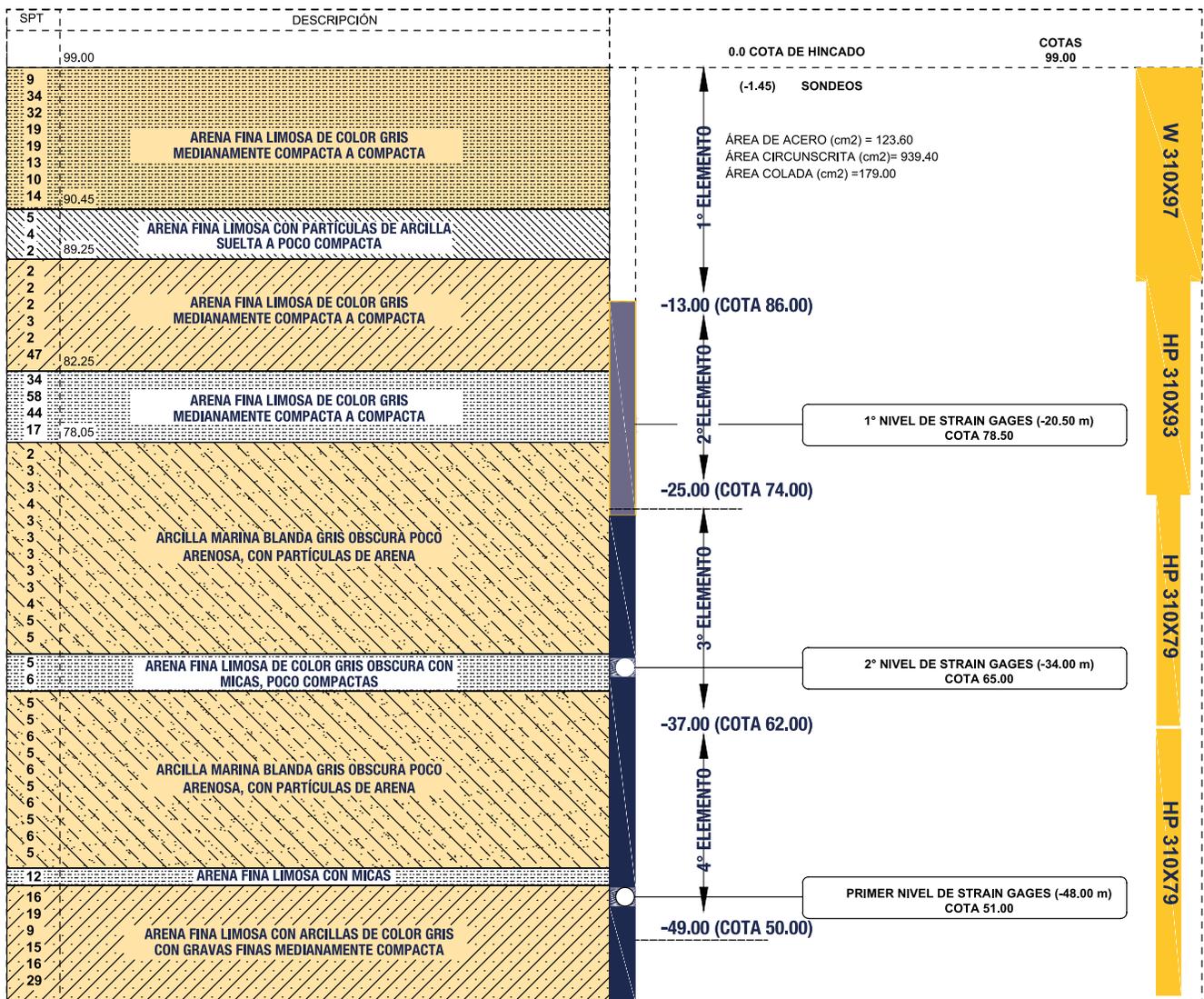


Figura 20. Posición de strain gages en prueba de carga n° 31.



5. CASOS DE EJECUCIÓN DE OBRAS

5.1 PRIMERA CIMENTACIÓN CON PILOTES METÁLICOS GERDAU, HINCADAS CON MARTILLO VIBRATORIO, EJECUTADA EN BRASIL

La primera cimentación con pilotes GERDAU hincada con martillos vibratorios ocurrió a finales de 2011 en el Laminador 4 de GERDAU COSIGUA, en Santa Cruz, en Rio de Janeiro. En esta obra fueron hincados 192.287 m de pilotes con longitudes de entre 33 a 40 m.

El perfil geotécnico (típico), representativo de esa obra se presenta en la figura 21.

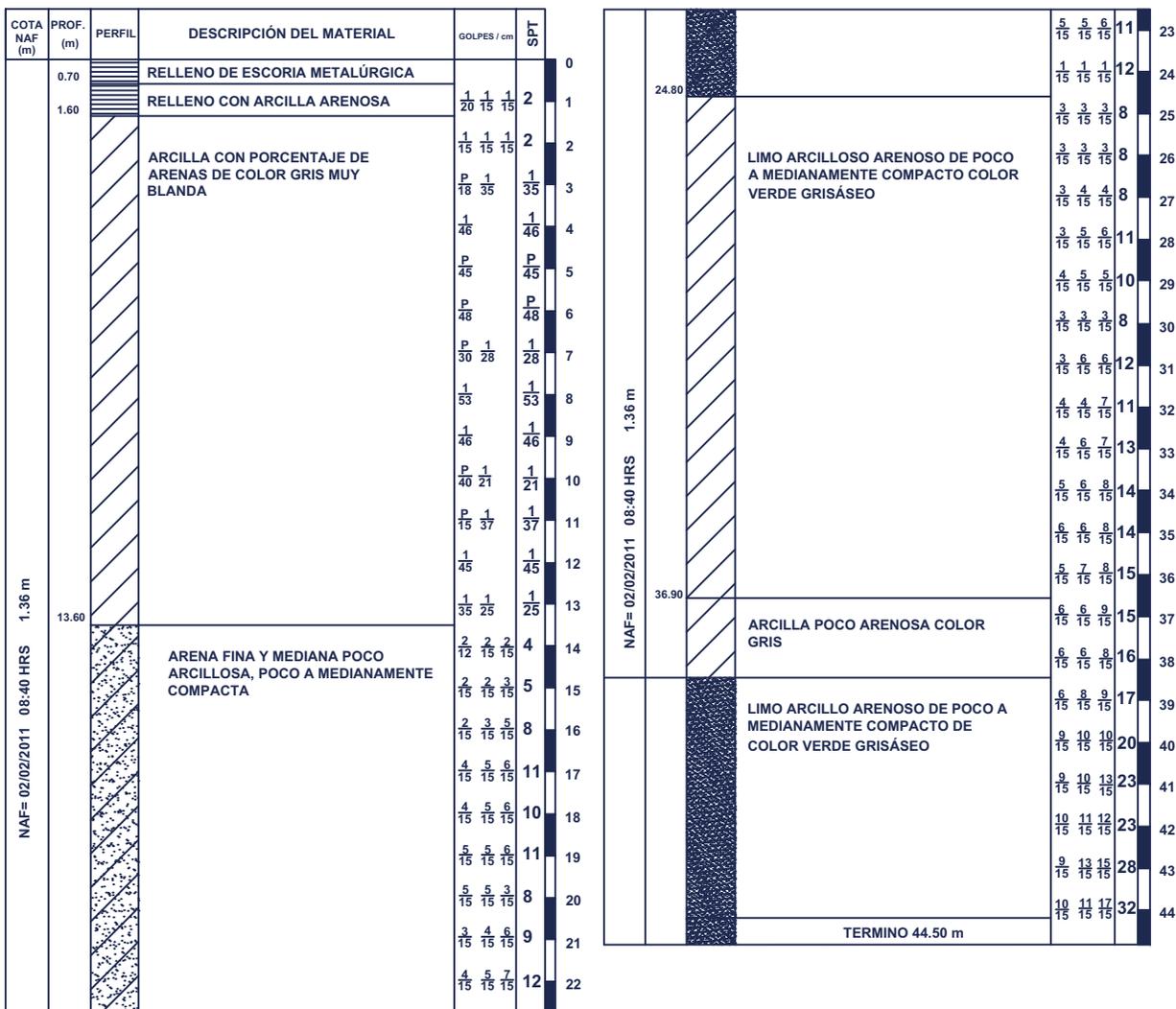


Figura 21. Perfil estratigráfico en el laminador GERDAU CONSIGUA, Santa Cruz, Río de Janeiro.

Por ser la primera obra, no se tenía experiencia en este tipo de procedimiento, y al final el hincado de los pilotes (inclusive midiendo la tasa de penetración), fue realizado con martillo hidráulico de impacto.

En la obra fueron realizadas nueve pruebas de carga estáticas cuyos resultados, junto con las demás realizadas, están presentadas en este manual agrupadas en pilotes hincados con martillo vibratorio (pilotes identificados con V) y de impacto (pilotes identificados con I).

La tabla 5 presenta la localización de las ciudades donde se ejecutaron algunas de las pruebas de carga estáticas en pilotes hincados con martillo vibratorio y, en las tablas 6 y 7, los datos relevantes de las mismas. Análogamente, en las tablas 8 a 10 se reproducen las pruebas de carga, realizadas en pilotes hincados a percusión por martillos de impacto.

Para permitir la constitución de las curvas carga-desplazamiento de esas pruebas de carga fueron elaboradas las Tablas 6 y 9. En esas tablas los desplazamientos son presentados para puntos fijos de carga correspondientes a 0,25P; 0,5P; 0,6P; 0,7P; 0,8P; 0,9P y P, siendo P la carga máxima de ensayo. Los valores superiores de estas tablas presentan, para cada pilote, los asentamientos medidos durante la carga, y los inferiores durante la descarga. Análogamente es presentada la figura con un sondeo a percusión junto a cada pilote. En esa figura, el inicio de los datos del suelo coincide con la cota de hincado del pilote. Para identificar el tipo de suelo fue utilizada una convención de 3 indicadores. El indicador 1 significa arena, el 2 limo y el 3 arcilla.

Cuando no existe un determinado tipo de suelo se identifica como 0 para completar la serie de 3 indicadores. Por ejemplo, el suelo clasificado como 123 significa arena limosa arcillosa y el suelo clasificado como 320 corresponde a una arcilla limosa.

| CÓDIGO DE SUELO | | | | | |
|-----------------|------------------------|-----|----------------------|-----|----------------------|
| 100 | Arena | 200 | Limo | 300 | Arcilla |
| 120 | Arena Limosa | 210 | Limo arenoso | 310 | Arcilla arenosa |
| 123 | Arena Limosa Arcillosa | 213 | Limo areno arcilloso | 312 | Arcilla areno limosa |
| 130 | Arena Arcillosa | 230 | Limo arcilloso | 320 | Arcilla limosa |
| 132 | Arena arcillo-limosa | 231 | Limo arcillo arenoso | 321 | Arcilla limo arenosa |

Tabla 5. Localización y datos relevantes de pilotes ensayados a compresión e hincados a percusión por vibro hincado.

| | LOCALIZACIÓN | | | PILOTE | | Pmáx (Ton) | |
|------|--------------|------------|------------------------------|--|---|------------------|-----|
| | Estado | Ciudad | Dirección | Composición | (m) | | |
| V.1 | RJ | Santa Cruz | Laminador Gerdau Consigua | W 610 x 101 (33.37) | 33.37 | 282 | |
| V.2 | | | | W 610 x 101 (31.65) | 31.65 | 244 | |
| V.3 | | | | H 200 x 53 (40) | 40 | 200 | |
| V.4 | | | | H 250 x 85 (40.55) | 40.55 | 285 | |
| V.5 | | | | W 610 x 101 (37.5) | 37.5 | 248 | |
| V.6 | | | | W 610 x 101 (40.40) | 40.4 | 300 | |
| V.7 | | | | H 250 x 85 (39.92) | 39.92 | 290 | |
| V.8 | | | | W 610 x 101 (40.40) | 40.4 | 400 | |
| V.9 | | | | W 610 x 101 (40.39) | 40.39 | 280 | |
| V.10 | | | | B. de Tijuca | R. Martinho de Mesquita | H 310 x 125 (38) | 38 |
| V.11 | SP | Santos | R. Castro Alves | W 310 x 107 - 97 - 93 - 79 - (21.5 - 12 - 12 - 12) | 57.5 | 400 | |
| V.12 | | | Av. Osvaldo Cruz | W 310 x 107 - 97 - 93 - 79 - (12 - 12 - 12 - 14) | 50 | 400 | |
| V.13 | | | Av. Presidente Wilson | W 310 x 107 - 97 - 93 - 79 - (12 - 12 - 12 - 14) | 50 | 400 | |
| V.14 | | | | H 310 x 125 (42.5) | 42.5 | 460 | |
| V.15 | | | | H 310 x 125 (38.6) | 38.6 | 460 | |
| V.16 | | | H 310 x 125 (35.7) | 35.7 | 272 | | |
| V.17 | | | H 310 x 125 (32.2) | 32.2 | 460 | | |
| V.18 | | | Av. Marechal Floriano | H 310 x 125 - 117 - 110 (15.5 - 12 - 12) | 39.5 | 422 | |
| V.19 | | | Peixoto | H 310 x 125 - 117 - 110 (8.5 - 12 - 12) | 32.5 | 364 | |
| V.20 | | | Praia Gde. | R. Itapura de Miranda | W 300 x 117 - 107 - 97 - 79 (12 - 12 - 12 - 18) | 54 | 410 |
| V.21 | | | | R. G. O. R. Franco | W 310 x 93 - 79 (28.20 - 12) | 40.2 | 360 |
| V.22 | | | | W 310 x 93 - 79 (28.30 - 12) | 40.3 | 360 | |
| V.23 | | | | R. Xixová | W 300 x 107 - 97 - 79 (12 - 12 - 12 - 12) | 48 | 408 |
| V.24 | | | | W 300 x 107 - 97 - 79 (12 - 12 - 12 - 8) | 44 | 400 | |
| V.25 | | | Sao Vicente | R. Freitas Guimaraes | H 310 x 93- 79 (14-36) | 50 | 300 |

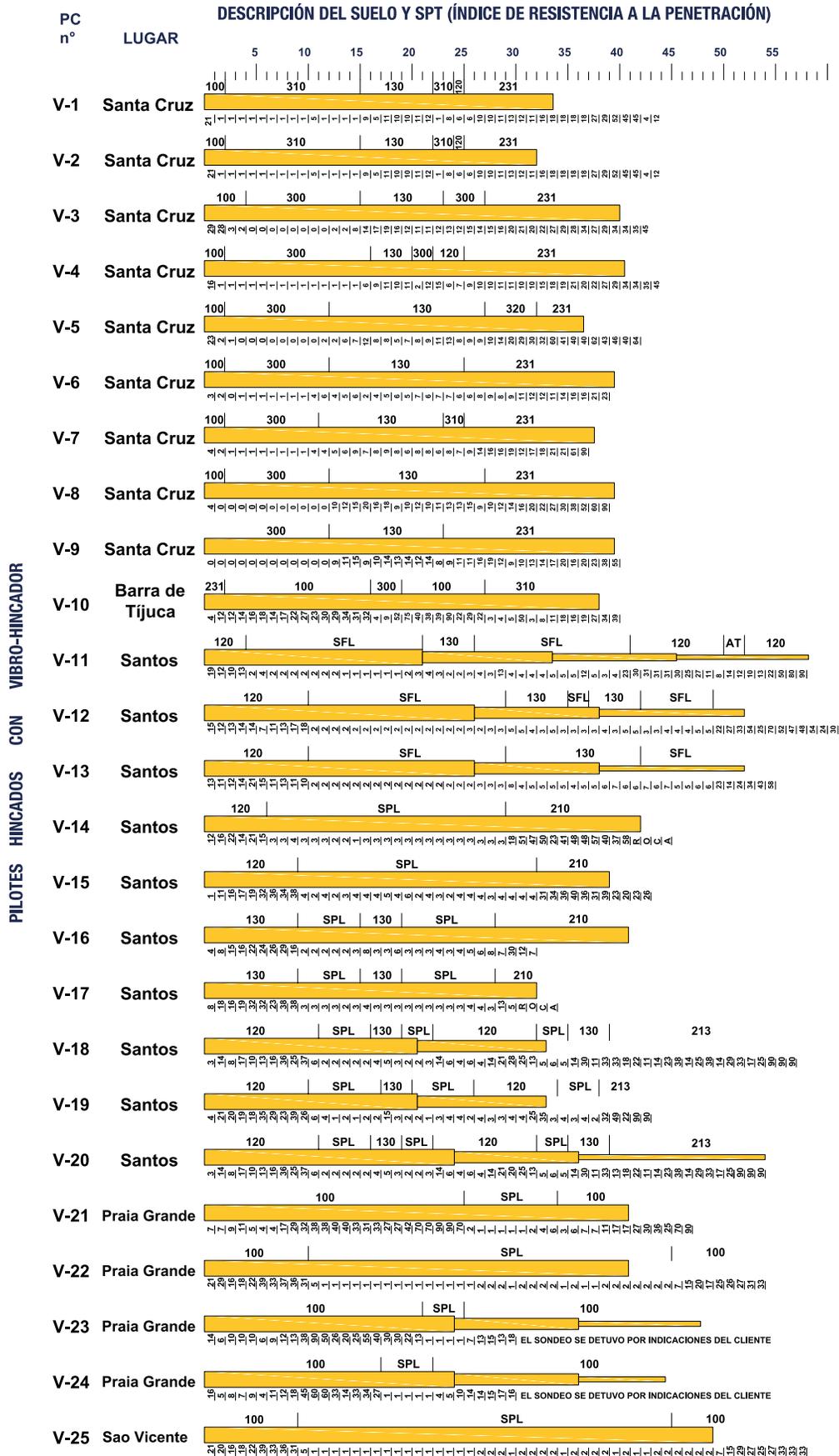


(* H 310 x 125 - 110 - 93 - 79 (a-b-c-d) significa (de la cabeza a la punta del pilote):

Tabla 6. Asentamientos (mm), de los pilotes comprimidos e hincados con martillo vibratorio. Valor de r sobre carga máxima P_{máx} correspondiente al asentamiento residual (para P=0), en la descarga.

| No | Ciudad | Long (m) | P Máx (ton) | Valores superiores para carga e inferiores para descarga | | | | | | | |
|------|-------------|-----------------|-------------|--|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------|-------|
| | | | Residual | 0.25 P _{máx} | 0.5 P _{máx} | 0.6 P _{máx} | 0.7 P _{máx} | 0.28 P _{máx} | 0.9 P _{máx} | P _{máx} | |
| V.1 | Santa Cruz | 33.37 | 282 | 5 | 282 | 282 | 282 | 282 | 282 | 282 | 282 |
| V.2 | | 31.65 | 244 | 3 | 7 | 10 | 12 | 15 | 20 | 73.18 | - |
| V.3 | | 40 | 200 | 10 | 21 | 26.9 | 28.5 | 34.64 | 40.49 | 46.1 | - |
| V.4 | | 40.55 | 285 | 6 | 15.86 | 21.94 | 25.56 | 31.93 | 38.17 | 59.78 | - |
| V.5 | | 37.5 | 248 | 4.51 | 9.84 | 12 | 16 | 19 | 22 | 33.65 | - |
| V.6 | | 40.4 | 300 | 7 | 14 | 16 | 20 | 23 | 30 | 40 | - |
| V.7 | | 39.92 | 290 | 7 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | - |
| V.8 | | 40.4 | 400 | 9 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | - |
| V.9 | | 40.39 | 280 | 2 | 5 | 16 | 20 | 24 | 28 | 37 | - |
| V.10 | | Barra de Tijuca | 38 | 500 | 2.2 | 6.69 | 11 | 18 | 22 | 30 | 40.74 |
| V.11 | 57.5 | | 400 | 4 | 12.27 | 23 | 30 | 30 | 37 | 45 | - |
| V.12 | Santos | 50 | 400 | 5 | 13.62 | 18.55 | 24.44 | 30.65 | 38.05 | 46.12 | - |
| V.13 | | 50 | 400 | 5 | 13.22 | 17.28 | 23.54 | 28.74 | 37.32 | 45.02 | - |
| V.14 | | 42.5 | 460 | 3.5 | 11.4 | 15 | 18.5 | 23 | 27 | 30.82 | - |
| V.15 | | 38.6 | 460 | 9 | 18 | 24 | 27 | 32 | 39.5 | 45.14 | - |
| V.16 | | 35.7 | 272 | 4 | 8.45 | 11 | 14 | 16 | 19.5 | 51.27 | - |
| V.17 | | 32.2 | 460 | 3 | 9.42 | 13.83 | 16.8 | 21.49 | 25 | 29.77 | - |
| V.18 | | 39.5 | 422 | 2 | 6.15 | 8.59 | 12.56 | 14.96 | 18.32 | 22.02 | - |
| V.19 | | 32.5 | 364 | 4.5 | 11 | 14 | 17 | 20.5 | 23.5 | 28.5 | - |
| V.20 | | 54 | 410 | 4 | 12 | 15.1 | 20 | 24 | 34 | 42.29 | - |
| V.21 | | Praia Grande | 40.2 | 360 | 5 | 11 | 13.5 | 17 | 22.5 | 32 | 41.97 |
| V.22 | 40.3 | | 360 | 5 | 11 | 13.5 | 17 | 22.5 | 32 | 29.05 | - |
| V.23 | 48 | | 408 | 4.01 | 12.29 | 15.1 | 20 | 25 | 29 | 30.87 | - |
| V.24 | 44 | | 400 | 4 | 9.8 | 12.47 | 16.39 | 19.96 | 24.96 | 29.8 | - |
| V.25 | Sao Vicente | 50 | 300 | 3.5 | 6.65 | 9.66 | 12.14 | 14.94 | 18.18 | 22.6 | - |
| | | 4.23 | 12 | 16.42 | 18 | 20 | 22 | 22.6 | - | - | |

Tabla 7. Cuadro resumen de las pruebas de carga a compresión sobre los pilotes.



PILOTES HINCADOS CON VIBRO-HINCADOR

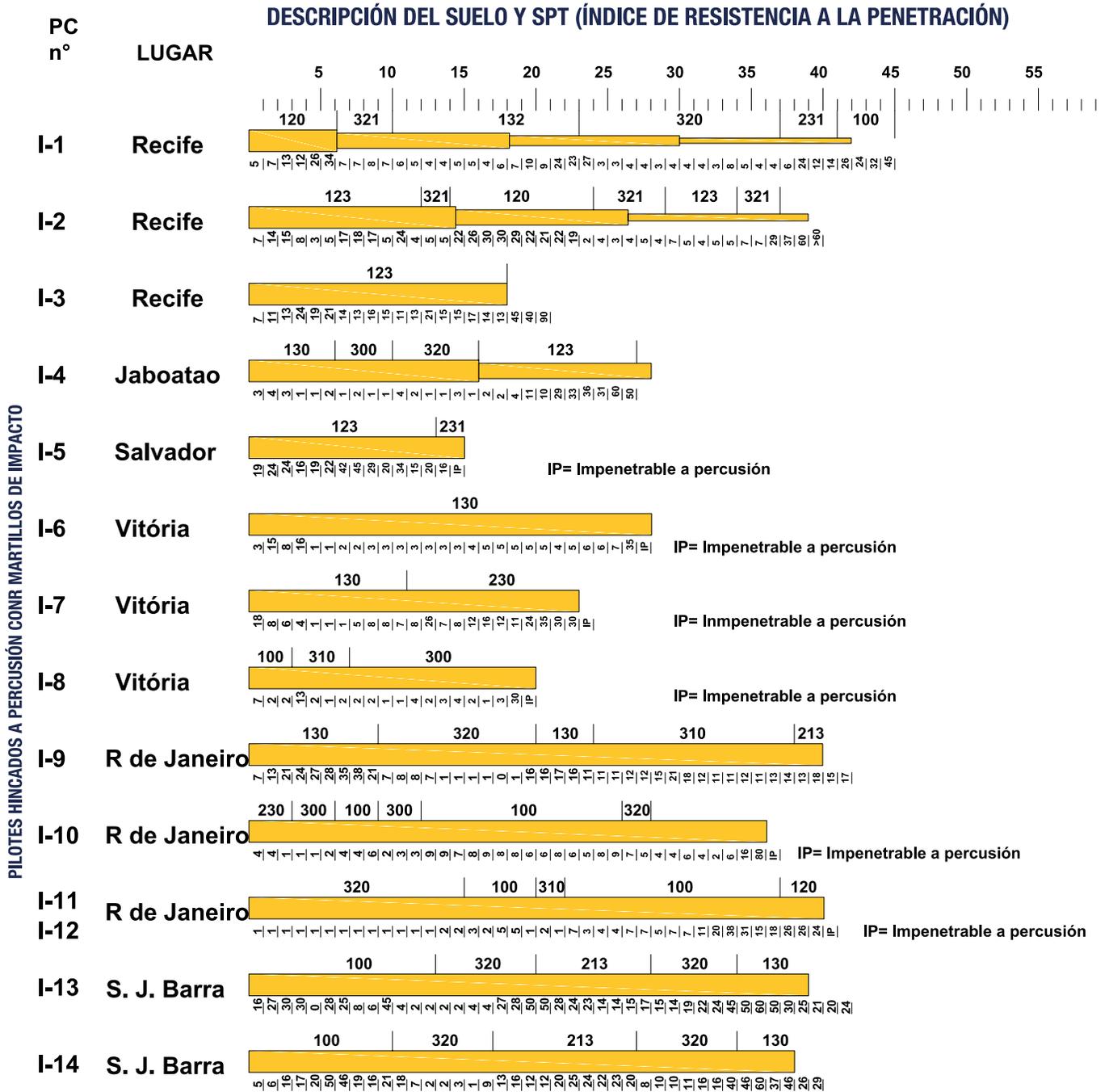


Tabla 8. Localización y datos relevantes de pilotes ensayados a compresión e hincados a percusión por martillos de impacto.

| | LOCALIZACIÓN | | | PILOTE | | P _{máx} (ton) |
|------|----------------------|--|--|---|---------------------|------------------------|
| | Estado | Ciudad | Dirección | Composición | (m) | |
| I.1 | PE | Recife | Av. Boa Vagem | H 310 x 125 - 110 - 93 - 79 (6-12-12-12) | 42.0 | 361 |
| I.2 | | | Av. Casi Sta. Rita | H 310 x 125 - 93 - 79 (14.7-12-12) | 38.7 | 479 |
| I.3 | | | Av. Boa Vagem | H 310 x 93 (18.50) | 18.5 | 300 |
| I.4 | | Jaboatão | Av. Barreto Menezes | W 410 x 67 - 53 (15.9-12.1) | 28.0 | 210 |
| I.5 | BA | Salvador | Predio en Costa Azul | W 250 x 73 (14.20) | 14.2 | 240 |
| I.6 | | R. Aleixo Nieto | W 150 x 37.1 (28.5) | 28.5 | 160 | |
| I.7 | ES | Vitória | Av. N. Sa. Navegantes | W 150 x 37.1 (23.5) | 23.5 | 160 |
| I.8 | | Barrio Vermelho | W 150 x 37.1 (19) | 19.0 | 90 | |
| I.9 | RJ | R. Janeiro | R. Vol. De la Patria | W 310 x 52 (19) | 38.5 | 193 |
| I.10 | | Santa Cruz | CSA | W 610 x 155 (35.50) | 35.5 | 468 |
| I.11 | | | CSA | W 610 x 125 (40.50) | 40.5 | 497 |
| I.12 | | | CSA | H 610 x 155 (39.00) | 40.5 | 382 |
| I.13 | | | S.J. Barra | Terminal Portuario | H 310 x 125 (39.00) | 39.0 |
| I.14 | | Terminal Portuario | | H 310 x 125 (38.50) | 38.5 | 330 |
| I.15 | | Terminal Portuario | | H 310 x 125 (38.50) | 38.5 | 330 |
| I.16 | | Macaé | Av. Elías Agostinho | W 150 x 29.8 (6.55) | 6.55 | 120 |
| I.17 | SP | Sao Paulo | R. María Cándida | H 310 x 110 - 93 - 79 - (10-6-12) | 28.0 | 400 |
| I.18 | | S. Caetano | R. José Benedetti | H 310 x 79 (18.80) | 18.8 | 234 |
| I.19 | | Guarujá | Calle Conceicaoonha | Mixto PERF. PREV. (23.10 m) + W 610 x 155 (10 m) | 33.1 | 220 |
| I.20 | | | Av. Del Parque | W 200 x 46.1-35.9 (24-24) | 48.0 | 165 |
| I.21 | | | R. Vitória Yunes Stefaine | H 310 x 79 (32) | 32.0 | 288 |
| I.22 | | | Av. Gal. Monteiro Barros | H 310 x 110 - 93 - 79 - (15-12-16.9) | 43.9 | 360 |
| I.23 | | Bertioga | Av. Thomé de Sousa | H 250 x 62 (29.7) | 29.7 | 240 |
| I.24 | | | Av. Thomé de Sousa | H 250 x 62 (29.7) | 32.4 | 240 |
| I.25 | | P. Grande | Av. Castelo Branco | H 310 x 110 - 93 - 79 - (14.30-12-24) | 50.3 | 400 |
| I.26 | | Santos | Cereal Sul | H 250 x 89 - 80 - 73 - 62 (4.85-12-12-12) | 40.85 | 325 |
| I.27 | | | R. Minas Gerais | H 310 x 125 - 110 - 93 - 79 (10.5-12-12-12) | 46.5 | 386 |
| I.28 | | | Canal 6 | H 310 x 110 - 93 - 79 (7.5-12-24) | 43.5 | 383 |
| I.29 | | | R. Dom Lara | W 310 x 107-97-H 93 - 79 (11.1-12-12-12) | 47.0 | 396 |
| I.30 | | | R. Álvarez Azevedo | H 310 x 110 - 93 - 79 (8-8-32) | 48.0 | 302 |
| I.31 | | | R. Tocantins | W 310 x -97-93-79 (13-12-24) | 49.0 | 350 |
| I.32 | | | Av. Rei Alberto | H 310 x 110 - 93 (18.3-36) | 54.3 | 334 |
| I.33 | | | R. Castro Alves | H 310 x 117-97 - 93-79 (17.4-12-12-12) | 53.4 | 418 |
| I.34 | | | R. Cel. Pedro Arbus | H 310 x 110- 93-79 (15-12-24) | 51.0 | 320 |
| I.35 | | | R. Álvaro Alvin | H 310 x 125- 110 (29.4-24) | 53.4 | 329 |
| I.36 | | | R. Bahía de Abreu | H 310 x 110- 93- 79 (15-12-12-12) | 52.0 | 384 |
| I.37 | P. Fernandes Pacheco | | H 310 x 107- 97-93- 79 (15-12-12-12) | 51.0 | 350 | |
| I.38 | R. Cyria | | H 310 x 125- 110- 93-79 (10.8-12-12-6) | 40.8 | 400 | |
| I.39 | R. Clay Presgrave | | H 310 x 117- 110- 107-97 (17-12-12-12) | 53.0 | 400 | |
| I.40 | R. Bahía | W 310 x -107-97-93-79 (12-12-12-11.50) | 47.5 | 391 | | |
| I.41 | SC | Itajaí | TECONVI | (MIXTO) PRETENSADO 70 x 70 (13.10 m) + W 610 x 101 (7.50) | 20.6 | 463 |

(*) H 310 x 125 - 110 - 93 - 79 - (a-b-c-d) significa (De la parte superior a la punta del pilote)

Tabla 8. Cuadro resumen de las pruebas de carga a compresión sobre los pilotes.



PILOTES HINCADOS A PERCUSIÓN CONR MARTILLOS DE IMPACTO



Tabla 9. Cuadro resumen de las pruebas de carga a compresión sobre los pilotes.

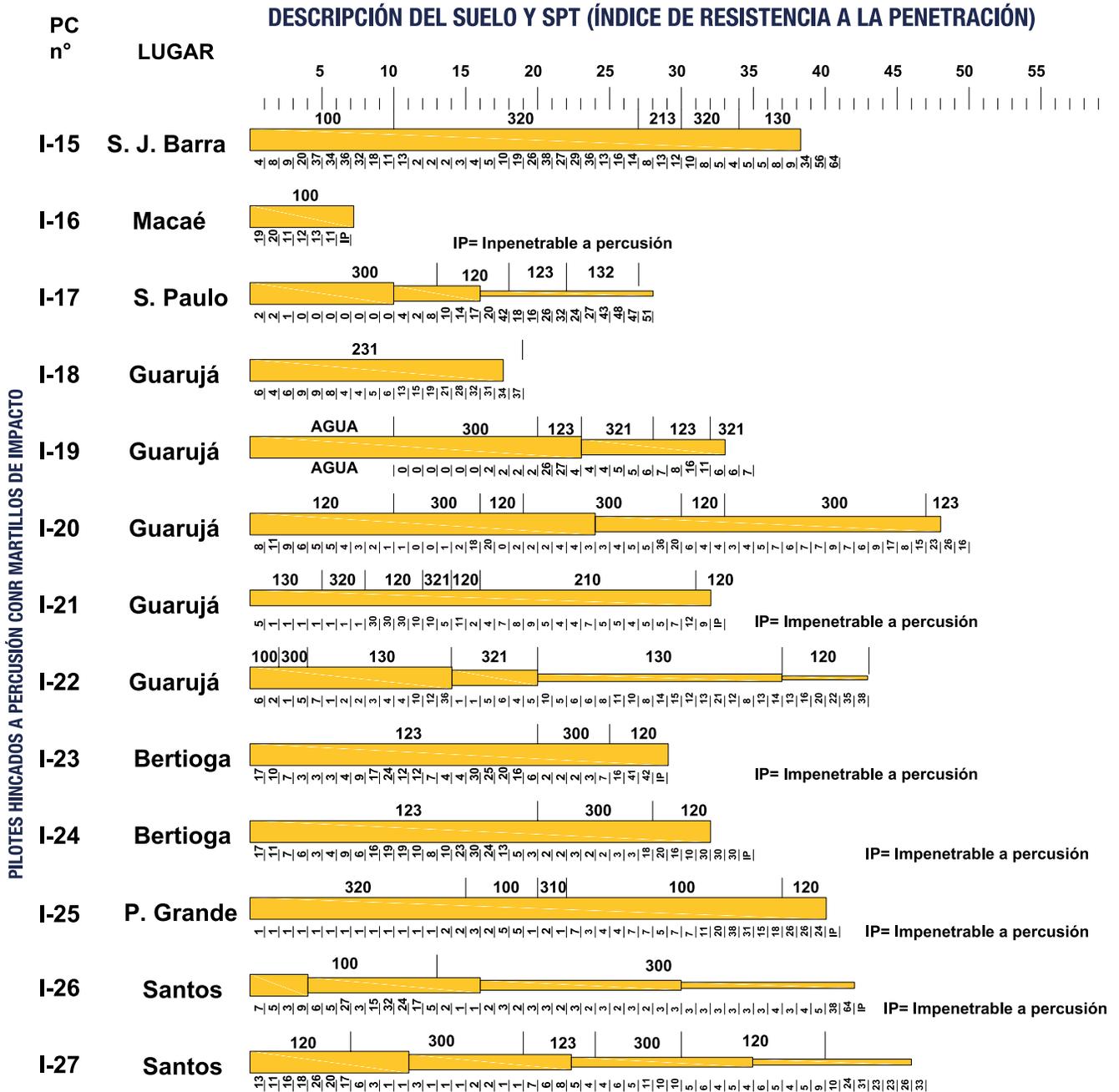
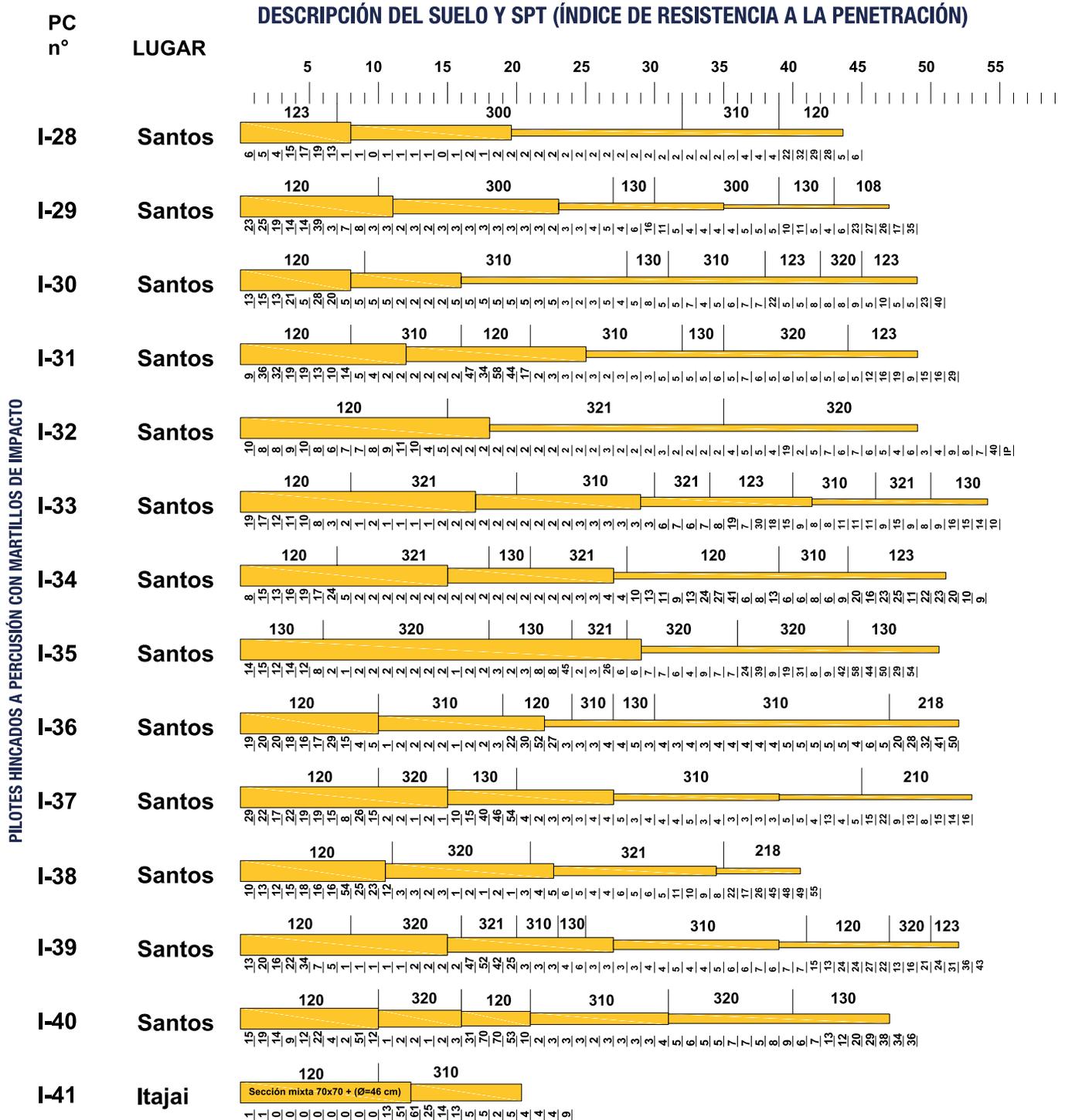


Tabla 10. Cuadro resumen de las pruebas de carga a compresión sobre los pilotes.



PILOTES HINCADOS A PERCUSIÓN CON MARTILLOS DE IMPACTO





5.2 OBRAS DE HINCADO DE PILOTES EN MÉXICO

5.2.1 Hincado de pilotes para cimentación de equipos.

Datos:

- Proyecto de cimentación con pilotes de acero que servirá como soporte para la instalación de equipos mecánicos.
- Tipo de suelo: zona del lago en el Valle de México.
- Hincado de Perfiles sección W12 x 26 lbs/pie.
- Longitud de hincado: 24 metros, se utilizaron 6 tramos de 4 metros.
- Equipo de hincado: Martillo de caída libre.
- Rendimiento: Se necesitó aplicar soldadura en 5 uniones por lo que al día se hincaba un pilote.



Arreglo de pilotes.



Conexión pilotes contratraves.



5.2.2 Hincado de pilotes para cimentación de columnas en naves industriales.

Datos:

- Proyecto de cimentación con pilotes de acero que servirá como soporte para la instalación de columnas para naves industriales.
- Tipo de suelo, arena limosa poco compacta y arena limosa media.
- Hincado de perfiles sección W8x15 lbs/pie.
- Longitud de hincado: 4 metros.
- Equipo de hincado: Máquina hincapostes.
- Rendimiento: Se hincaron 22 pilotes por día, en 3 días de término el hincado para 3 naves.



Conexión pilote-columna.



Equipo de hincado de pilotes

5.2.3 Hincado de pilotes para cimentación de edificio de oficinas.

Datos:

- Proyecto de cimentación con pilotes de acero que servirá como soporte para un edificio de oficinas de 8 niveles
- Tipo de suelo: zona del lago en el Valle de México
- Hincado de Perfiles sección W24 x 62 lbs/pie
- Longitud de hincado: 21 metros, se utilizaron 2 tramos (1 de 12 metros y otro de 9 metros)
- Equipo de hincado: Martillo Diésel
- Rendimiento: Se hincaron 7 pilotes por día, incluye el tiempo de una conexión soldada



Arreglo de pilotes.



Equipo de hincado de pilotes.



5.2.4 Hincado de pilotes para re-cimentación de edificio de 4 niveles.

Datos:

- Proyecto de re-cimentación para edificio de 4 niveles
- Tipo de suelo: Zona del lago en el Valle de Mexico
- Hincado de Perfiles sección W8 x 13 lbs/pie
- Longitud de hincado: 20 metros, se utilizaron 10 tramos de 2 metros, debido a la restricción de altura
- Equipo de hincado: Martillo de caída libre
- Rendimiento: Se necesitó aplicar soldadura en 9 uniones por lo que al día se hincaban 2 pilotes al día



Arreglo de pilotes.



Habilitado de pilotes.

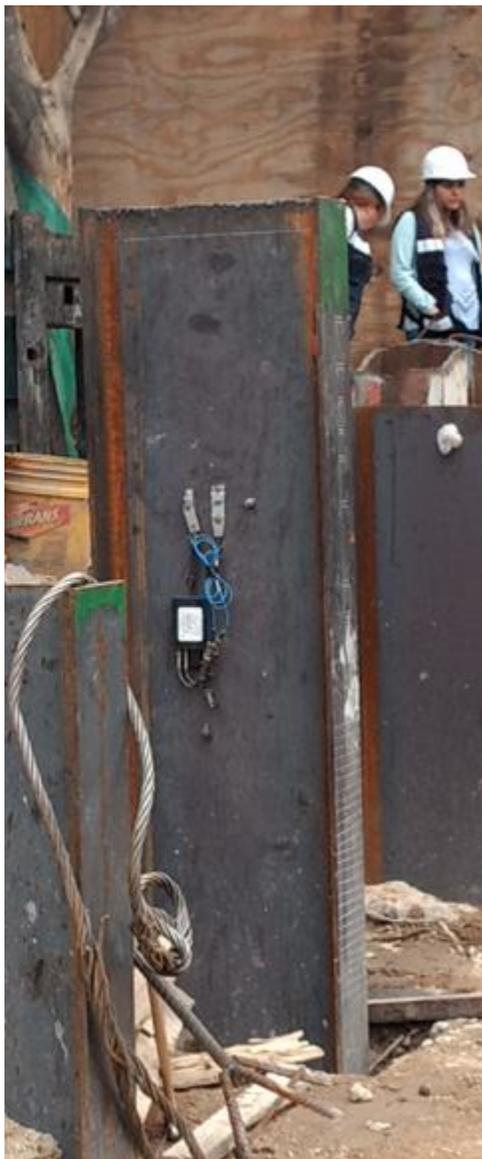


5.3 PRUEBA DE CARGA DINÁMICA

5.3.1 Prueba de carga dinámica para pilotes de acero.

Datos:

- Proyecto de cimentación con pilotes de acero que servirá como soporte para un edificio de oficinas de 8 niveles
- Tipo de suelo: Zona del lago en el Valle de México
- Hincado de Perfiles sección W24x62 lbs/pie
- Longitud de hincado: 21 metros
- Equipo de hincado: Martillo de diésel DELMAG D22-02, peso de ariete de 2.2 ton. y una energía máxima de 6.7 ton-m
- Método: Analizador de pilotes PDA modelo PAX y el programa CAPWAP
- Capacidad de diseño: 100.46 ton
- Resultados de la prueba: 101 ton; 94 ton por fuste y 7 ton por punta



Instrumentación de pilote.



Aplicación de carga.



Registro de información.

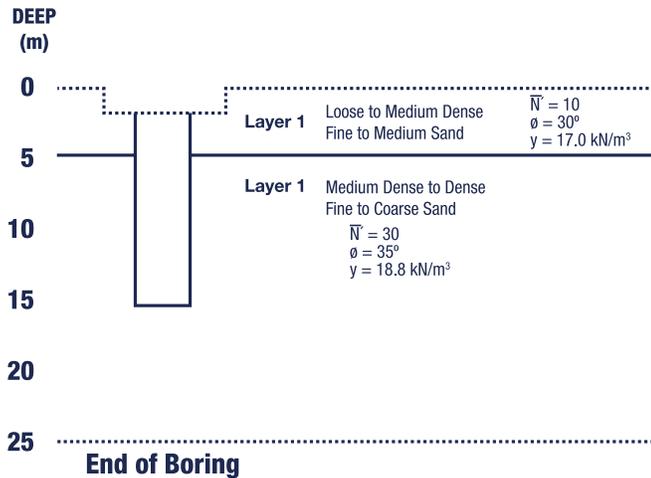


6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. T. Davisson y K. E. Robison, Bending and Buckling of Partially Embedded Piles, Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1965, pp. 243-246.
- [2] IMCA, Manual de Construcción en Acero, 5a ed., A. Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, Ed., México, DF: Limusa, 2015.
- [3] European Committee For Standardization, Eurocode 3. Design of Steel Structures – Part 5: Piling (EN 1993-5: 2007), Section 4, Durability, Brussels, 2007.
- [4] U. R. Alonso, Previsão da Capacidade de Carga Geotécnica de Estacas Metálicas com a Ponta em Solo “Pouco Competente”, vol. 1, São Paulo: SEFE VI, 2008, pp. 487-495.
- [5] N. Aoki y D. A. Velloso, Un Método Aproximado para Calcular la Capacidad de Carga de Pilotes, Buenos Aires: V Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, 1975, pp. 367-376.
- Artículo técnico “Corrosión (Durabilidad de Pilotes Metálicos hincados en el Suelo)” Fabio Domingos Pannoni, Ph.D., Gerdau Açominas, São Paulo, Brasil.
- Beckwith, N.R. (1979). “Corrosion Test Programme of Steel Piles in River Murray Swamp Land South Australia”, Engineering and Water Supply Dept., South Australia.
- Bjerrum, L. (1957). “Norwegian Experiences with Steel Piles to Rock”, Geotechnique, Vol. 7, p. 73.
- 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.
- 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.
- BS 8004 (1986) “British Standard Code of Practice for Foundations”, British Standards Institution, Milton Keynes, UK.
- Eadie, G.R. (1979). “The Durability of Steel Piles in Soils”, Broken Hill Proprietary Co. Ltd., Melbourne Research Laboratories.
- Eadie, G.R. e Kinson, K. (1980). “Examination of Steel Piling Recovered From Port Adelaide After 52 Years Service”, Broken Hill Proprietary Co. Ltd., Melbourne Research Laboratories.
- Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 5: Piling (1993), European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgium.
- LRFD Design Specifications for Highway Bridges (1994).
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.
- Morley, J. (1977). “A Corrosion Examination of Extracted Larssen Piles”, Report T/CS/906/3/77/C, British Steel Technical, Teesside Laboratories.
- Morley, J. (1978a). “A Review of the Underground Corrosion of Steel Piling”, Report T/CS/1114/1/78/C, British Steel Technical, Teesside Laboratories.
- Morley, J (1978b). “A Corrosion Examination of Extracted Piles from Beach Groynes”, Report T/CS/906/6/78/C, British Steel Technical, Teesside Laboratories.
- Morley, J. e 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.
- Morley, J. e Bruce, D.W. (1983). “Survey of Steel Piling Performance in Marine Environments”, ECSC Sponsored Research Contract No. 7210, KB/804, BSC Ref. No. 597 – 811.
- NBR 6122 (1996) “Projeto e Execução de Fundações”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- Osaki, Y. (1982). “Corrosion of Steel Piles Driven in Soil Deposits”, Soil and Foundations, Vol. 22, No. 3, September.
- Romanoff, M. (1957). “Corrosion of Steel Piling in Soil”, National Bureau of Standards, Monograph No. 58, US Dept. of Commerce, Washington, DC.
- Shreir, L.L. (1976). “Corrosion – 2nd. Ed.”, Newnes-Butterworths, London. Steel Bearing Piles Guide (1997). Publication Number P156, The Steel Construction Institute.
- Trethewey, K.R. e Chamberlain, J. (1988). “Corrosion for Students of Science and Engineering”, Longman Scientific & Technical, Harlow (UK).
- Peck, Ralph B. Hanson, Ingeniería de cimentaciones, Editorial Limusa, 2009 Págs. 239 249.

7. ANEXOS

7.1 EJEMPLO DE APLICACIÓN



FHWA. Design and Construction of Driven Piles Foundations. FHWA HI 97-013. National Highway Institute, 1998. Ex. #2

Parámetros geométricos de la sección de análisis **HP 12 x 65**

Área de acero $A_s = 123.2 \text{ cm}^2$

Peralte $d = 27.7 \text{ cm}$

Ancho de la base $b = 30.5 \text{ cm}$

Espesor del patín $t_f = 1.54 \text{ cm}$

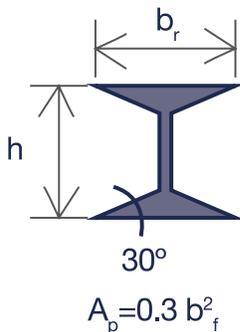
Espesor del alma $t_a = 0.99 \text{ cm}$

$A_t = b \cdot d = 845.5 \text{ cm}^2$

Perímetro de contacto $P = 2 \cdot (d + b) = 1.164 \text{ m}$

Área de la punta en suelos friccionantes medios a densos (Alonso, 2008)

$A_p = 0.3 \cdot b^2 = 279.075 \text{ cm}^2$



Resistencia Lateral

Aoki & Velloso (1975)

El método Aoki y Velloso (1975) puede ser modificado para correlacionar la resistencia a la penetración estándar con aquella dada por el cono eléctrico como se muestra a continuación:

$$q_s = \frac{q_{\text{cono}}}{F_2} = \frac{\alpha \cdot \kappa \cdot N_{\text{SPT}}}{F_2}$$

Donde q_s = fricción lateral unitaria del pilote. En nuestro caso, la resistencia por fricción lateral puede ser escrita como:

$$Q_L = P \sum q_{si} \cdot L_i$$

Para arenas, los factores de corrección del número de golpes son como sigue:

$a = 4.10\%$

$k = 0.33 \text{ MPa}$

$F_2 = 3.50$

Sustituyendo valores

$$Q_{LAV} := P \cdot \left[\left(\frac{\alpha \cdot \kappa \cdot 10}{F_2} \right) \cdot (4.0 \text{ m}) + \left(\frac{\alpha \cdot \kappa \cdot 30}{F_2} \right) \cdot (11 \text{ m}) \right] = 1664.886 \text{ kN}$$

Meyerhof (1976)

Otro método empírico que es contemplado por la AASHTO, es el método de Meyerhoff, con la fricción lateral con la ecuación

$$q_s = (0.958 \text{ kPa}) \bar{N}_{60}$$

Asumiendo que el número de golpes del problema han sido corregidos por el esfuerzo vertical efectivo, la resistencia por fricción del pilote puede ser escrita como:

$$Q_{LM} := P \cdot [(0.958 \text{ kPa} \cdot 10) \cdot (4.0 \text{ m}) + (0.958 \text{ kPa} \cdot 30) \cdot (11 \text{ m})] = 412.591 \text{ kN}$$



Burland (1973)

Usando el método de Burland (1973), la resistencia por fricción lateral puede ser escrita de la siguiente forma:

$$q_s = \kappa \cdot \sigma_e \cdot \tan \delta$$

Donde $K = (1 - \sin \delta)$; q' = esfuerzo vertical efectivo; $\tan \delta$ = coeficiente de rozamiento pilote-suelo. Asumiremos que el rozamiento suelo – pilote corresponde a $2/3 \phi$ con un máximo de 25° . Sustituyendo los valores tenemos que:

Arenas sueltas –

Esfuerzo vertical efectivo

$$\sigma_e := \left(17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) \cdot 2.0\text{m} = 34.000\text{kPa}$$

$$K = 0.5$$

$$\tan \delta = 0.364$$

$$q_s = 6.19 \text{ kPa}$$

Arenas de consistencia media –

Esfuerzo vertical efectivo

$$\sigma_e := \left(17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) \cdot (4.0\text{m}) + \left(18.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} - 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) \cdot (6.5\text{m}) = 125.200 \text{ kPa}$$

$$K = 0.426$$

$$\tan \delta = 0.431$$

$$q_s = 23.03 \text{ kPa}$$

Integrando los términos en la longitud del pilote

$$Q_{LB} := P \cdot [(6.19 \text{ kPa}) \cdot (4.0\text{m}) + (23.03 \text{ kPa}) \cdot (11\text{m})] = 323.6971\text{kN}$$

Resistencia por punta

Aoki & Velloso (1975)

Al igual que la fricción lateral, la capacidad por punta unitaria del pilote puede ser estimada como:

$$q_p = \frac{q_{\text{cono}}}{F_1} = \frac{k \cdot N_{\text{SPT}}}{F_1}$$

Para el nivel de desplante y en el caso de las arenas de consistencia media, se tiene la siguiente capacidad por punta unitaria

$$q_p = \frac{(0.8 \text{ MPa}) \cdot (30)}{1.75} = 13,714.286 \text{ kPa}$$

Por lo que

$$Q_{pAV} = q_p \cdot A_p = 382.731 \text{ kN}$$

Meyerhof (1976)

Por su parte, Meyerhof estima esta resistencia en la punta como:

$$q_p = 40N \frac{L_b}{B} \leq 380N$$

Donde L_b = profundidad de empotre en el estrato resistente y B = dimensión menor del pilote. Así, la resistencia por punta puede ser escrita como:

$$q_p = \min \left(40\text{kPa}\right) \cdot 30 \cdot \frac{11\text{m}}{27.7 \text{ cm}}, 380\text{kPa} \cdot 30 = 11400.000 \text{ kPa}$$

Entonces:

$$Q_{pM} := q_p \cdot A_p = 318.14 \text{ kN}$$

Método de Vesic (1975)

Una ecuación semiempírica para el cálculo de capacidad de carga es el de Vesic, que usa factores de capacidad de carga N_q , de forma dq , esfuerzo efectivo $\sigma'v$ como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$q_{ps} := \eta \cdot \sigma'_v \cdot N'_q \cdot d_q$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \theta (1 - \sin \theta)^2 \tan^{-1} L/B$$

$$N'_q = \frac{3}{3 - \sin \theta} \left\{ e^{(\pi/2 - \theta) \tan \theta} \tan^2 \left(45 + \frac{\theta}{2}\right) I_{rr}^{1.33 \frac{\sin \theta}{1 + \sin \theta}} \right\}$$

Con la siguiente serie de valores, la presión unitaria límite es calculada como:

| | |
|-----|------------|
| n | 0.62 |
| s'v | 164.8 kPa |
| N'q | 83.310 |
| dq | 1.4 |
| Irr | 100 |
| θ | 35.0° |
| qp | 11,844 kPa |

Que deriva en: $Q_{pV} := 11,844 \text{ kPa} \cdot A_p = 330.53 \text{ kN}$

A manera de resumen, podemos simplificar los métodos en la siguiente tabla:

| Método de cálculo | Fricción lateral QL [kN] | Aporte de la punta Qp [kN] | Resistencia total última [kN] |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Aoki & Velloso (1975) | 1,665 | 383 | 2,048 |
| Meyerhof (1976) | 413 | 318 | 731 |
| Burland (1973)/ Vesic (1975) | 324 | 330 | 654 |

La variación principal de resultados corresponde a la aportación de la fricción lateral en el método de Aoki y Velloso. Este método, que ha sido derivado de mediciones de campo, muestra la ventaja que se puede obtener al ajustar sus coeficientes mediante los datos de pruebas de campo para cada caso de suelo.

7.2 TABLAS DE CAPACIDAD ESTRUCTURAL

| IR | Designación | | W/H | Peralte | | Alma | | Patin | | Distancia | | | Área | Eje X-X | | | Eje Y-Y | | | Perímetro | Área de Rectángulo | A's Corrosión = 1.5 mm | Capacidad de carga estructural | |
|----|----------------|------------|-----|---------|----------------|----------------|----------------|-------|----|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|-----------------|-----------------|---------|-------|-----------------|-----------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|--|
| | Peralte x Peso | | | d | t _w | b _f | t _f | T | k | k ₁ | I | S | | r | I | S | r | U | LRFD | | | | ASD | |
| | mm x kg/m | in x lb/ft | | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | cm ² | cm ⁴ | cm ³ | cm | cm ⁴ | cm ³ | cm | cm | cm ² | cm ² | ton | ton | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| IR | 152x12.7 | 6x8.5 | W | 148 | 4.3 | 100 | 4.9 | 123 | 13 | 10 | 16.3 | 620 | 84 | 6.2 | 82 | 17 | 2.2 | 67.8 | 148.0 | 5.52 | 17.5 | 11.6 | | |
| IR | 152x13.6 | 6x9 | W | 150 | 4.3 | 100 | 5.5 | 121 | 14 | 10 | 17.3 | 683 | 91 | 6.3 | 91 | 18 | 2.3 | 68.0 | 150.0 | 6.70 | 21.2 | 14.1 | | |
| IR | 152x17.9 | 6x12 | W | 153 | 5.8 | 102 | 7.1 | 121 | 16 | 10 | 22.9 | 920 | 120 | 6.3 | 124 | 25 | 2.3 | 68.8 | 156.1 | 12.09 | 38.2 | 25.4 | | |
| IR | 152x23.9 | 6x16 | W | 160 | 6.6 | 102 | 10.3 | 121 | 19 | 11 | 30.6 | 1336 | 167 | 6.6 | 184 | 36 | 2.5 | 69.4 | 163.2 | 19.58 | 61.9 | 41.2 | | |
| IR | 152x22.4 | 6x15 | H | 152 | 5.8 | 152 | 6.6 | 120 | 16 | 10 | 28.6 | 1211 | 159 | 6.5 | 388 | 51 | 3.7 | 88.7 | 231.0 | 14.70 | 46.5 | 30.9 | | |
| IR | 152x29.7 | 6x20 | H | 157 | 6.6 | 153 | 9.3 | 119 | 19 | 11 | 37.9 | 1723 | 220 | 6.8 | 554 | 72 | 3.8 | 89.4 | 240.2 | 23.99 | 75.9 | 50.5 | | |
| IR | 152x37.3 | 6x25 | H | 162 | 8.1 | 154 | 11.6 | 121 | 21 | 11 | 47.4 | 2223 | 274 | 6.9 | 712 | 92 | 3.9 | 90.1 | 249.5 | 33.20 | 105.0 | 69.9 | | |
| IR | 203x14.9 | 8x10 | W | 200 | 4.3 | 100 | 5.2 | 169 | 16 | 11 | 19.1 | 1282 | 128 | 8.2 | 87 | 17 | 2.1 | 78.1 | 200.0 | 6.77 | 21.4 | 14.3 | | |
| IR | 203x19.4 | 8x13 | W | 203 | 5.8 | 102 | 6.5 | 168 | 17 | 11 | 24.8 | 1648 | 162 | 8.2 | 114 | 22 | 2.1 | 78.9 | 207.1 | 12.33 | 39.0 | 26.0 | | |
| IR | 203x22.4 | 8x15 | W | 206 | 6.2 | 102 | 8 | 168 | 19 | 13 | 28.6 | 1998 | 193 | 8.4 | 142 | 28 | 2.2 | 79.2 | 210.1 | 16.08 | 50.9 | 33.8 | | |
| IR | 203x26.8 | 8x18 | W | 207 | 5.8 | 133 | 8.4 | 169 | 19 | 11 | 33.9 | 2576 | 249 | 8.7 | 332 | 50 | 3.1 | 91.8 | 275.3 | 19.45 | 61.5 | 40.9 | | |
| IR | 203x31.3 | 8x21 | W | 210 | 6.4 | 134 | 10.2 | 169 | 21 | 13 | 39.7 | 3134 | 298 | 8.9 | 407 | 61 | 3.2 | 92.3 | 281.4 | 25.41 | 80.4 | 53.5 | | |
| IR | 203x35.8 | 8x24 | W | 201 | 6.2 | 165 | 10.2 | 157 | 22 | 14 | 45.7 | 3446 | 342 | 8.7 | 762 | 92 | 4.1 | 102.9 | 331.7 | 29.20 | 92.4 | 61.5 | | |
| IR | 203x41.7 | 8x28 | W | 205 | 7.2 | 166 | 11.8 | 157 | 24 | 14 | 53.2 | 4079 | 398 | 8.8 | 903 | 109 | 4.1 | 103.6 | 340.3 | 36.43 | 115.3 | 76.7 | | |
| IR | 203x46.2 | 8x31 | H | 203 | 7.2 | 203 | 11 | 156 | 24 | 14 | 58.9 | 4579 | 451 | 8.8 | 1544 | 152 | 5.1 | 118.2 | 412.1 | 39.73 | 125.7 | 83.6 | | |
| IR | 203x52.1 | 8x35 | H | 206 | 7.9 | 204 | 12.6 | 155 | 25 | 14 | 66.5 | 5286 | 511 | 8.9 | 1773 | 174 | 5.2 | 118.7 | 420.2 | 47.60 | 150.6 | 100.2 | | |
| IR | 203x59.6 | 8x40 | H | 210 | 9.1 | 205 | 14.2 | 156 | 27 | 16 | 75.5 | 6077 | 582 | 9 | 2044 | 200 | 5.2 | 119.3 | 430.5 | 56.51 | 178.8 | 118.9 | | |
| IR | 203x71.5 | 8x48 | H | 216 | 10.2 | 206 | 17.4 | 156 | 30 | 16 | 91 | 7659 | 710 | 9.2 | 2535 | 246 | 5.3 | 120.1 | 445.0 | 71.73 | 226.9 | 151.0 | | |
| IR | 203x86.4 | 8x58 | H | 222 | 13 | 209 | 20.6 | 156 | 33 | 17 | 110.3 | 9490 | 852 | 9.3 | 3126 | 300 | 5.3 | 121.3 | 464.0 | 90.89 | 287.5 | 191.3 | | |
| IR | 203x99.8 | 8x67 | H | 229 | 14.5 | 210 | 23.7 | 156 | 37 | 17 | 127.1 | 11321 | 990 | 9.4 | 3688 | 351 | 5.4 | 122.2 | 480.9 | 106.93 | 338.3 | 225.1 | | |
| IR | 254x17.9 | 10x12 | W | 251 | 4.8 | 101 | 5.3 | 219 | 16 | 11 | 22.8 | 2239 | 179 | 9.9 | 91 | 18 | 2 | 88.6 | 253.5 | 8.89 | 28.1 | 18.7 | | |
| IR | 254x22.4 | 10x15 | W | 254 | 5.8 | 102 | 6.9 | 219 | 17 | 11 | 28.5 | 2686 | 226 | 10 | 120 | 24 | 2.1 | 89.1 | 259.1 | 14.53 | 46.0 | 30.6 | | |
| IR | 254x25.4 | 10x17 | W | 257 | 6.1 | 102 | 8.4 | 219 | 19 | 13 | 32.2 | 3409 | 265 | 10.3 | 148 | 29 | 2.1 | 89.3 | 262.1 | 18.23 | 57.7 | 38.4 | | |
| IR | 254x28.3 | 10x19 | W | 260 | 6.4 | 102 | 10 | 219 | 21 | 13 | 36.3 | 4008 | 308 | 10.5 | 176 | 35 | 2.2 | 89.5 | 265.2 | 22.12 | 70.0 | 46.6 | | |
| IR | 254x32.8 | 10x22 | W | 258 | 6.1 | 146 | 9.1 | 220 | 19 | 13 | 41.9 | 4912 | 380 | 10.8 | 475 | 65 | 3.4 | 107.0 | 376.7 | 24.97 | 79.0 | 52.6 | | |
| IR | 254x38.8 | 10x26 | W | 262 | 6.6 | 147 | 11.2 | 218 | 22 | 13 | 49.1 | 5994 | 457 | 11 | 587 | 80 | 3.5 | 107.6 | 385.1 | 32.35 | 102.3 | 68.1 | | |
| IR | 254x44.7 | 10x30 | W | 266 | 7.6 | 148 | 13 | 218 | 24 | 13 | 57 | 7076 | 531 | 11.1 | 695 | 94 | 3.5 | 108.3 | 393.7 | 40.18 | 127.1 | 84.6 | | |
| IR | 254x49.2 | 10x33 | W | 247 | 7.4 | 202 | 11 | 193 | 27 | 17 | 62.6 | 7076 | 574 | 10.6 | 1523 | 151 | 4.9 | 126.5 | 498.9 | 41.87 | 132.5 | 88.1 | | |
| IR | 254x58.1 | 10x39 | W | 252 | 8 | 203 | 13.5 | 195 | 29 | 17 | 74.2 | 8699 | 690 | 10.8 | 1873 | 185 | 5 | 127.3 | 511.6 | 53.40 | 168.9 | 112.4 | | |
| IR | 254x67 | 10x45 | W | 257 | 8.9 | 202 | 16 | 193 | 32 | 17 | 85.8 | 10323 | 805 | 11 | 2223 | 218 | 5.1 | 127.2 | 519.1 | 65.19 | 206.2 | 137.2 | | |
| IR | 254x73 | 10x49 | H | 253 | 8.6 | 254 | 14.2 | 193 | 30 | 17 | 92.9 | 11321 | 895 | 11 | 3888 | 306 | 6.5 | 147.6 | 642.6 | 68.97 | 218.2 | 145.2 | | |
| IR | 254x80.4 | 10x54 | H | 256 | 9.4 | 255 | 15.6 | 193 | 32 | 17 | 101.9 | 12612 | 983 | 11.1 | 4287 | 338 | 6.5 | 148.2 | 652.8 | 78.08 | 247.0 | 164.3 | | |
| IR | 254x89.4 | 10x60 | H | 260 | 10.7 | 256 | 17.3 | 193 | 33 | 19 | 113.6 | 14193 | 1093 | 11.2 | 4828 | 377 | 6.5 | 148.8 | 665.6 | 89.94 | 284.5 | 189.3 | | |
| IR | 254x101.3 | 10x68 | H | 264 | 11.9 | 257 | 19.6 | 194 | 35 | 19 | 129 | 16400 | 1240 | 11.3 | 5577 | 433 | 6.6 | 149.3 | 678.5 | 104.60 | 330.9 | 220.2 | | |
| IR | 254x114.7 | 10x77 | H | 269 | 13.5 | 259 | 22.1 | 193 | 38 | 21 | 145.8 | 18938 | 1408 | 11.4 | 6410 | 493 | 6.6 | 150.3 | 696.7 | 121.71 | 385.0 | 256.2 | | |
| IR | 254x131 | 10x88 | H | 275 | 15.4 | 261 | 25.1 | 193 | 41 | 21 | 167.1 | 22227 | 1614 | 11.5 | 7451 | 570 | 6.7 | 151.3 | 717.8 | 142.28 | 450.1 | 299.5 | | |
| IR | 254x148.9 | 10x100 | H | 282 | 17.3 | 263 | 28.4 | 193 | 44 | 22 | 189.7 | 25931 | 1835 | 11.7 | 8616 | 655 | 6.7 | 152.5 | 741.7 | 164.71 | 521.1 | 346.7 | | |
| IR | 254x166.8 | 10x112 | H | 289 | 19.2 | 265 | 31.8 | 193 | 48 | 24 | 212.3 | 29802 | 2065 | 11.8 | 9823 | 742 | 6.8 | 153.6 | 765.9 | 187.91 | 594.4 | 395.5 | | |
| IR | 305x20.9 | 12x14 | W | 303 | 5 | 101 | 5.7 | 268 | 17 | 13 | 26.8 | 3688 | 244 | 11.7 | 98 | 20 | 1.9 | 98.9 | 306.0 | 11.18 | 35.4 | 23.5 | | |
| IR | 305x23.9 | 12x16 | W | 305 | 5.6 | 101 | 6.7 | 266 | 19 | 13 | 30.4 | 4287 | 280 | 11.9 | 117 | 23 | 2 | 98.9 | 308.1 | 14.91 | 47.2 | 31.4 | | |
| IR | 305x28.3 | 12x19 | W | 309 | 6 | 102 | 8.9 | 268 | 21 | 13 | 35.9 | 5411 | 349 | 12.2 | 157 | 31 | 2.1 | 99.6 | 315.2 | 20.51 | 64.9 | 43.2 | | |
| IR | 305x32.8 | 12x22 | W | 313 | 6.6 | 102 | 10.8 | 268 | 22 | 13 | 41.8 | 6493 | 416 | 12.5 | 194 | 38 | 2.2 | 99.9 | 319.3 | 26.04 | 82.4 | 54.8 | | |
| IR | 305x38.8 | 12x26 | W | 310 | 5.8 | 165 | 9.7 | 266 | 22 | 13 | 49.4 | 8491 | 547 | 13.1 | 720 | 88 | 3.8 | 124.9 | 511.5 | 29.93 | 94.7 | 63.0 | | |
| IR | 305x44.7 | 12x30 | W | 313 | 6.6 | 166 | 11.2 | 266 | 24 | 13 | 56.7 | 9906 | 633 | 13.2 | 845 | 102 | 3.9 | 125.4 | 519.6 | 37.30 | 118.0 | 78.5 | | |
| IR | 305x52.1 | 12x35 | W | 318 | 7.6 | 167 | 13.2 | 267 | 25 | 14 | 66.5 | 11863 | 747 | 13.3 | 1020 | 122 | 3.9 | 126.2 | 531.1 | 47.01 | 148.7 | 98.9 | | |
| IR | 305x59.6 | 12x40 | W | 303 | 7.5 | 203 | 13.1 | 240 | 32 | 19 | 76.1 | 12903 | 850 | 13 | 1836 | 180 | 4.9 | 137.7 | 615.1 | 52.99 | 167.6 | 111.5 | | |
| IR | 305x67 | 12x45 | W | 306 | 8.5 | 204 | 14.6 | 243 | 32 | 21 | 85.2 | 14568 | 952 | 13.1 | 2081 | 203 | 4.9 | 138.2 | 624.2 | 62.02 | 196.2 | 130.5 | | |
| IR | 305x74.5 | 12x50 | W | 310 | 9.4 | 205 | 16.3 | 240 | 35 | 21 | 94.8 | 16400 | 1060 | 13.2 | 2343 | 228 | 5 | 138.9 | 635.5 | 71.68 | 226.7 | 150.9 | | |
| IR | 305x78.9 | 12x53 | W | 306 | 8.8 | 254 | 14.6 | 243 | 32 | 21 | 100.7 | 17690 | 1157 | 13.3 | 3987 | 315 | 6.3 | 158.1 | 777.2 | 74.46 | 235.5 | 156.7 | | |
| IR | 305x86.4 | 12x58 | W | 310 | 9.1 | 254 | 16.3 | 240 | 35 | 21 | 109.7 | 19771 | 1278 | 13.4 | 4454 | 351 | 6.4 | 158.5 | 787.4 | 83.87 | 265.3 | 176.5 | | |
| IR | 305x96.8 | 12x65 | H | 308 | 9.9 | 305 | 15.4 | 241 | 33 | 21 | 123.2 | 22185 | 1440 | 13.4 | 7242 | 477 | 7.7 | 178.5 | 939.4 | 94.23 | 298.1 | 198.3 | | |
| IR | 305x107.2 | 12x72 | H | 311 | 10.9 | 306 | 17 | 241 | 35 | 22 | 136.1 | 24850 | 1596 | 13.5 | 8116 | 531 | 7.7 | 179.0 | 951.7 | 106.96 | 338.4 | 225.1 | | |
| IR | 305x117.6 | 12x79 | H | 314 | 11.9 | 307 | 18.7 | 241 | 37 | 22 | 149.7 | 27554 | 1753 | 13.6 | 8991 | 587 | 7.7 | 179.5 | 964.0 | 120.34 | 380.7 | 253.3 | | |
| IR | 305x129.5 | 12x87 | H | 318 | 13.1 | 308 | 20.6 | 242 | 38 | 22 | 165.2 | 30801 | 1934 | 13.7 | 10031 | 651 | 7.8 | 180.1 | 979.4 | 135.62 | 429.0 | 285.4 | | |
| IR | 305x142.9 | 12x96 | H | 323 | 14 | 309 | 22.9 | 240 | 41 | 22 | 181.9 | 34672 | 2147 | 13.8 | 11238 | 728 | 7.8 | 180.8 | 998.1 | 152.61 | 482.8 | 321.2 | | |
| IR | 305x157.8 | 12x106 | H | 327 | 15.5 | 310 | 25.1 | 242 | 43 | 24 | 201.3 | 38834 | 2376 | 13.9 | 12529 | 808 | 7.9 | 181.3 | 1013.7 | 170.67 | 539.9 | 359.2 | | |



| IR | Designación | | W/H | Peralte | | Alma | | Patin | | Distancia | | | Área | Eje X-X | | | Eje Y-Y | | | Perímetro | Área de Rectángulo | A's Corrosión = 1.5 mm | Capacidad de carga estructural | |
|----|----------------|------------|-----|---------|----------------|----------------|----------------|-------|----|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|-----------------|-----------------|---------|-------|-----------------|-----------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|-----|
| | Peralte x Peso | | | d | t _w | b _f | t _f | T | k | k ₁ | I | S | | r | I | S | r | U | cm ² | | | | cm ² | ton |
| | mm x kg/m | in x lb/ft | | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | cm ² | cm ⁴ | cm ³ | cm | cm ⁴ | cm ³ | cm | cm | cm ² | cm ² | ton | ton | | |
| IR | 356x32.8 | 14x22 | W | 349 | 5.8 | 127 | 8.5 | 305 | 22 | 14 | 41.9 | 8283 | 475 | 14.1 | 291 | 46 | 2.6 | 117.7 | 443.2 | 23.02 | 72.8 | 48.5 | | |
| IR | 356x38.8 | 14x26 | W | 353 | 6.4 | 128 | 10.7 | 306 | 24 | 14 | 49.6 | 10198 | 578 | 14.4 | 371 | 58 | 2.7 | 118.4 | 451.8 | 30.63 | 96.9 | 64.5 | | |
| IR | 356x44.7 | 14x30 | W | 352 | 6.9 | 171 | 9.8 | 304 | 24 | 16 | 57.1 | 12112 | 688 | 14.6 | 816 | 95 | 3.8 | 135.5 | 601.9 | 35.93 | 113.7 | 75.6 | | |
| IR | 356x50.7 | 14x34 | W | 355 | 7.2 | 171 | 11.6 | 304 | 25 | 16 | 64.5 | 14152 | 796 | 14.8 | 970 | 113 | 3.9 | 135.6 | 607.1 | 42.96 | 135.9 | 90.4 | | |
| IR | 356x56.6 | 14x38 | W | 358 | 7.9 | 172 | 13.1 | 304 | 27 | 16 | 72.3 | 16025 | 895 | 14.9 | 1111 | 129 | 3.9 | 136.2 | 615.8 | 50.54 | 159.9 | 106.4 | | |
| IR | 356x64.1 | 14x43 | W | 347 | 7.8 | 203 | 13.5 | 280 | 33 | 22 | 81.3 | 17815 | 1027 | 14.8 | 1881 | 185 | 4.8 | 146.3 | 704.4 | 57.50 | 181.9 | 121.0 | | |
| IR | 356x71.5 | 14x48 | W | 350 | 8.6 | 204 | 15.1 | 280 | 35 | 22 | 91 | 20187 | 1152 | 14.9 | 2139 | 210 | 4.9 | 146.9 | 714.0 | 66.72 | 211.1 | 140.4 | | |
| IR | 356x78.9 | 14x53 | W | 354 | 9.4 | 205 | 16.8 | 281 | 37 | 24 | 100.7 | 22518 | 1275 | 15 | 2402 | 234 | 4.9 | 147.6 | 725.7 | 76.45 | 241.8 | 160.9 | | |
| IR | 356x90.8 | 14x61 | W | 353 | 9.5 | 254 | 16.4 | 280 | 37 | 24 | 115.5 | 26640 | 1511 | 15.2 | 4454 | 352 | 6.2 | 167.0 | 896.6 | 88.28 | 279.3 | 185.8 | | |
| IR | 356x101.3 | 14x68 | W | 357 | 10.5 | 255 | 18.3 | 280 | 38 | 24 | 129 | 30093 | 1688 | 15.3 | 5036 | 397 | 6.2 | 167.6 | 910.4 | 101.37 | 320.7 | 213.4 | | |
| IR | 356x110.2 | 14x74 | W | 360 | 11.4 | 256 | 19.9 | 281 | 40 | 24 | 140.7 | 33132 | 1835 | 15.3 | 5577 | 436 | 6.3 | 168.1 | 921.6 | 112.66 | 356.4 | 237.1 | | |
| IR | 356x122.1 | 14x82 | W | 363 | 13 | 257 | 21.7 | 281 | 41 | 25 | 155.5 | 36711 | 2016 | 15.4 | 6160 | 480 | 6.3 | 168.5 | 932.9 | 127.26 | 402.6 | 267.8 | | |
| IR | 406x38.8 | 16x26 | W | 399 | 6.4 | 140 | 8.8 | 345 | 27 | 19 | 49.6 | 12529 | 629 | 15.9 | 399 | 57 | 2.8 | 132.8 | 558.6 | 28.96 | 91.6 | 61.0 | | |
| IR | 406x46.2 | 16x31 | W | 403 | 7 | 140 | 11.2 | 346 | 29 | 19 | 58.8 | 15609 | 516 | 16.3 | 516 | 74 | 3 | 133.0 | 564.2 | 37.81 | 119.6 | 79.6 | | |
| IR | 406x53.6 | 16x36 | W | 403 | 7.5 | 177 | 10.9 | 346 | 29 | 19 | 68.4 | 18647 | 926 | 16.5 | 1020 | 115 | 3.9 | 147.7 | 713.3 | 44.78 | 141.7 | 94.3 | | |
| IR | 406x59.6 | 16x40 | W | 407 | 7.8 | 178 | 12.8 | 346 | 30 | 21 | 76.1 | 21561 | 1060 | 16.8 | 1203 | 135 | 4 | 148.5 | 724.5 | 52.75 | 166.9 | 111.0 | | |
| IR | 406x67 | 16x45 | W | 410 | 8.8 | 179 | 14.4 | 346 | 32 | 21 | 85.8 | 24391 | 1191 | 16.9 | 1365 | 153 | 4 | 149.0 | 733.9 | 62.41 | 197.4 | 131.4 | | |
| IR | 406x74.5 | 16x50 | W | 413 | 9.7 | 180 | 16 | 346 | 33 | 21 | 94.8 | 27430 | 1327 | 17 | 1548 | 172 | 4 | 149.5 | 743.4 | 71.75 | 227.0 | 151.0 | | |
| IR | 406x84.9 | 16x57 | W | 417 | 10.9 | 181 | 18.2 | 347 | 35 | 22 | 108.4 | 31550 | 1511 | 17.1 | 1794 | 198 | 4.1 | 150.0 | 754.8 | 84.42 | 267.0 | 177.7 | | |
| IR | 406x100 | 16x67 | W | 415 | 10 | 260 | 16.9 | 348 | 35 | 21 | 127.1 | 39708 | 1917 | 17.7 | 4953 | 380 | 6.2 | 181.6 | 1079.0 | 98.34 | 311.1 | 207.0 | | |
| IR | 406x114 | 16x77 | W | 420 | 11.6 | 261 | 19.3 | 346 | 37 | 22 | 145.8 | 46202 | 2196 | 17.8 | 5744 | 441 | 6.3 | 182.2 | 1096.2 | 117.17 | 370.6 | 246.6 | | |
| IR | 406x132.0 | 16x89 | W | 425 | 13.2 | 263 | 22.2 | 347 | 40 | 22 | 169 | 54110 | 2540 | 17.9 | 6785 | 515 | 6.3 | 183.1 | 1117.8 | 138.97 | 439.6 | 292.5 | | |
| IR | 406x149 | 16x100 | W | 432 | 14.9 | 265 | 25.1 | 336 | 48 | 29 | 190.4 | 62019 | 2868 | 18 | 7742 | 585 | 6.4 | 184.4 | 1144.8 | 161.60 | 511.2 | 340.1 | | |
| IR | 457x52.1 | 18x35 | W | 450 | 7.6 | 152 | 10.8 | 392 | 29 | 19 | 66.5 | 21228 | 944 | 17.9 | 637 | 84 | 3.1 | 147.1 | 684.0 | 43.09 | 136.3 | 90.7 | | |
| IR | 457x59.6 | 18x40 | W | 453 | 8 | 153 | 13.3 | 394 | 30 | 21 | 76.1 | 25473 | 1121 | 18.3 | 795 | 104 | 3.2 | 147.5 | 693.1 | 52.37 | 165.7 | 110.2 | | |
| IR | 457x68.5 | 18x46 | W | 459 | 9.1 | 154 | 15.4 | 395 | 32 | 21 | 87.1 | 29636 | 1291 | 18.4 | 937 | 122 | 3.3 | 148.5 | 706.9 | 63.75 | 201.7 | 134.2 | | |
| IR | 457x74.5 | 18x50 | W | 457 | 9 | 190 | 14.5 | 393 | 32 | 21 | 94.8 | 33298 | 1457 | 18.7 | 1669 | 175 | 4.2 | 162.7 | 868.3 | 68.87 | 217.9 | 145.0 | | |
| IR | 457x81.9 | 18x55 | W | 460 | 9.9 | 191 | 16 | 393 | 33 | 21 | 104.5 | 37045 | 1611 | 18.8 | 1869 | 195 | 4.2 | 163.2 | 878.6 | 78.62 | 248.7 | 165.5 | | |
| IR | 457x89.4 | 18x60 | W | 463 | 10.5 | 192 | 17.7 | 393 | 35 | 21 | 113.6 | 40957 | 1770 | 18.9 | 2085 | 218 | 4.3 | 163.8 | 889.0 | 87.86 | 277.9 | 184.9 | | |
| IR | 457x96.8 | 18x65 | W | 466 | 11.4 | 193 | 19.1 | 393 | 37 | 22 | 123.2 | 44537 | 1917 | 19 | 2281 | 236 | 4.3 | 164.3 | 899.4 | 97.37 | 308.0 | 204.9 | | |
| IR | 457x105.7 | 18x71 | W | 470 | 12.6 | 194 | 20.6 | 393 | 38 | 22 | 134.2 | 48699 | 2081 | 19.1 | 2510 | 259 | 4.3 | 165.0 | 911.8 | 108.68 | 343.8 | 228.8 | | |
| IR | 457x113.2 | 18x76 | W | 463 | 10.8 | 280 | 17.3 | 393 | 35 | 21 | 143.9 | 55359 | 2393 | 19.6 | 6327 | 452 | 6.6 | 199.0 | 1296.4 | 112.87 | 357.1 | 237.6 | | |
| IR | 457x128.1 | 18x86 | W | 467 | 12.2 | 282 | 19.6 | 394 | 37 | 22 | 163.2 | 63683 | 2720 | 19.7 | 7284 | 518 | 6.7 | 199.8 | 1316.9 | 132.26 | 418.4 | 278.4 | | |
| IR | 457x144.4 | 18x97 | W | 472 | 13.6 | 283 | 22.1 | 393 | 40 | 22 | 183.9 | 72840 | 3081 | 19.9 | 8366 | 592 | 6.7 | 200.5 | 1335.8 | 152.62 | 482.8 | 321.2 | | |
| IR | 457x157.8 | 18x106 | W | 476 | 15 | 284 | 23.9 | 393 | 41 | 24 | 200.7 | 79500 | 3343 | 19.9 | 9157 | 646 | 6.8 | 201.0 | 1351.8 | 169.20 | 535.3 | 356.1 | | |
| IR | 457x177.2 | 18x119 | W | 482 | 16.6 | 286 | 26.9 | 393 | 44 | 24 | 226.5 | 91154 | 3785 | 20 | 10531 | 736 | 6.8 | 202.1 | 1378.5 | 193.92 | 613.4 | 408.1 | | |
| IR | 533x65.5 | 21x44 | W | 525 | 8.9 | 165 | 11.4 | 464 | 30 | 22 | 83.9 | 35088 | 1337 | 20.5 | 862 | 104 | 3.2 | 166.9 | 866.3 | 57.02 | 180.4 | 120.0 | | |
| IR | 533x74.5 | 21x50 | W | 529 | 9.7 | 166 | 13.6 | 462 | 33 | 22 | 94.8 | 40957 | 1549 | 20.8 | 1036 | 125 | 3.3 | 167.5 | 878.1 | 68.38 | 216.3 | 143.9 | | |
| IR | 533x84.9 | 21x57 | W | 535 | 10.3 | 166 | 16.5 | 465 | 35 | 22 | 107.7 | 48699 | 1819 | 21.2 | 1274 | 153 | 3.4 | 168.0 | 888.1 | 80.88 | 255.8 | 170.2 | | |
| IR | 533x71.5 | 21x48 | W | 524 | 8.9 | 207 | 11 | 466 | 29 | 21 | 91 | 39917 | 1524 | 20.9 | 1611 | 156 | 4.2 | 183.6 | 1084.7 | 62.44 | 197.5 | 131.4 | | |
| IR | 533x81.9 | 21x55 | W | 529 | 9.6 | 209 | 13.3 | 467 | 31 | 21 | 104.6 | 47451 | 1803 | 21.3 | 2015 | 193 | 4.4 | 184.8 | 1105.6 | 75.79 | 239.8 | 159.5 | | |
| IR | 533x92.3 | 21x62 | W | 533 | 10.2 | 209 | 15.6 | 463 | 35 | 22 | 118.1 | 55359 | 2081 | 21.7 | 2393 | 228 | 4.5 | 185.0 | 1114.0 | 88.26 | 279.2 | 185.8 | | |
| IR | 533x101.3 | 21x68 | W | 537 | 10.9 | 210 | 17.7 | 464 | 37 | 22 | 129 | 61602 | 2294 | 21.8 | 2693 | 257 | 4.6 | 185.7 | 1127.7 | 100.72 | 318.6 | 212.0 | | |
| IR | 533x108.7 | 21x73 | W | 539 | 11.6 | 211 | 18.8 | 463 | 38 | 24 | 138.7 | 66597 | 2474 | 21.9 | 2939 | 279 | 4.6 | 186.1 | 1137.3 | 109.11 | 345.1 | 229.6 | | |
| IR | 533x123.6 | 21x83 | W | 544 | 13.1 | 212 | 21.2 | 465 | 40 | 24 | 156.8 | 76170 | 2802 | 22 | 3388 | 320 | 4.6 | 186.7 | 1153.3 | 127.04 | 401.9 | 267.4 | | |
| IR | 533x138.5 | 21x93 | W | 549 | 14.7 | 214 | 23.6 | 463 | 43 | 25 | 176.1 | 86160 | 3146 | 22.1 | 3867 | 362 | 4.7 | 187.7 | 1174.9 | 145.99 | 461.8 | 307.3 | | |
| IR | 610x81.9 | 24x55 | W | 599 | 10 | 178 | 12.8 | 532 | 33 | 24 | 104.5 | 56191 | 1868 | 23.1 | 1211 | 136 | 3.4 | 186.4 | 1066.2 | 74.65 | 236.1 | 157.1 | | |
| IR | 610x92.3 | 24x62 | W | 603 | 10.9 | 179 | 15 | 533 | 35 | 27 | 117.4 | 64516 | 2147 | 23.4 | 1436 | 161 | 3.5 | 187.0 | 1079.4 | 87.74 | 277.6 | 184.7 | | |
| IR | 610x101.3 | 24x68 | W | 603 | 10.5 | 228 | 14.9 | 533 | 35 | 24 | 129.7 | 76170 | 2524 | 24.3 | 2930 | 257 | 4.7 | 206.7 | 1374.8 | 96.77 | 306.1 | 203.7 | | |
| IR | 610x113.2 | 24x76 | W | 608 | 11.2 | 228 | 17.3 | 535 | 37 | 24 | 144.5 | 87408 | 2824 | 24.6 | 3434 | 302 | 4.9 | 207.1 | 1386.2 | 111.61 | 353.1 | 234.9 | | |
| IR | 610x125.1 | 24x84 | W | 612 | 11.9 | 229 | 19.6 | 533 | 40 | 24 | 159.4 | 98647 | 3212 | 24.9 | 3929 | 342 | 5 | 207.7 | 1401.5 | 126.28 | 399.5 | 265.8 | | |
| IR | 610x140.0 | 24x94 | W | 617 | 13.1 | 230 | 22.2 | 535 | 41 | 25 | 178.7 | 112382 | 3638 | 25.1 | 4537 | 393 | 5 | 208.3 | 1419.1 | 145.30 | 459.7 | 305.8 | | |
| IR | 610x153.4 | 24x103 | W | 623 | 14 | 229 | 24.9 | 533 | 45 | 25 | 196 | 125000 | 4010 | 25.3 | 5000 | 437 | 5.1 | 208.4 | 1426.7 | 162.37 | 513.6 | 341.7 | | |

Para fines de revisión geotécnica en el cálculo de capacidad por punta, deberá de revisarse el área del rectángulo. El área del perfil (A's) para cálculo de capacidad estructural, se determinó usando un espesor de sacrificio de 1.5 mm de acuerdo al Eurocódigo.

TABLAS DE PESO Y MEDIDAS

LONGITUD

| | | | |
|------------------|---|-------|-----------|
| 1,000 milímetros | = | 1 | metro |
| 100 centímetros | = | 1 | metro |
| 1,000 metros | = | 1 | kilómetro |
| 1 kilómetro | = | 1,000 | metros |
| 1 hectómetro | = | 100 | metros |
| 1 decámetro | = | 10 | metros |
| 1 decímetro | = | 0.1 | metro |
| 1 centímetro | = | 0.01 | metro |
| 1 milímetro | = | 0.001 | metro |

PESO

| | | | |
|------------------|---|-----------|------------|
| 1,000 gramos | = | 1 | kilogramo |
| 1,000 kilogramos | = | 1 | tonelada |
| 1 kilogramo | = | 1000 | gramos |
| 1 hectógramo | = | 100 | gramos |
| 1 decagramo | = | 10 | gramos |
| 1 decigramo | = | 0.1 | gramo |
| 1 centigramo | = | 0.01 | gramo |
| 1 miligramo | = | 0.001 | gramo |
| 1 oz (onza) | = | 28.3495 | gramos |
| 1 lb (libra) | = | 453.592 | gramos |
| 1 ton (tonelada) | = | 1,000 | kilogramos |
| 1 Short ton | = | 907.18474 | kilogramos |

LONGITUD

| | | | | |
|------------------|---|--------|-------------|----|
| 1 inch (pulgada) | = | 2.54 | centímetros | cm |
| 1 inch (pulgada) | = | 25.4 | milímetros | mm |
| 1 ft (pie) | = | 30.48 | centímetros | cm |
| 1 ft (pie) | = | 0.3048 | metro | m |
| 1 yd (yarda) | = | 0.9144 | metro | m |
| 1 yd (yarda) | = | 91.44 | centímetros | cm |
| 1 ml (milla) | = | 1.6093 | kilómetros | km |

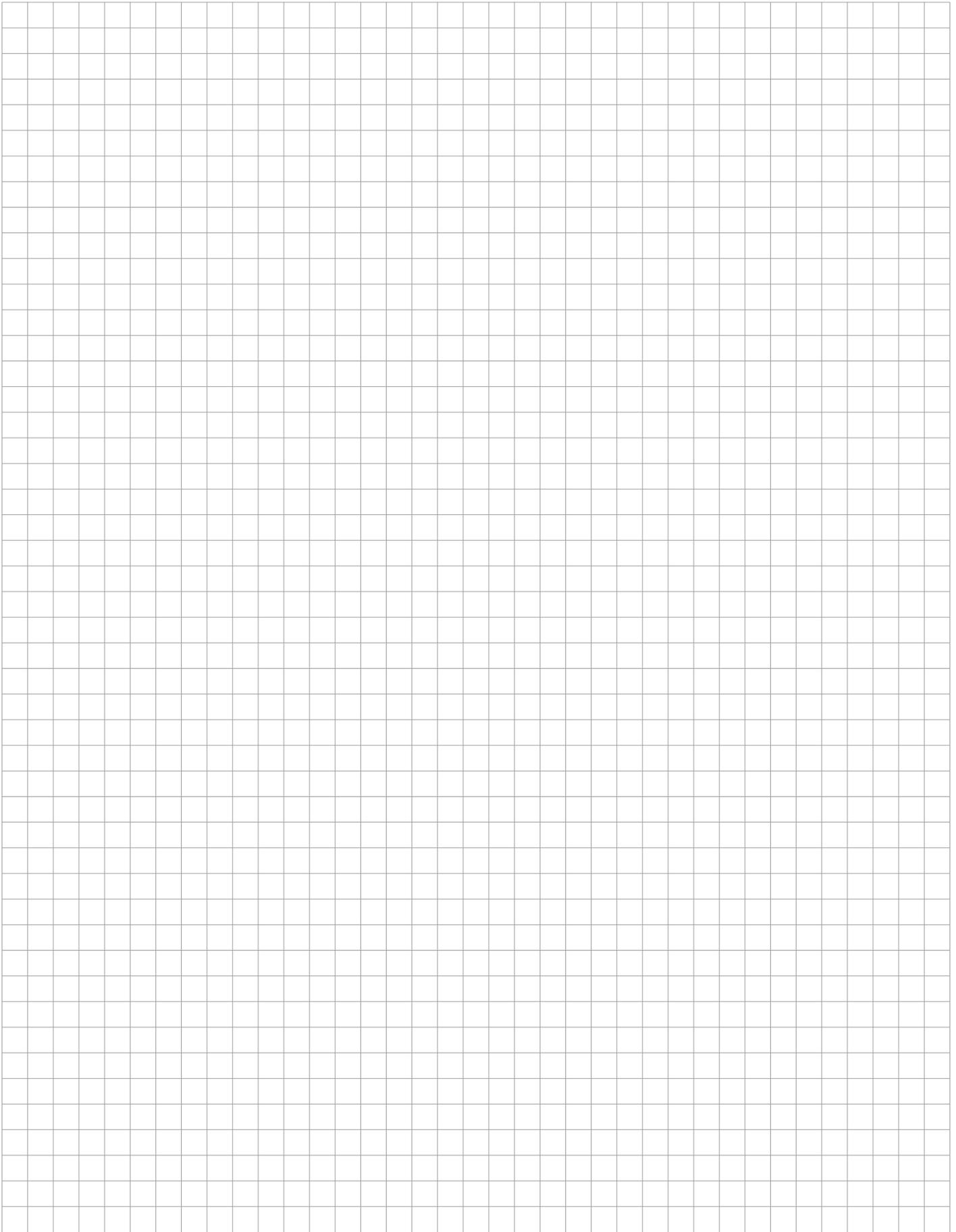
ÁREA

| | | | |
|--------------------------------------|---|----------|---|
| 1 in ² (pulgada cuadrada) | = | 6.4516 | cm ² (centímetros cuadrados) |
| 1 ft ² (pie cuadrado) | = | 144 | in ² (pulgadas cuadradas) |
| 1 ft ² (pie cuadrado) | = | 0.09290 | m ² (metro cuadrado) |
| 1 yd ² (yarda cuadrada) | = | 0.8361 | m ² (metro cuadrado) |
| 1 ml ² (milla cuadrada) | = | 2.59 | km ² (kilómetros cuadrados) |
| 1 acre (acre) | = | 4,046.85 | m ² (metros cuadrados) |
| 1 acre (acre) | = | 0.404685 | hectáreas |

VOLUMEN

| | | | |
|----------------------------------|---|-----------|---------------------|
| 1,000 mililitros | = | 1 | litro |
| 250 mililitros | = | 1 | taza métrica |
| 1 tsp (cucharadita) | = | 5 | mililitros |
| 1 tbs (cucharada) | = | 14.7867 | mililitros |
| 1 fl oz (onza líquida) | = | 29.5735 | mililitros |
| 1 c (cup o taza) | = | 236.58 | mililitros |
| 1 pt (pint o pinta) | = | 473.1764 | mililitros |
| 1 qt (quart o cuarto) | = | 946.35 | mililitros |
| 1 gal (gallon o galón) | = | 3.7852 | litros |
| 1 ft ³ (pie cúbico) | = | 28.3168 | litros |
| 1 ft ³ (pie cúbico) | = | 0.0283168 | metros ³ |
| 1 yd ³ (yarda cúbica) | = | 0.7645 | metros ³ |
| 1 yd ³ (yarda cúbica) | = | 27 | pies ³ |
| 1 yd ³ (yarda cúbica) | = | 764.5536 | litros |







OFICINAS COMERCIALES

01 (55) 5262 7300

CDMX

01 (55) 5089 8930

GUADALAJARA

01 (33) 3827 2740

IRAPUATO

01 (46) 2627 0604

MONTERREY

01 (81) 8748 7600



Hazlo en grande, piensa en acero.