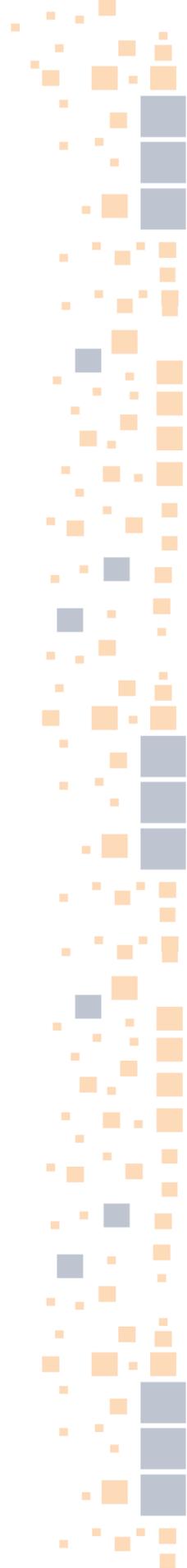




HELICAL[®]
PILOTES HELICOIDALES



GUÍA DE DISEÑO DE CIMIENTOS CON PILOTES HELICOIDALES

Comité de Pilotes y Anclajes Helicoidales
Instituto de Cimientos Profundos (DFI)
Primera Edición, Primera Impresión, 2019



www.anclajeshelicoidales.com



PREFACIO Y AGRADECIMIENTOS

Este documento fue preparado por el Comité de Pilotes y Anclajes Helicoidales del Instituto de Cimientos Profundos (DFI). Si usted ha recibido este documento por un medio distinto a la compra directa a través del DFI, por favor contáctelos al (973) 423-4030 para adquirirlo oficialmente y apoyar el desarrollo futuro de tecnologías de cimentación del instituto. Es una violación a los derechos de autor distribuir este documento sin autorización.

El Comité preparó este documento como referencia para ingenieros, contratistas, autoridades de obra y otros profesionales del sector de la construcción involucrados en el diseño y evaluación de proyectos que emplean pilotes helicoidales y anclajes helicoidales. El objetivo del comité fue generar una guía breve y fácil de seguir para el diseño preliminar y selección de estos sistemas. Se citan otras fuentes, programas de cálculo y referencias para estudios más detallados.

Este documento está destinado a ser utilizado por ingenieros y diseñadores con conocimientos adecuados de mecánica de suelos y métodos de diseño de cimentaciones.

La guía está organizada de la siguiente manera:

Sección 1: Evolución de la tecnología de pilotes helicoidales, aplicaciones, ventajas y limitaciones, códigos vigentes y metodologías de diseño.

Sección 2: Esquema de los elementos del pilote y glosario de términos.

Sección 3: Componentes de pilotes helicoidales y métodos de instalación.

Sección 4: Flujo general de diseño, viabilidad de construcción, selección de pilotes y condiciones de carga.

Sección 5: Procesos de diseño geotécnico, incluyendo capacidad axial y lateral, desplazamientos, comportamiento sísmico y factores que afectan la capacidad.

Sección 6: Procesos de diseño estructural, incluyendo diseño del eje, hélice, acoplamientos, cabezal del pilote, pandeo y deformación elástica.

Sección 7: Protección contra corrosión.

Sección 8: Procedimientos y estándares para pruebas de carga.

Sección 9: Control de calidad en investigación del sitio y actividades de construcción.

Sección 10: Referencias.

Agradecimientos

Gary L. Seider, P.E., Chair, DFI Helical Piles and Tiebacks Committee Wayne Thompson, P.E., Design Guide Sub-Committee Chair, Editor Karen Dawson, P.E., Design Guide, Contributor, Editor





2019 Deep Foundations Institute Helical Piles and Tiebacks Committee

Chair:

Gary L. Seider, P.E.

Hubbell Power Systems, Inc. | Chance®

Immediate Past Chair:

Howard A. Perko, Ph.D., P.E.

Magnum Piering, Inc.

Trustee Liaison:

Howard A. Perko, Ph.D., P.E.

Magnum Piering, Inc.

Current Members:

Yasser Abdelghany, P.Eng., Ph.D.
Dilimi

Ministry of Transportation & Infrastructure Salah Al
Road & Transport Authority

Michael Barr

United Rentals

Bill Bonekemper

Helical PILE World, LLC

David A. Bruce

Hubbell Power Systems, Inc. | Chance®

Mark Bryant, EIT

Maclean Power Systems Civil Products Group

Amy Cerato, Ph.D., P.E.

University of Oklahoma

Samuel P. Clemence, P.E.

Syracuse University

Matthew Conte, CPC

Conte Company

Frank D'Angelo
Davidow, P.E., S.E., P.Eng.

Danbro Distributors Steve
Quanta Subsurface

James Davis, Jr., P.E.

GZA Geoenvironmental, Inc.

Karen Dawson, P.E.

Jacobs

Don Deardorff, P.E.

Supportworks Inc.

Jeffrey T. Donville, P.E.

Beaty Construction, Inc.

Bernard Dwyer, Jr.

Magnum Piering, Inc.

Raja El-Awar, P.E., MSCE
PhD., P.Eng.

FES Group, LLC Mohamed Elkasabgy,
Amec Foster Wheeler E&I Nick Farkas
Grip-tite Mfg. Co. LLC

Jared Fischer, P.E.

Waypoint Engineering

David Frink

Ideal Foundation Systems

Steve Gencorelli, P.E.

Danbro Distributors

Justin Harakal

Tek Piles LLC

Matt Houliston

Magnum Piering, Inc.

Mike Jennings

Maclean Power Systems Civil Products Group

Kevin Kaufman

Piertech Systems





HELICAL[®]
PILOTES HELICOIDALES

Greg Keefer
Timothy Kemp
Daniel Kennedy, P.E.
Dimitrios Konstantakos, P.E.
Jeff Kortan, P.E.
Mary Ellen Bruce Large, P.E., D.GE
Mathews, P.E.
Michael Melworm
Mothersille, Ph.D., FICE
P.E.
John S. Pack, P.E.
Michael Perlow, Jr., P.E.
Mozhdeh (Mozi) Rajaei
Alex Raposo
Sam Rosenberk, Ph.D, P.E.
Nick Salisbury
Moncef S. Souissi
Mike Stefko
Jeff Sullivan
Wayne Thompson, P.E.
Dave Thrasher
Brandon Walter
Aaron Wheeler
Darin Willis, P.E.
Stephen Willis

Helical Technology
Hubbell Power Systems, Inc. | Chance®
Steele Engineering
Deep Excavation LLC
Supportworks Inc.
Deep Foundations Institute Nathan
Intech Anchoring Systems
Premium Technical Services Devon
Single Bore Multiple Anchor Ltd. Kyle Olson,
Foundation Supportworks Inc.
Heli-pile®
Engineering Knowledge Management LLC
Helical Anchors Inc.
Earth Anchoring Suppliers, LLC
Ram Jack Systems Distribution, LLC
Crux Subsurface, Inc.
CTL | Thompson, Inc.
JINDAL Tubular USA
Torcsill Foundations, LLC
CTL | Thompson, Inc.
Foundation Supportworks Inc.
Earth Contact Products
Torcsill Foundations, LLC
Ram Jack Systems Distribution, LLC
Torcsill Foundations, LLC

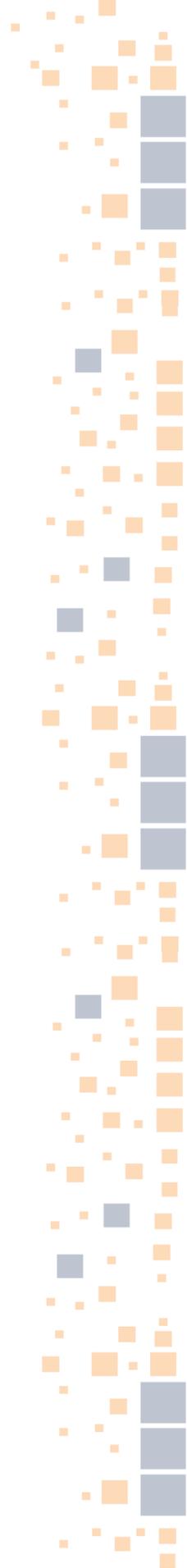




TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 ANTECEDENTES E HISTORIA BREVE DE LAS CIMENTACIONES HELICOIDALES	8
1.2 APLICACIONES DE LAS CIMENTACIONES HELICOIDALES	9
1.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS SOLUCIONES DE CIMENTACIÓN HELICOIDAL	10
1.4 CÓDIGOS VIGENTES	11
1.4.1 Código Internacional de Construcción (IBC).....	11
1.4.2 Criterios de Aceptación para Sistemas y Dispositivos de Pilotes Helicoidales de Pequeño Diámetro (AC358).....	11
1.5 METODOLOGÍAS DE DISEÑO	12
2. DESCRIPCIÓN Y DEFINICIONES	12
3. MATERIALES E INSTALACIÓN DE PILOTES HELICOIDALES	15
3.1 COMPONENTES DEL PILOTE HELICOIDAL	15
3.1.1 Placas de Apoyo Helicoidales o Hélices (múltiples).....	15
3.1.2 Ejes (Shafts).....	16
3.1.3 Acoplamientos (Couplers).....	17
3.1.4 Protección contra Corrosión.....	18
3.1.5 Grout.....	18
3.1.6 Terminación Estructural.....	19
3.2 INSTALACIÓN	20
3.2.1 Equipos de Perforación / Motores de Torque.....	20
3.2.2 Técnicas de Instalación.....	21
3.2.3 Medición del Torque de Instalación.....	22
3.2.4 Colocación de Grout (Pilotes Inyectados).....	22
4. PROCESO DE DISEÑO	23
4.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO	24
4.1.1 Cargas Estructurales y Tolerancias.....	24
4.1.2 Caracterización del Sitio y Propiedades del Suelo.....	25
4.1.3 Viabilidad de Construcción.....	25
4.1.4 Selección del Eje y de las Hélices.....	25
4.2 CARGAS Y DEFORMACIONES	26
4.2.1 Cargas de Diseño ASD y LRFD.....	26
4.2.2 Impacto de las Pruebas de Carga en los Factores de Resistencia (LRFD).....	26
4.2.3 Separación entre Pilotes y Distribución de Cargas.....	30
4.2.4 Deformación Admisible Bajo Carga de Servicio.....	30



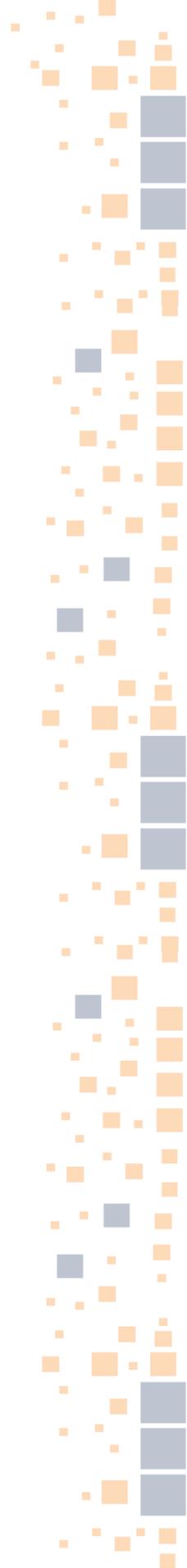


5. DISEÑO GEOTÉCNICO	30
5.1 CAPACIDAD AXIAL	30
5.1.1 Capacidad Teórica de la Placa Helicoidal	31
5.1.2 Fricción del Eje	33
5.1.3 Modelo de Corte Cilíndrico	36
5.1.4 Separación de las Placas Helicoidales	37
5.1.5 Correlaciones de Torque	37
5.2 DESPLAZAMIENTO VERTICAL	41
5.2.1 Deformación Elástica	41
5.2.2 Desplazamiento de pilotes para Movilizar Resistencia del Suelo	41
5.2.3 Desplazamiento del Plano Neutro	43
5.2.4 Creep	43
5.2.5 Asentamiento de Grupos de Pilotes	44
5.2.6 Deformaciones Medidas Durante Pruebas de Carga Estática	44
5.3 Análisis Lateral	46
5.3.1 Comportamiento y Limitaciones de los Pilotes Helicoidales Bajo Cargas Laterales	46
5.3.2 Análisis Individual del Pilote	47
5.3.3 Métodos Analíticos	48
5.4 Comportamiento Sísmico	49
5.5 Factores que Afectan la Capacidad	50
5.5.1 Resistencia por Punta en Estratos Estratificados	50
5.5.2 Efectos de Grupo	52
5.5.3 Condiciones de Hinchamiento (Heaving Conditions)	55
5.5.4 Carga de Arrastre (Fricción Negativa)	56
6. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PILOTE (CAPACIDAD MECÁNICA)	57
6.1 Diseño del Fuste	57
6.1.1 Análisis Axial	58
6.1.2 Análisis de Pandeo	58
6.1.3 Análisis Lateral	63
6.1.4 Análisis de Torsión	63
6.1.5 Deformación Elástica	64
6.2 Diseño de la Placa Helicoidal	64
6.2.1 Conexión al Fuste	64
6.2.2 Resistencia de la Hélice	65
6.3 Acoplamiento (Empalme)	65





6.4 Cabezal del Pilote (Pile Cap)	65
7. PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN	66
8. ENSAYOS DE CARGA	70
8.1 Ensayos de Carga en Fase de Diseño	71
8.2 Ensayos de Producción	72
9. CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD	73
9.1 Personal del Proyecto	73
9.1.1 Calificaciones del Contratista Instalador	73
9.1.2 Calificaciones del Inspector	74
9.1.3 Inspecciones Especiales según el IBC	74
9.2 Entregables	74
9.3 Control de Calidad	74
9.3.1 Calidad de la Exploración del Subsuelo	74
9.3.2 Control de Calidad de la Construcción	74





1. INTRODUCCIÓN

El Comité de Pilotes y Anclajes Helicoidales del Instituto de Cimientos Profundos (DFI) preparó este documento como una referencia para ingenieros, contratistas, inspectores de obra y otros profesionales del sector de la construcción involucrados en el diseño y evaluación de proyectos que empleen cimentaciones con pilotes helicoidales. El procedimiento de diseño está enfocado en proporcionar un diseño preliminar de pilotes helicoidales. Se citan otras fuentes, programas computacionales y referencias para realizar cálculos más detallados. Este documento está destinado a ser utilizado por ingenieros y diseñadores con el conocimiento adecuado en mecánica de suelos teórica y métodos de diseño de cimentaciones.

Las secciones están organizadas de la siguiente forma:

Sección 1: Describe la evolución de la tecnología de pilotes helicoidales, aplicaciones, ventajas y limitaciones, códigos vigentes y metodologías de diseño.

Sección 2: Incluye un esquema de los elementos del pilote y un glosario de términos.

Sección 3: Describe los componentes del pilote helicoidal y los métodos de instalación.

Sección 4: Presenta el flujo general de diseño, consideraciones de construcción y viabilidad del sitio, selección del pilote y condiciones de carga.

Sección 5: Resume los procesos de diseño geotécnico, incluyendo capacidad axial y lateral, desplazamiento, comportamiento sísmico y otros factores que afectan la capacidad.

Sección 6: Detalla los procesos de diseño estructural, incluyendo eje, hélice, acoplamientos y diseño del cabezal del pilote, pandeo y deformación elástica.

Sección 7: Discute la protección contra la corrosión.

Sección 8: Presenta los estándares y procedimientos para pruebas de carga.

Sección 9: Revisa el control de calidad en la investigación del sitio y las actividades de construcción.

Sección 10: Lista de referencias.

1.1 ANTECEDENTES E HISTORIA BREVE DE LAS CIMENTACIONES HELICOIDALES

Los pilotes helicoidales datan de principios del siglo XIX. En ese entonces, eran conocidos como "pilotes de tornillo" y fueron utilizados para soportar el Faro de Maplin Sands, construido en el río Támesis en Inglaterra alrededor de 1838 (ver Figura 1). El diseñador e inventor de los pilotes de tornillo fue Alexander Mitchell, quien más adelante participó también en el diseño de un faro similar en la Bahía de Chesapeake, en Maryland (EE.UU.).

El uso de los pilotes de tornillo se extendió durante todo el siglo XIX, alrededor del mundo, en aplicaciones como puentes, edificios y otros faros. A principios del siglo XX, se desarrollaron avances en las técnicas de instalación y pruebas. Las características de ingeniería de los pilotes helicoidales fueron estudiadas más a fondo durante las décadas de 1940 y 1950, y el interés académico e industrial se mantuvo estable en las siguientes décadas.

En la década de 1980, se dio un resurgimiento de esta tecnología, especialmente con pilotes de menor diámetro, acompañado de avances en investigación y desarrollo. Las tendencias actuales de la





industria han llevado al desarrollo de pilotes helicoidales de gran tamaño y alta capacidad, superando cargas de varios cientos de *kips* (1 kip = 1,000 libras).

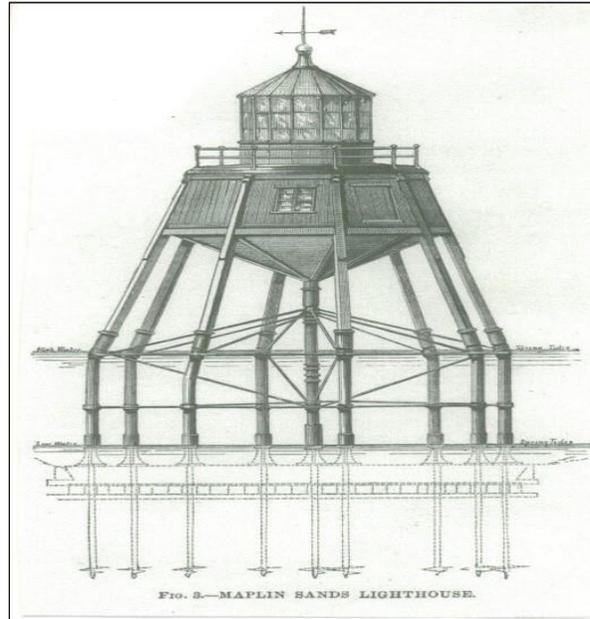


FIGURA 1 FARO DE MAPLIN SANDS (ALREDEDOR DE 1838) (MITCHELL, 1848).

1.2 APLICACIONES DE LAS CIMENTACIONES HELICOIDALES

Las cimentaciones con pilotes helicoidales y anclajes se utilizan comúnmente en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo:

- Estructuras residenciales
- Construcción comercial ligera y pesada
- Estructuras industriales
- Cimentaciones para maquinaria y equipo
- Torres de telecomunicaciones y de transmisión
- Anclajes de sujeción contra viento, flotación o fuerzas sísmicas
- Prácticamente cualquier aplicación en sitios de acceso limitado o remoto
- Recalce de cimentaciones para detener asentamientos y aumentar la capacidad estructural
- Anclajes para estabilidad de taludes

Cada proyecto tiene factores únicos que determinan cuál es el sistema de cimentación más adecuado. Los pilotes/anclajes helicoidales ofrecen soluciones prácticas en las siguientes condiciones:

- Proyectos que requieren cimentaciones profundas debido a suelos superficiales débiles: Los pilotes helicoidales transfieren las cargas a estratos resistentes y competentes.
- Condiciones superficiales pobres o inundadas: Cuando las condiciones superficiales —como suelos blandos o zonas húmedas— hacen que las zapatas tradicionales sean poco prácticas y dificultan la movilización de maquinaria, los pilotes helicoidales pueden considerarse como alternativa. Los pilotes de pequeño diámetro pueden instalarse con mini-excavadoras, retroexcavadoras con ruedas o maquinaria compacta con orugas.



- **Accesos limitados:** En áreas confinadas con poco espacio en altura o acceso lateral restringido, los pilotes helicoidales pueden instalarse con equipo compacto. Esto resulta especialmente útil en trabajos de rehabilitación. La instalación con equipo más liviano también reduce los costos de movilización.
- **Suelos expansivos:** En zonas con suelos expansivos, los pilotes helicoidales pueden ahorrar tiempo y dinero comparados con las opciones de sobreexcavación y relleno. Debido a su pequeño diámetro, los pilotes helicoidales son menos afectados por las fuerzas de expansión del suelo. La fuerza de hinchamiento sobre el eje del pilote es proporcional al área de contacto entre el suelo y el eje, así como al valor de adherencia. Como los pilotes helicoidales tienen ejes más delgados que los pilotes hincados o pilotes excavados, las fuerzas de levantamiento son menores. Las hélices no deben colocarse dentro del estrato de suelo expansivo.
- **Clima adverso:** Los pilotes helicoidales pueden instalarse en la mayoría de las condiciones climáticas, incluso en temperaturas bajo cero o lluvia.
- **Sin excavación de material:** Los pilotes helicoidales desplazan el suelo durante su instalación, lo cual elimina la necesidad de retirar material del sitio. Esto es ventajoso en sitios con suelos contaminados o donde la remoción de material es costosa o está prohibida.
- **Estructuras temporales:** Los pilotes helicoidales pueden retirarse fácilmente invirtiendo el proceso de instalación. Esto facilita la remoción de cimentaciones temporales y permite reutilizar los elementos helicoidales.

1.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS SOLUCIONES DE CIMIENTACIÓN HELICOIDAL

Ventajas de las cimentaciones helicoidales:

- El equipo de instalación puede operar generalmente sobre superficies blandas o irregulares.
- Instalación rápida.
- Carga inmediata: no requiere tiempo de curado para grout o concreto.
- Equipo de instalación de tamaño reducido.
- Sistema pre-fabricado.
- Fácil de modificar en campo.
- El torque de instalación proporciona retroalimentación indirecta sobre la estratigrafía del suelo y puede correlacionarse con la capacidad geotécnica.
- No genera vibraciones y produce poco ruido.
- No se genera material de desecho (spoils).
- Relación resistencia a la tensión / fricción lateral relativamente alta (útil en aplicaciones con riesgo de levantamiento por heladas o suelos expansivos).

Las cimentaciones helicoidales pueden utilizarse en una gran variedad de tipos y condiciones de suelo, y son comúnmente empleadas en sitios con materiales de relleno. Generalmente no se recomienda su uso en terrenos con cantidades significativas de piedras grandes o bloques, ni en rellenos con obstrucciones como escombros. Sin embargo, algunos instaladores han utilizado preperforación con herramientas neumáticas para atravesar estos obstáculos.

En suelos arcillosos muy blandos o suelos potencialmente licuables, se necesitan pilotes helicoidales con ejes de mayor diámetro, inyecciones de grout u otras medidas especiales.

Advertencias y limitaciones:

- Posible rechazo en suelos densos, con piedras grandes, bloques o escombros.





- El pandeo del eje puede limitar la capacidad en suelos muy blandos.
- Menor capacidad lateral en algunos casos debido al pequeño tamaño del eje.
- La relación entre torque de instalación y capacidad debe estar respaldada por cálculos teóricos, juicio de ingeniería y, cuando sea aplicable, pruebas de carga.

1.4 CÓDIGOS VIGENTES

1.4.1 CÓDIGO INTERNACIONAL DE CONSTRUCCIÓN (IBC)

La edición 2009 del Código Internacional de Construcción (IBC), emitido por el *International Code Council (ICC)*, fue el primer código a nivel nacional en hacer referencia específica a los pilotes helicoidales.

En el Capítulo 18 – Suelos y Cimentaciones, se establece:

“Los pilotes helicoidales deben ser diseñados y fabricados conforme a prácticas de ingeniería aceptadas, para resistir todas las tensiones inducidas por la instalación en el suelo y por las cargas de servicio.”

El IBC también establece métodos para determinar cargas admisibles tanto axiales como laterales. Estos métodos se analizan en la Sección 5 de esta guía.

1.4.2 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA SISTEMAS Y DISPOSITIVOS DE PILOTES HELICOIDALES DE PEQUEÑO DIÁMETRO (AC358)

Para validar las capacidades publicadas por los fabricantes de pilotes helicoidales, el Criterio de Aceptación AC358 del ICC describe protocolos de prueba que cuantifican el comportamiento de los elementos helicoidales.

Inicialmente fue escrito para pilotes de pequeño diámetro (3.5 pulgadas o menos), pero en 2016 se actualizó para incluir ejes redondos de hasta 4.5 pulgadas de diámetro y algunos ejes cuadrados huecos más pequeños. Hoy en día, numerosos fabricantes pre-certifican sus productos conforme al AC358.

El Capítulo 18 del IBC y otras secciones del código contienen requisitos para instalación, inspección y pruebas de carga.

Este documento fue redactado por miembros de la comunidad de pilotes helicoidales en América del Norte, interesados en establecer estándares y requisitos mínimos para los fabricantes de pilotes helicoidales de pequeño diámetro.

El proceso de aprobación del ICC-ES incluye:

Revisión de pruebas de campo y laboratorio por un laboratorio independiente.

Entrega de cálculos estructurales.

Documentación del sistema de gestión de calidad.

Otra información proporcionada por el fabricante.

El ICC-ES emite un informe a los fabricantes que cumplen los requisitos del AC358, confirmando que la relación entre la resistencia estructural y el torque de instalación ha sido evaluada y validada por agencias independientes.





Actualmente, el AC308 se aplica a pilotes helicoidales para soporte estructural en zonas sísmicas categorías A, B o C. No obstante, se han realizado investigaciones en entornos sísmicamente más activos.

Estudios realizados en estructuras apoyadas sobre pilotes helicoidales durante los terremotos de Christchurch (Nueva Zelanda, 2011) sugieren que estos sistemas funcionan bien en zonas sísmicas, y se están llevando a cabo investigaciones adicionales. En 2016, investigadores de la Universidad de Oklahoma realizaron pruebas a escala real en una mesa vibradora en la Universidad de California en San Diego. Los resultados iniciales se presentan en el Capítulo 5 de esta guía.

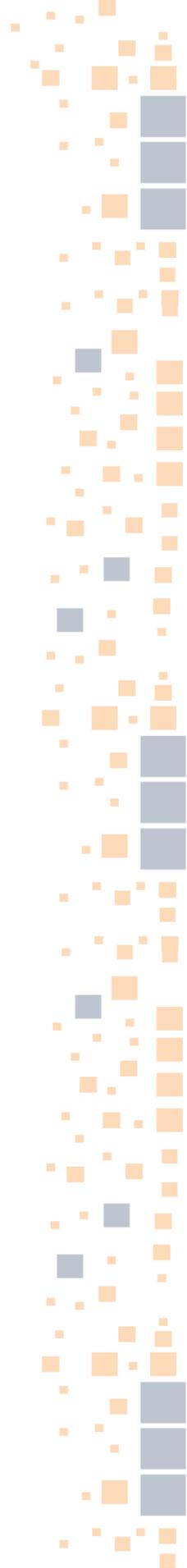
1.5 METODOLOGÍAS DE DISEÑO

Dado que el IBC actualmente presenta métodos de diseño por esfuerzos admisibles (ASD) para determinar capacidades geotécnicas, esta guía también emplea dichos métodos. Algunas secciones incluyen referencias al diseño por factores de carga y resistencia (LRFD), pero la mayoría de la terminología se refiere a cargas admisibles o capacidad admisible.

2. DESCRIPCIÓN Y DEFINICIONES

La siguiente ilustración (Figura 2) muestra un esquema típico de un pilote helicoidal, señalando sus componentes. A continuación, se definen varios términos comúnmente utilizados en el diseño y construcción de estos sistemas.

Los pilotes helicoidales se instalan atornillando el conjunto en el suelo mediante rotación, mientras se aplica una fuerza de compresión axial (llamada “crowd”). Una vez instalados, los pilotes helicoidales resisten cargas aplicadas a través del apoyo de las placas helicoidales y la fricción del eje (si aplica), ya sea en suelo o en roca altamente meteorizada. La combinación de la rotación y la presión axial proporcionada por la máquina permite que el pilote penetre el terreno, avanzando un paso de hélice por cada vuelta completa.



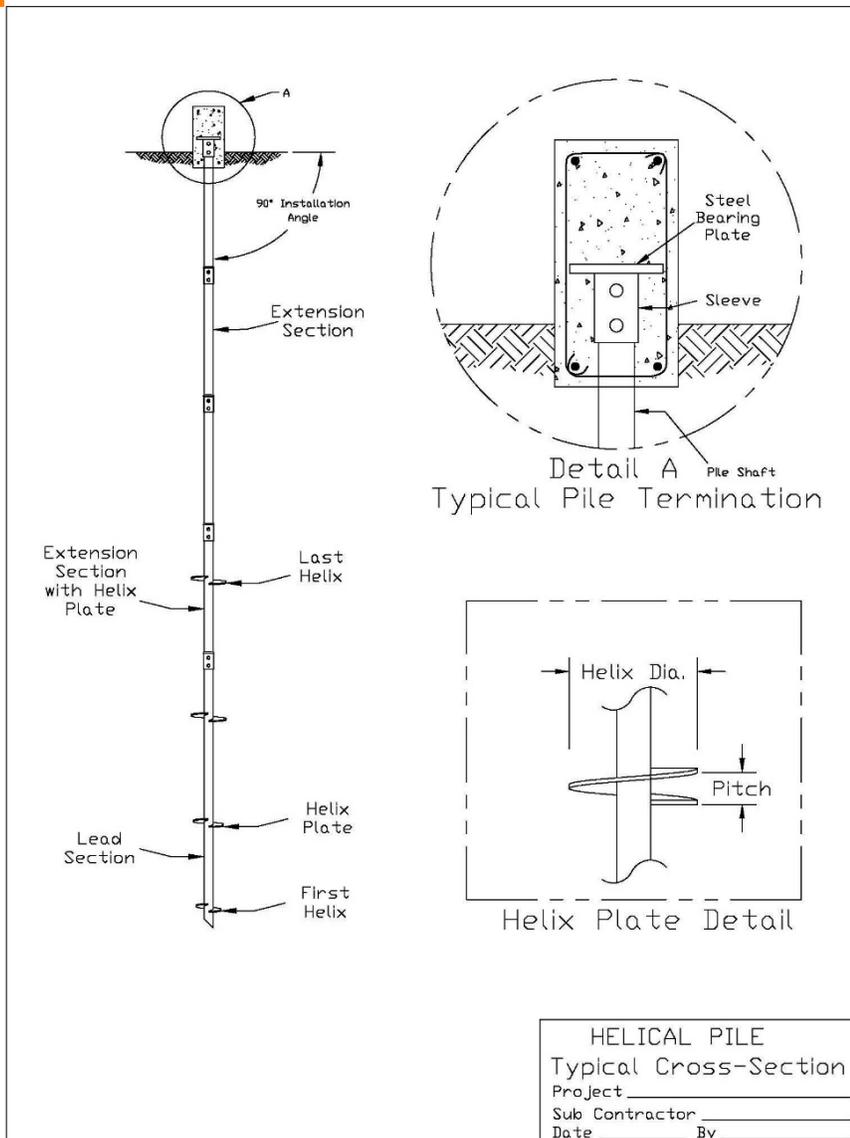


FIGURA 2. SECCIÓN TRANSVERSAL TÍPICA DE UN PILOTE HELICOIDAL CON COMPONENTES Y TERMINOLOGÍA

FIGURA 2

COMÚN.

TÉRMINOS CLAVE

- Estrato de Apoyo (Bearing Stratum): Capa de suelo o roca meteorizada que proporciona la resistencia a compresión o tensión del pilote instalado.
- Crowd: Fuerza o presión axial de compresión aplicada durante la instalación, asegurando que el pilote avance al menos una vuelta de hélice por cada rotación.
- Deflexión: Desplazamiento axial del pilote, medido en la cabeza del mismo bajo carga aplicada.
- Diseñador: Persona o firma responsable del diseño de la cimentación helicoidal.

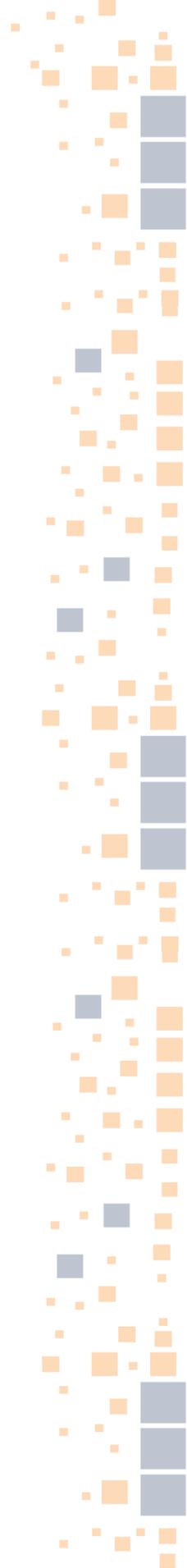




HELICAL®

PILOTES HELICOIDALES

- Resistencia Torsional Efectiva: Promedio del torque de instalación, calculado generalmente sobre la longitud correspondiente a las últimas tres veces el diámetro del hélice mayor, cercano o dentro del estrato de apoyo especificado.
- Sección de Extensión: Componente del pilote que conecta la sección inicial con el dispositivo de transferencia de carga. Puede ser lisa (sin hélices) o incluir hélices adicionales.
- Carga Factoreada: Carga de servicio multiplicada por un factor de carga según el método LRFD.
- Capacidad Geotécnica (o Capacidad Última del Suelo): Carga máxima que puede resistirse mediante el apoyo de las placas helicoidales y fricción del eje sin exceder los criterios de desempeño especificados, según las características geotécnicas del sitio.
- Ingeniero Geotécnico: Persona o firma responsable de la investigación del subsuelo y de proporcionar los parámetros de diseño para la cimentación helicoidal.
- Anclaje Helicoidal (Helical Anchor o Tieback): Uno o más hélices unidos a un eje central con un dispositivo de transferencia de carga, usado típicamente en aplicaciones de tensión o estabilidad de taludes. Puede incluir recubrimientos anticorrosivos.
- Cimentación Helicoidal: Sistema de cimentación que incluye al menos un pilote o anclaje helicoidal, utilizado para soportar estructuras.
- Pilote Helicoidal: Uno o más hélices soldados a un eje central con un sistema de transferencia de carga. Puede incluir protección contra la corrosión.
- Placa Helicoidal (Hélice): Placa de acero (usualmente circular) conformada en espiral y soldada al eje central.
- Ángulo de Instalación: Ángulo de inclinación entre el eje longitudinal del pilote y la horizontal.
- Sección de Arranque (Lead Section): Primer segmento del pilote instalado en el suelo; incluye una o más hélices soldadas al eje.
- Estado Límite: Condición más allá de la cual un componente del pilote pierde su funcionalidad (estado límite de servicio) o excede su resistencia (estado límite último).
- Cargas: Fuerzas definidas por el propietario o su representante que deben ser resistidas por los pilotes. Pueden ser cargas permanentes o variables.
- Factor de Carga: Coeficiente que toma en cuenta desviaciones entre la carga real y la de servicio (usado en LRFD).
- Prueba de Carga Dinámica: Procedimiento que evalúa la capacidad de carga mediante impactos de alta intensidad (golpes).
- Prueba de Carga Estática: Procedimiento para evaluar la capacidad y el desplazamiento bajo cargas aplicadas axialmente o lateralmente.
- Dispositivo de Transferencia de Carga: Elemento que transfiere las cargas estructurales al pilote helicoidal.
- Resistencia Mecánica: Carga máxima axial, de tensión o lateral que puede resistir el pilote por su capacidad estructural (también llamada resistencia estructural).
- Avance Normal: Movimiento vertical equivalente a un paso de hélice por rotación del eje.
- Revelado (Reveal): Distancia desde la superficie del terreno hasta el extremo superior del pilote instalado.
- Paso (Pitch): Distancia medida a lo largo del eje del pilote entre los bordes delantero y trasero de una hélice.
- Factor de Seguridad: Relación entre la resistencia última y la carga de servicio usada en el diseño (usado en ASD).





- Carga de Servicio: Magnitud total de las cargas sin factores, definidas por el diseñador estructural.
- Torque: Medida de la fuerza de rotación multiplicada por el brazo de momento necesario para vencer la resistencia al corte del suelo (en ft-lb). Se usa empíricamente para estimar la capacidad última del pilote.
- Resistencia Última: Estado límite basado en la menor de las capacidades estructural o geotécnica del pilote, definido como el punto donde no puede aplicarse más carga sin superar los criterios de desempeño.

3. MATERIALES E INSTALACIÓN DE PILOTES HELICOIDALES

Un pilote helicoidal es una cimentación de acero prefabricada que se instala girándola dentro del terreno utilizando un dispositivo de torque (por ejemplo, un motor de torsión). Está compuesto principalmente por:

- una sección de arranque (lead section),
- extensiones,
- placas helicoidales (hélices), y
- una terminación estructural (cabezal o anclaje).

La sección de arranque es la primera en introducirse al terreno y puede tener una o varias hélices. Luego se conectan las secciones de extensión hasta alcanzar la profundidad requerida.

Un pilote helicoidal resiste cargas aplicadas mediante el apoyo de las placas helicoidales y la fricción lateral del eje, en el suelo o roca meteorizada que lo rodea.

3.1 COMPONENTES DEL PILOTE HELICOIDAL

3.1.1 PLACAS DE APOYO HELICOIDALES O HÉLICES (MÚLTIPLES)

Una placa helicoidal es una lámina de acero (circular o con esquinas redondeadas) que se forma en espiral y se suelda al eje del pilote (ver Figura 3). La separación entre hélices comúnmente varía entre 2.4 y 3.6 veces el diámetro de la hélice líder. Las hélices están dispuestas para que sigan el mismo trayecto en el suelo, manteniendo una trayectoria estable. Normalmente, la hélice de menor diámetro se instala en la punta del pilote, seguida de otras hélices de mayor diámetro hacia arriba.





FIGURA 3 SECCIÓN DE PLOMO TÍPICA (IMAGEN CORTESÍA DE MAGNUM PIERING).

La geometría de las hélices puede variar entre fabricantes. A medida que aumentan el diámetro del eje y de las hélices, también suele aumentar el paso (pitch). Sin embargo, el paso debe mantenerse constante en todas las hélices de un mismo pilote para minimizar la perturbación del suelo.

- Para pilotes de diámetro pequeño (4.5" o menos), el AC358 establece los siguientes criterios geométricos estándar:
- El paso debe ser de 3 pulgadas \pm 0.25 pulgadas.
- Todas las hélices deben tener el mismo paso.
- Deben estar dispuestas de forma que sigan el mismo trayecto en el suelo.
- Deben estar perpendiculares al eje del pilote, con los bordes delantero y trasero paralelos en no más de 0.25 pulgadas.
- En ejes con múltiples hélices, la hélice de menor diámetro debe ir al frente, seguida de las de mayor tamaño.

3.1.2 EJES (SHAFTS)

El eje es el componente central del pilote helicoidal. Los perfiles más comunes son:

Barras cuadradas macizas,

Tubos redondos huecos, y

Tubos cuadrados huecos.

(Ver Figura 4)

Los ejes incluyen tanto la sección inicial como las extensiones. Las secciones de arranque suelen tener una longitud de 5 a 10 pies. Las extensiones suelen ser de 5, 10 o 20 pies, aunque pueden fabricarse en otras longitudes según los requerimientos del proyecto.

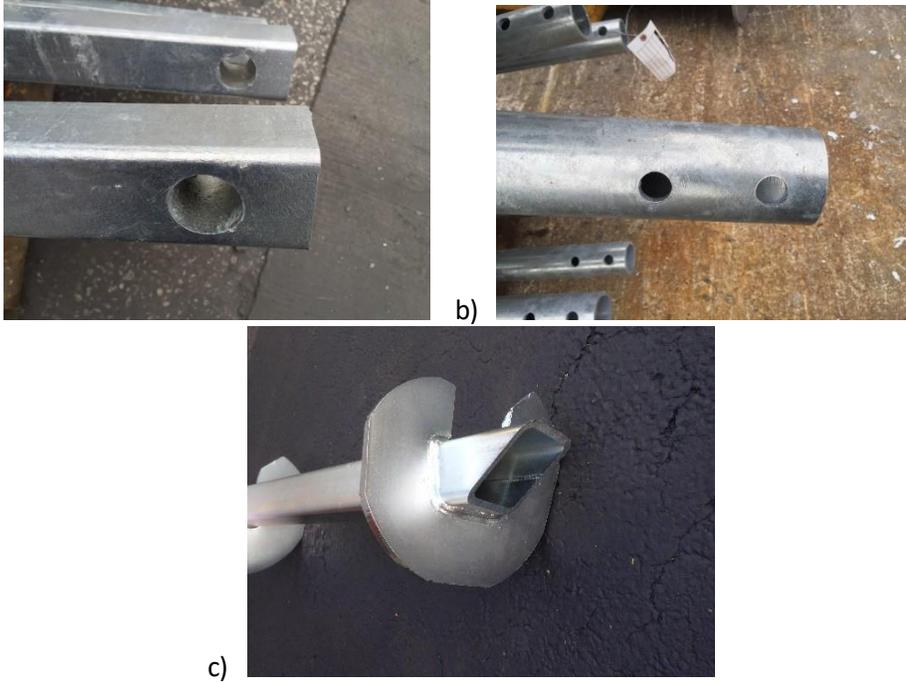


FIGURA 4 EJEMPLOS DE FUSTES DE PILOTES HELICOIDALES TÍPICOS, A) FUSTE CUADRADO, B) FUSTE REDONDO (IMÁGENES CORTESÍA DE HUBBELL POWER SYSTEMS), C) FUSTE CUADRADO HUECO (IMAGEN CORTESÍA DE HELI-PILE).

3.1.3 ACOPLAMIENTOS (COUPLERS)

Los acoplamientos se utilizan para conectar las secciones de extensión con la sección de arranque o entre sí.

Pueden ser atornillados o roscados.

En pilotes de mayor diámetro, también pueden ser soldados.

Los acoplamientos deben diseñarse o probarse para resistir las cargas de instalación y de servicio.

Algunos tipos comunes de acoplamientos incluyen:

- Mangas externas soldadas al eje,
- Mangas internas soldadas o independientes,
- Extremos abocardados (formados por forja),
- Conexiones roscadas.



FIGURA 5 ACOPLADORES TÍPICOS PARA PILOTES HELICOIDALES, A) ATORNILLADOS CON MANGUITO DE TUBERÍA EXTERNO SOLDADO (IMAGEN CORTESÍA DE MASON CONSTRUCTION), B) ATORNILLADOS CON MANGUITO DE TUBERÍA INTERNO (IMAGEN CORTESÍA DE FOUNDATION SUPPORTWORKS, INC.).

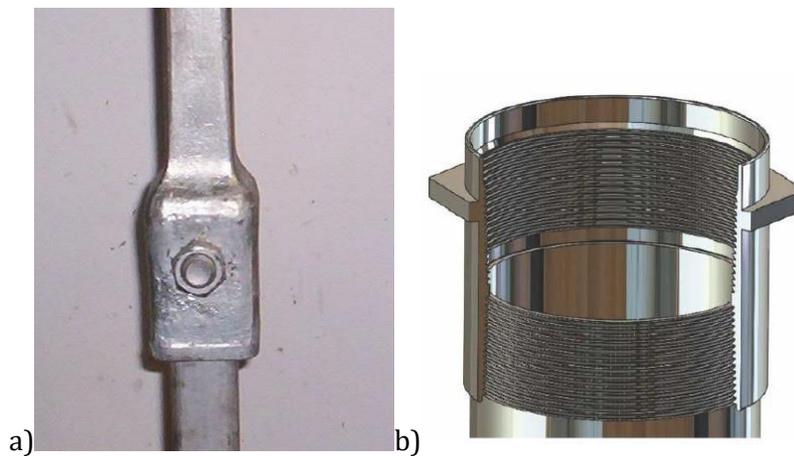


FIGURA 6 MÁS ACOPLADORES PARA PILOTES HELICOIDALES, A) ACOPLADOR FORJADO Y RECALCADO (IMAGEN CORTESÍA DE HUBBELL POWER SYSTEMS), B) ACOPLADOR ROSCADO (IMAGEN CORTESÍA DE AMERICAN PILE DRIVING EQUIPMENT, INC.)

3.1.4 PROTECCIÓN CONTRA CORROSIÓN

La protección contra la corrosión se analiza a fondo en el Capítulo 7. Puede incluir:

Aumento del espesor del acero (como “sacrificio”),

Recubrimientos de zinc (galvanizado),

Recubrimientos epóxicos o similares,

Sistemas de protección catódica (ánodos galvánicos o corriente impresa).

El documento AC358 detalla los espesores mínimos requeridos para componentes galvanizados, acero al carbono sin recubrimiento y acero recubierto en polvo.

3.1.5 GROUT

El grout (lechada) se utiliza como protección contra la corrosión o para incrementar la capacidad axial y lateral del pilote.



Por lo general, consiste en una mezcla de cemento y agua, aunque puede incluir arena o fibras metálicas.

El uso de grout puede mejorar significativamente la capacidad del pilote.

Para más detalles sobre materiales y procedimientos de inyección, se recomienda consultar el Capítulo 4 del Manual del FHWA para diseño y construcción de micropilotes (2005).

3.1.6 TERMINACIÓN ESTRUCTURAL

Dependiendo de la aplicación, existen distintos tipos de terminaciones estructurales para los pilotes:

3.1.6.1 CABEZAL DE PILOTE (PILE CAP)

En nuevas construcciones, lo más común es usar una placa plana soldada o atornillada al extremo superior del pilote, que luego se incrusta en el concreto o se conecta directamente a la superestructura.



FIGURA 7 CABEZA DE PILOTE DE PLACA PLANA TÍPICA PARA PILOTES HELICOIDALES (IMAGEN CORTESÍA DE GRIP-TITE MANUFACTURING).

3.1.6.2 SOPORTES TIPO ESCUADRA (BRACKETS)

En trabajos de recalce (underpinning), se usan comúnmente soportes en forma de “L”:

La parte horizontal se coloca debajo de la cimentación existente.

La parte vertical se apoya contra la cimentación y se fija con pernos.

Algunos sistemas permiten ajustar la elevación del soporte durante o después de la instalación.



FIGURA 8 SOPORTE DE CIMENTACIÓN TÍPICO EN FORMA DE L PARA APLICACIONES DE APUNTALAMIENTO QUE UTILIZAN PILOTES HELICOIDALES (IMAGEN CORTESÍA DE GRIP-TITE MANUFACTURING).



FIGURA 9 ELEVACIÓN DE UNA ESTRUCTURA APUNTALADA MEDIANTE PILOTES HELICOIDALES (IMAGEN CORTESÍA DE RAMJACK).

3.2 INSTALACIÓN

3.2.1 EQUIPOS DE PERFORACIÓN / MOTORES DE TORQUE

Diversos tipos de maquinaria pueden emplearse para la instalación de pilotes helicoidales, incluyendo:





HELICAL[®]

PILOTES HELICOIDALES

- Excavadoras,
- Cargadores tipo skid steer,
- Equipos de perforación montados sobre camión o sobre orugas.

(Ver Figura 10: Máquina hidráulica típica con motor de torque)

Es recomendable que el motor de torque tenga al menos un 15% más de capacidad que el torque requerido para asegurar que se alcance el valor de instalación especificado.

Al seleccionar el motor, deben considerarse:

El caudal hidráulico y presión operativa recomendados por el fabricante,

La máquina portadora (host) debe poder aplicar fuerza axial (crowd) suficiente y resistir el torque generado.

Para pilotes de pequeño diámetro, el avance normal debe ser de una vuelta completa por cada paso de hélice vertical, lo cual es esencial para mantener la relación entre torque y capacidad.

Para pilotes de gran diámetro:

No siempre se logra un paso por vuelta debido al mayor desplazamiento de suelo,

Se requiere equipo más grande y potente,

Esto puede afectar la velocidad de avance y la relación torque-capacidad.



FIGURA 10 MÁQUINA HIDRÁULICA TÍPICA Y MOTOR DE TORSIÓN PARA LA INSTALACIÓN DE PILOTES HELICOIDALES (CORTESÍA DE HUBBELL POWER SYSTEMS, INC.)

3.2.2 TÉCNICAS DE INSTALACIÓN

La sección de arranque se posiciona según el plano de diseño. En pilotes inclinados, puede empezarse verticalmente para facilitar la penetración y luego ajustar el ángulo requerido. La instalación debe realizarse de forma continua y uniforme, a una velocidad de rotación de 5 a 25 rpm. Se aplica fuerza axial adecuada (crowd) para garantizar el avance correcto. Se agregan secciones de extensión según





se necesite, hasta alcanzar: La profundidad mínima requerida, y/o El torque mínimo de instalación especificado. El avance debe ajustarse de acuerdo con las condiciones del suelo y la profundidad alcanzada.

3.2.3 MEDICIÓN DEL TORQUE DE INSTALACIÓN

Durante la instalación se deben registrar los valores de torque a intervalos de 3 pies o menores. Esto es fundamental porque el torque de instalación puede correlacionarse con la capacidad axial del pilote (ver Sección 5.1.5).

Métodos comunes de medición:

Indicadores digitales de torque: Equipados con galgas extensométricas y pantallas digitales, registran datos en tiempo real.

Pasadores de corte (shear pins): Se colocan en el acoplamiento superior y están diseñados para romperse a cierto torque. La cantidad de pasadores cortados indica si se alcanzó el torque deseado.

Medidores de presión hidráulica en línea: Miden la presión en el motor de torque. Los fabricantes proporcionan tablas de correlación entre presión y torque. *(Estas correlaciones pueden variar si se cambia algún componente del sistema hidráulico.)*

Todo equipo de medición de torque debe estar calibrado dentro del año calendario anterior a su uso. Si se sospecha que las lecturas son inexactas, se debe realizar una recalibración inmediata. Además del equipo calibrado, es crucial correlacionar los valores de torque con pruebas de carga realizadas in situ.

3.2.4 COLOCACIÓN DE GROUT (PILOTES INYECTADOS)

El grout puede utilizarse para:

Aumentar la capacidad axial y lateral,

Proteger contra la corrosión.

Métodos comunes de colocación:

a) Gravedad (Gravity-fed):

Se utiliza una placa de desplazamiento que arrastra el grout mientras se instala el pilote.

El grout se introduce desde un reservorio en la superficie.

Se ha observado que este método puede duplicar la capacidad axial comparado con pilotes sin grout.

(Ver Figura 11b: Equipo típico de inyección por gravedad)

b) Presión (Pressure-grouted):

El grout se inyecta a través del eje del pilote mediante puertos localizados justo sobre una hélice.

Puede haber puertos sobre una o varias hélices.

Este método ha mostrado aumentos de capacidad de 2 a 3 veces respecto a pilotes sin grout.

(Ver Figura 11a: Equipo típico de inyección por presión)





a)

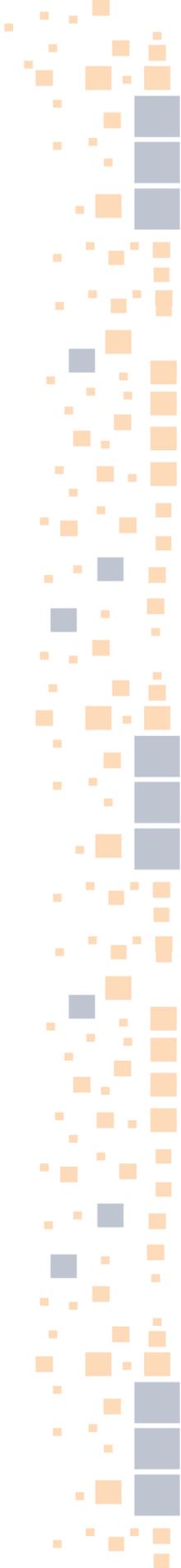


b)

FIGURA 11 EQUIPOS TÍPICOS UTILIZADOS PARA PILOTES HELICOIDALES INYECTADOS: A.) INYECCIÓN A PRESIÓN (IMAGEN CORTESÍA DE AMERICAN PILE DRIVING EQUIPMENT, INC.), B.) INYECCIÓN POR GRAVEDAD (IMAGEN CORTESÍA DE HUBBELL POWER SYSTEMS, INC.)

4. PROCESO DE DISEÑO

El proceso de diseño para pilotes helicoidales se resume en el Diagrama de Flujo de Diseño (Figura 12). Las secciones del manual correspondientes a cada paso se indican en paréntesis.





Esta sección analiza la recopilación de información específica del proyecto y las consideraciones de diseño, mientras que los Capítulos 5 y 6 abordan con mayor detalle la determinación de la capacidad del sistema desde los enfoques geotécnico y estructural, respectivamente.

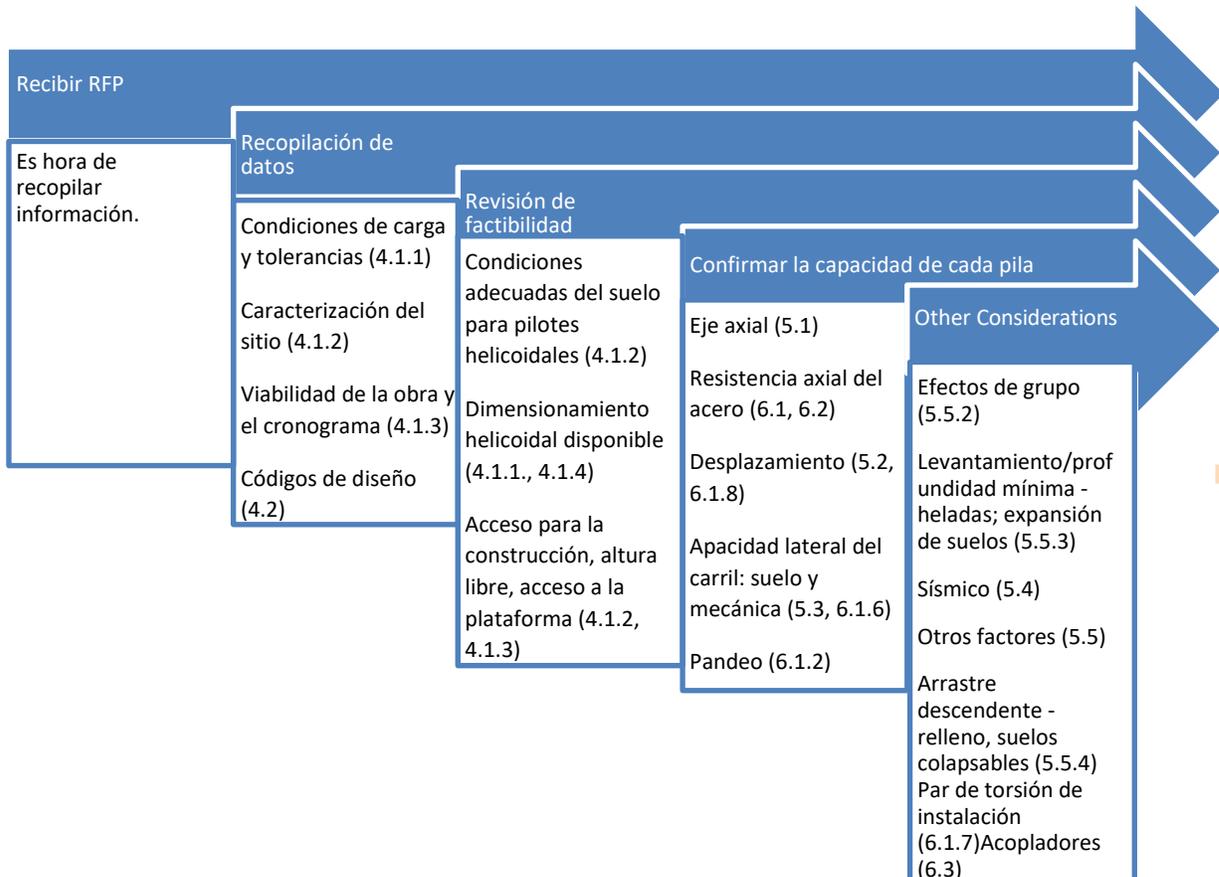


FIGURA 12 PROCESO GENERAL DE DISEÑO DE PILOTES HELICOIDALES.

4.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La información recopilada puede ser:

Específica del proyecto (cargas, normas aplicables, plazos), o

Específica del sitio (condiciones del suelo, topografía, restricciones físicas).

Estas se agrupan en cuatro categorías principales:

4.1.1 CARGAS ESTRUCTURALES Y TOLERANCIAS

El ingeniero estructural proporciona las cargas de diseño que servirán de base para:

Seleccionar la geometría del pilote,

Definir la separación entre pilotes,

Determinar si se requiere agrupamiento o cabezales estructurales. Factores considerados:





Cargas axiales, laterales y momentos.

- Desplazamientos permisibles.
- Tamaño especificado del pilote.
- Ubicación y espaciamiento.
- Altura de muros.
- Necesidad de múltiples pilotes con cabezales.

También se deben anticipar posibles desafíos, como:

Requerimiento de pilotes más grandes por mayores cargas.

Uso de pilotes inclinados para resistir fuerzas laterales.

Tiempos de entrega ajustados que afecten el suministro de materiales.

4.1.2 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO Y PROPIEDADES DEL SUELO

Se debe realizar una investigación geotécnica del subsuelo, incluyendo:

Profundidad y espesor de cada estrato.

Números de golpe SPT.

Cohesión y ángulo de fricción del suelo.

Resistencia de roca meteorizada.

Capacidad portante última.

Compresibilidad de los estratos.

Nivel freático.

Presencia de piedras, rocas duras u obstrucciones.

En proyectos pequeños o remotos, el propietario podría omitir esta investigación. En tal caso, el instalador podría usar correlaciones de torque como método alternativo. Sin embargo, se deben entender y aceptar los riesgos de este enfoque.

4.1.3 VIABILIDAD DE CONSTRUCCIÓN

El diseñador o contratista debe identificar desde el inicio los posibles obstáculos y proponer soluciones.

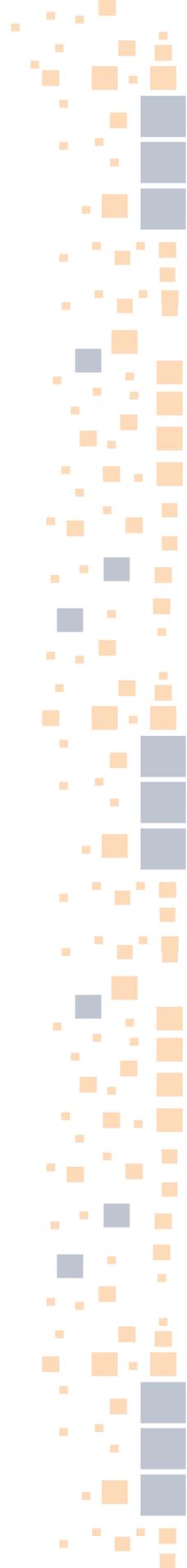
Factores comunes:

- Acceso al equipo: Pilotes de mayor diámetro requieren maquinaria más pesada.
- Obstrucciones aéreas: Pueden requerir equipos más compactos y secciones de eje más cortas.
- Restricciones por seguridad: Puede que no se permita soldadura o corte por antorcha en el sitio.
- Obstáculos subterráneos: Rocas, escombros o materiales duros podrían requerir preperforación o cambio de sistema de pilotes.

4.1.4 SELECCIÓN DEL EJE Y DE LAS HÉLICES

La selección del eje y de las hélices se basa en:

Requisitos de carga geotécnica y estructural.





Fuerzas de instalación esperadas.

Experiencia del contratista con ciertos elementos.

Observaciones:

Más hélices = mayor torque = posible necesidad de eje más robusto.

Mayor profundidad = mayor fricción lateral = posible incremento de carga axial.

Factores adicionales a considerar:

- Tamaño y cantidad de hélices.
- Separación entre pilotes.
- Profundidad hasta el estrato resistente.
- Pandeo del eje en suelos blandos o en el aire.
- Resistencia lateral.
- Potencial de corrosión.
- Hundimiento o expansión del suelo.
- Profundidad mínima de hincado.

4.2 CARGAS Y DEFORMACIONES

4.2.1 CARGAS DE DISEÑO ASD Y LRFD

El ingeniero estructural deberá indicar si las cargas son:

De servicio (trabajo) o últimas (ASD), o

Factoreadas o no factoreadas (LRFD).

Es importante que todo el equipo de diseño utilice parámetros y métodos consistentes.

En estructuras verticales (edificios), se usa el IBC, el cual se basa en ASD para pilotes helicoidales. También se puede usar LRFD si se aplican los factores de carga y resistencia adecuados.

4.2.2 IMPACTO DE LAS PRUEBAS DE CARGA EN LOS FACTORES DE RESISTENCIA (LRFD)

El factor de seguridad (o su inverso: el factor de resistencia) debe ajustarse según:

Calidad de los datos del subsuelo.

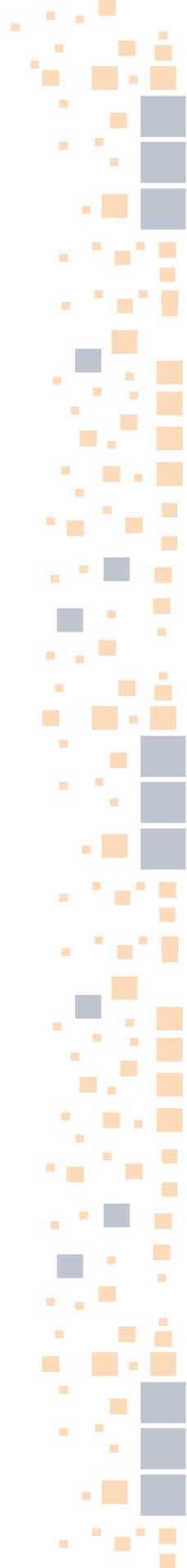
Presencia o ausencia de pruebas de carga.

El código IBC es menos detallado que AASHTO o el Código Nacional de Construcción de Canadá en este aspecto, por lo que la guía presenta una Tabla comparativa de factores de resistencia para pilotes y sistemas similares (ver documento original).

En resumen:

Mayor información + pruebas de carga = posibilidad de reducir el factor de seguridad.

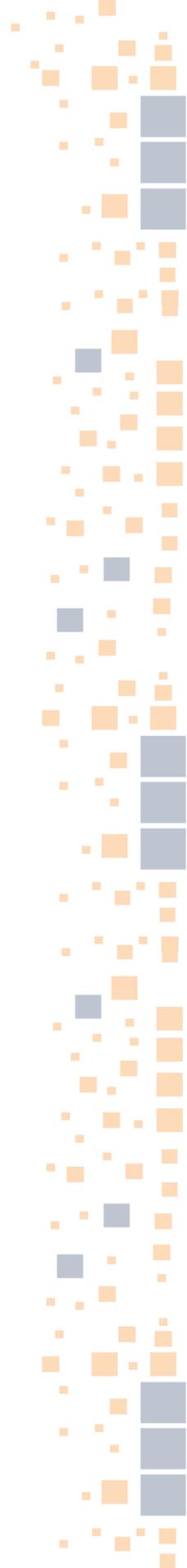
Menor información = se recomienda un factor de seguridad más conservador.

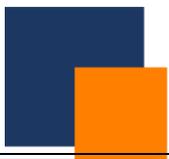




HELICAL[®]
PILOTES HELICOIDALES

TABLA 1 RESUMEN DE FACTORES DE RESISTENCIA BASADOS EN CÓDIGO PARA CIMENTACIONES PROFUNDAS.





Método de Determinación	Condición de Carga (para un solo elemento)	Elemento	Tipo de Suelo	AASHTO 2015 Pilote Perforado (Tabla 10.5.5.2.4-1)	AASHTO 2015 Pilote Hincado (Tabla 10.5.5.2.3-1)	AASHTO 2015 Micropilote (Tabla 10.5.5.2.5-1)	IBC 2015 (1810.3) Cimentaciones profundas	NBC Canadá 2015 (Comentario K)
Propiedades estimadas del suelo/roca	Compresión axial	Resistencia por fricción lateral	Arcilla	0.45	0.25 - 0.40	0.55	0.5 (1810.3.3.1.9)	0.4
			Arena	0.55	0.30 - 0.45	0.55	—	0.4
			Roca	0.55	—	0.55	—	0.4
	Resistencia por punta		Arcilla	0.40	0.25 - 0.40	—	—	0.4
			Arena	0.50	0.30 - 0.45	—	—	0.4
			Roca	0.50	0.45	0.50	—	0.4
Uplift (levantamiento)	—	—	Arcilla	0.35	0.20 - 0.40	0.55	0.33 ^c (0.5 para viento o sismo)	0.3
			Arena	0.45	0.20 - 0.40	0.55	—	—
			Roca	0.40	0.20 - 0.40	0.55	—	—
Carga lateral	—	—	Todos	1.0	1.0	—	0.5 × (carga que produce 1" de desplazamiento lateral en la cimentación) ^b	0.5



Pruebas de carga y métodos analíticos

Prueba / Método	Condición de Carga	AASHTO Pilote Perforado	AASHTO Pilote Hincado	AASHTO Micropilote	IBC 2015	NBC Canadá
Prueba de carga estática con prueba dinámica en ≥ 2 pilotes por sitio y $> 2\%$ de los pilotes de producción	Compresión axial	0.70	0.80	0.80	—	—
Prueba de carga estática sin prueba dinámica	Compresión axial	0.70	0.75	0.75	0.5 ^c	0.6
Análisis con ecuación de onda y calibración del martillo	Compresión axial	—	0.50	—	Requerido para cargas admisibles $> 40 T_c$	—
Ecuaciones de hincado	Compresión axial	—	0.10 - 0.40	—	Solo permitido para cargas admisibles $< 40 T_c$	—
Prueba de carga estática sin prueba dinámica	Uplift (levantamiento)	0.60	0.60	0.60	0.5 ^c (0.67 para viento o sismo)	0.4

Notas:

- ^a Los factores de seguridad especificados por el IBC se convirtieron a factores de resistencia para su comparación con otros códigos.
- ^b Se permiten cargas laterales más altas si el desplazamiento lateral predicho no causa distorsión dañina ni sobrecarga en ningún elemento.
- ^c Los valores proporcionados aplican a cimentaciones profundas en general. No se ofrecen factores específicos para pilotes helicoidales, salvo que esta nota no esté indicada.
- Estos factores de resistencia corresponden a cimentaciones profundas relacionadas y están vigentes a la fecha de esta guía de diseño. Los diseñadores deben consultar las revisiones más recientes de los estándares aplicables.





4.2.3 SEPARACIÓN ENTRE PILOTES Y DISTRIBUCIÓN DE CARGAS

Para muros y cargas distribuidas:

Los pilotes pueden espaciarse más si los muros están diseñados para cubrir la mayor luz.

IBC 18.2.2 requiere dos líneas de pilotes separadas por al menos 1 pie (0.3 m), con algunas excepciones.

Se recomienda escalonar los pilotes entre líneas para evitar efectos de grupo.

Para cargas concentradas (columnas):

Puede ser necesario usar grupos de pilotes para distribuir la carga.

4.2.4 DEFORMACIÓN ADMISIBLE BAJO CARGA DE SERVICIO

El diseñador debe calcular el desplazamiento esperado (vertical y horizontal) y compararlo con los límites admisibles proporcionados por el ingeniero estructural.

Según el IBC:

El asentamiento no debe causar inestabilidad ni sobrecargar ningún elemento.

Para desplazamientos laterales, la carga aplicada no debe producir más de 1 pulgada de movimiento lateral total.

Esto también aplica para levantamientos por heladas o suelos expansivos.

5. DISEÑO GEOTÉCNICO

El diseño geotécnico de pilotes helicoidales se basa en los mismos principios de la mecánica de suelos utilizados para otros tipos de pilotes. Esta sección te ayudará a entender cómo se determina la capacidad de carga de los pilotes helicoidales.

Además, se presenta una discusión ampliada sobre la relación empírica entre el torque de instalación y la capacidad del pilote, conocida como el factor de correlación de torque.

El análisis geotécnico incluye:

Carga axial (compresión y tensión),

Carga lateral,

Pandeo,

Asentamientos.

5.1 CAPACIDAD AXIAL

La capacidad axial última de un pilote (para cualquier tipo) se estima mediante:

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

donde:

Q_u = Capacidad última del pilote

Q_p = Capacidad por apoyo en la punta (placa helicoidal)





Q_s = Capacidad por fricción lateral entre el eje y el suelo

En diseño por esfuerzos admisibles (ASD):

$$Q_a = Q_u / FS$$

donde:

Q_a = Capacidad admisible axial

FS = Factor de seguridad

En el caso de pilotes helicoidales, el término "punta del pilote" se sustituye por un término que describe toda el área de apoyo proporcionada por la(s) placa(s) helicoidal(es). La capacidad axial total de la hélice para un pilote helicoidal en compresión se calcula como la suma de las capacidades individuales de cada hélice (Q_h). La capacidad individual de cada hélice en el suelo se determina calculando la capacidad portante bajo cada hélice.

En fustes de diámetro pequeño (de 89 mm o menos), la resistencia a la fricción suele ignorarse. A medida que aumenta el diámetro, debe considerarse la contribución de la fricción del fuste a la capacidad total del pilote (Sección 5.1.2).

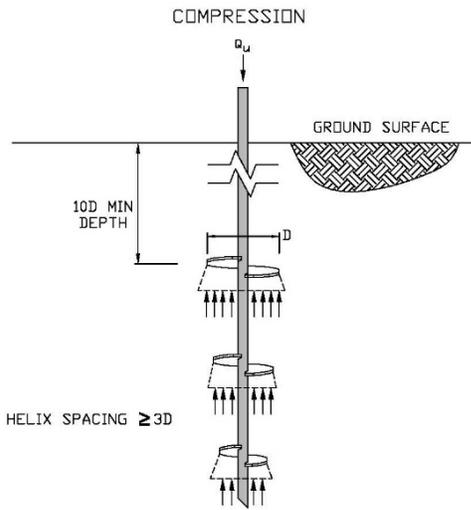
Para una profundidad de hélice dada, pueden producirse dos modos de fallo subsuperficial: superficial y profundo. Los términos "superficial" y "profundo" se refieren a la ubicación de la placa de apoyo con respecto a la superficie del terreno. Los fallos superficiales en tracción suelen ser frágiles, con erupción general del suelo en la superficie del terreno y una caída repentina de la resistencia a la carga hasta prácticamente cero. En fallas profundas a tracción, el suelo falla progresivamente, manteniendo una resistencia significativa a la carga post-última y presentando poca o ninguna deformación superficial. Para evitar fallas superficiales, la profundidad de la placa helicoidal superior debe ser como mínimo 10 veces su diámetro. En zonas sujetas a erosión o socavación superficial y con aguas subterráneas poco profundas, puede requerirse una profundidad mayor.

La capacidad axial total de la hélice para un pilote helicoidal a tracción se calcula de la misma manera que para un pilote helicoidal a compresión, excepto que la capacidad individual de la placa helicoidal (Q_h) se determina calculando la capacidad portante del suelo sobre ella. La capacidad superficial se determina considerando el estado límite donde la tensión requerida excede la resistencia al corte y el peso del suelo sobre la placa helicoidal superior. Dado que la capacidad a poca profundidad depende principalmente del peso del suelo y no del soporte de la placa, el torque no es un indicador fiable de la capacidad a poca profundidad.

5.1.1 CAPACIDAD TEÓRICA DE LA PLACA HELICOIDAL

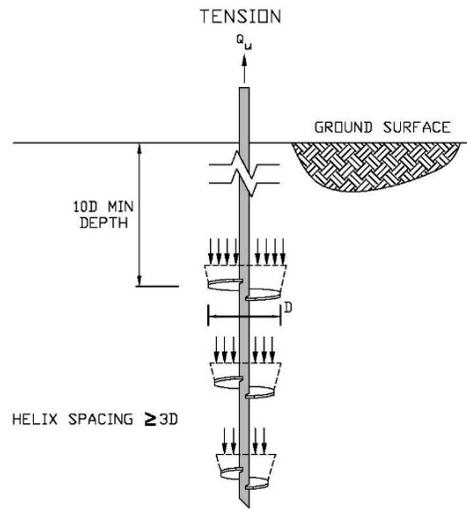
La capacidad de la placa helicoidal se determina calculando la capacidad portante unitaria del suelo en cada hélice y multiplicando el resultado por el área proyectada de cada hélice. Véase la Figura 13 para representaciones gráficas de las distribuciones de carga en un pilote helicoidal en compresión y tensión. Esta figura representa un pilote con un diámetro de hélice grande en relación con el diámetro del fuste, por lo que la resistencia a la fricción suele ignorarse. A medida que aumenta el diámetro del fuste, la fricción en el fuste se convierte en una parte más significativa de la capacidad del pilote.





HELIX SPACING $\geq 3D$

TOTAL CAPACITY EQUAL TO
SUM OF INDIVIDUAL HELIX
BEARING PLATES, Q_h



HELIX SPACING $\geq 3D$

TOTAL CAPACITY EQUAL TO
SUM OF INDIVIDUAL HELIX
BEARING PLATES, Q_h

SKIN FRICTION ALONG THE STEEL SHAFT IS TYPICALLY IGNORED BECAUSE IT'S SMALL COMPARED TO PLATE BEARING FROM MULTIPLE HELICES

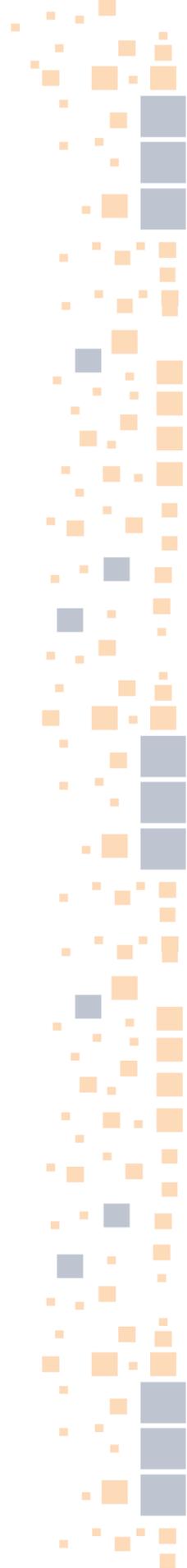




FIGURA 13 MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA PARA UN PILOTE HELICOIDAL DE DIÁMETRO PEQUEÑO DONDE SE DESPRECIA LA FRICCIÓN DEL FUSTE A) EN COMPRESIÓN Y B) EN TENSIÓN. (IMAGEN CORTESÍA DE HUBBELL POWER SYSTEMS).

La capacidad última de cada hélice se calcula así:

$$Q_h = A_h (N_c \cdot c + q' \cdot N_q)$$

donde:

Q_h = Capacidad de la hélice individual

A_h = Área proyectada de la hélice

c = Cohesión del suelo

N_c, N_q = Factores de capacidad portante

q' = Presión vertical efectiva al nivel de la hélice

Para pilotes con varias hélices espaciadas a más de 3 diámetros entre sí:

$$Q_u = \sum Q_h$$

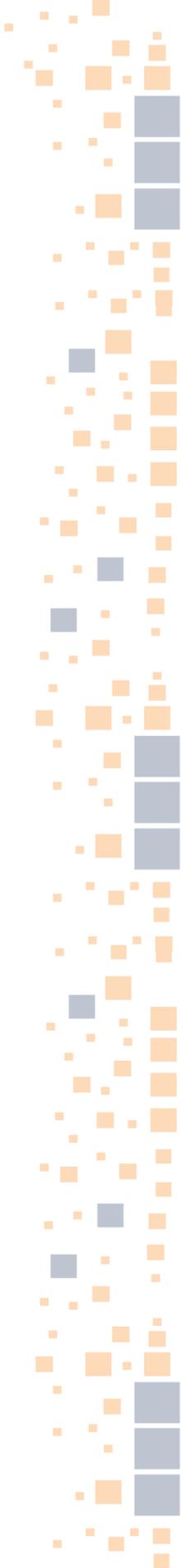
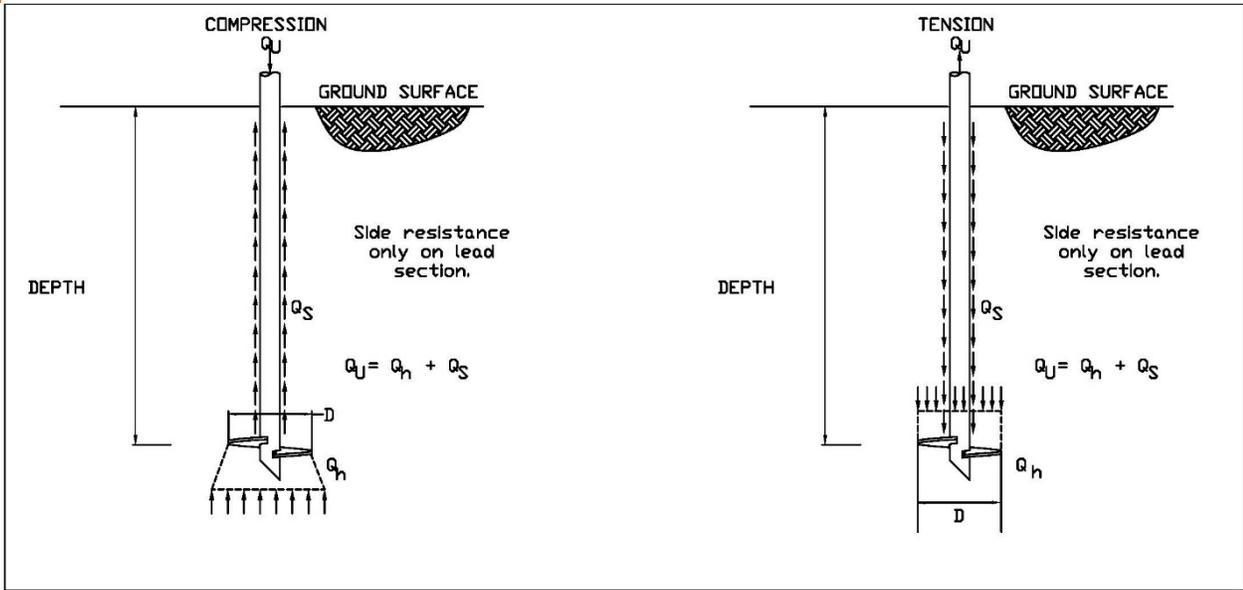
Si el espaciamiento entre hélices es menor, se debe usar el modelo de corte cilíndrico (ver 5.1.3).

5.1.2 FRICCIÓN DEL EJE

La fricción del fuste (o esfuerzo cortante lateral) se suele considerar para pilotes inyectados y para pilotes con un diámetro de fuste superior a 8,9 cm, ya que el área del fuste en contacto con el suelo contribuye proporcionalmente mayormente a la capacidad. La Figura 14 muestra las distribuciones de carga generalizadas para un pilote helicoidal con fricción del fuste en compresión y tensión.

Para pilotes con fuste de gran diámetro, algunos diseñadores consideran una placa helicoidal relativamente pequeña y la utilizan únicamente como herramienta de instalación, basándose en la fricción para determinar la capacidad del pilote.







La capacidad por fricción se calcula con:

$$Q_s = \pi \cdot D_s \cdot f_s \cdot L_f$$

donde:

D_s = Diámetro del eje

f_s = Adherencia suelo-eje

L_f = Longitud del eje en contacto efectivo con el suelo

Para suelos cohesivos:

$$f_s = \alpha \cdot c$$

Para suelos granulares:

$$f_s = K \cdot \sigma' \cdot v \cdot \tan(\delta)$$

donde:

α = factor de adherencia

c = cohesión no drenada

K = coeficiente de empuje de tierras adimensional, tomado de forma conservadora como el coeficiente de reposo

δ = ángulo de fricción (grados) entre el material del pilote y el suelo

$\sigma' \cdot v$ = tensión de sobrecarga vertical efectiva

El diseñador debe utilizar la resistencia de adherencia por fricción para pilotes de desplazamiento de acero (pilotes tubulares) o la resistencia de adherencia entre la lechada y el suelo (en el caso de pilotes con lechada) para estimar la capacidad de fricción. Los valores de fricción seleccionados para el diseño deben estar en el extremo inferior de los rangos aceptados, a menos que las pruebas de carga demuestren que se pueden utilizar valores mayores.

Es importante considerar el área de contacto con el suelo al diseñar para la fricción (Figura 15). Los pilotes de fuste cuadrado no generan capacidad de fricción, ya que el suelo se altera durante la instalación a medida que la sección cuadrada gira en el terreno. Además, los pilotes de fuste redondo con diámetros de acoplador mayores que el diámetro del fuste generalmente solo generan capacidad de fricción en la sección de entrada.

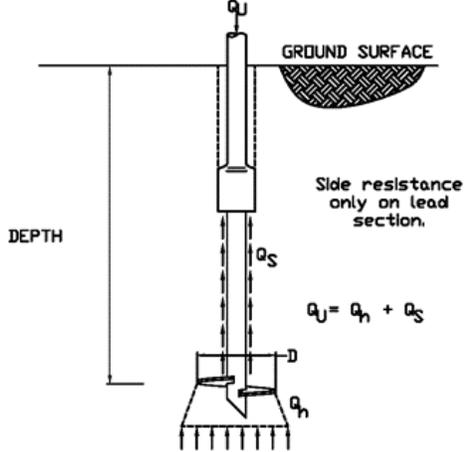




HELICAL®

PILOTES HELICOIDALES

COMPRESSION



TENSION

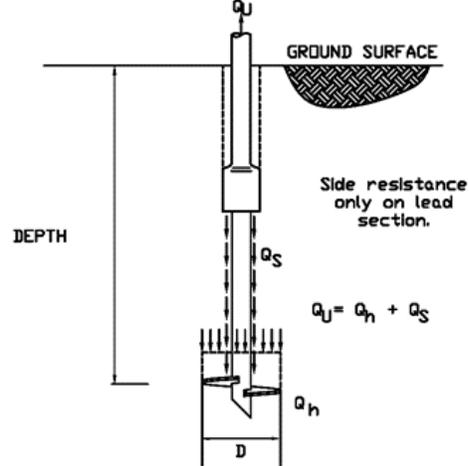


FIGURA 15 IMPACTO DEL ACOPLADOR EN LA FRICCIÓN DEL EJE (CORTESÍA DE HUBBELL POWER SYSTEMS) A) EN COMPRESIÓN Y B) EN TENSIÓN.

5.1.3 MODELO DE CORTE CILÍNDRICO

Cuando las hélices están a menos de 3 diámetros entre sí, se puede formar un cilindro de suelo confinado entre placas. La resistencia se calcula como:

$$Q_u = \pi \cdot D \cdot L \cdot (c + K \cdot \sigma' \cdot v \cdot \tan \phi) + A_h \cdot (N_c \cdot c + q' \cdot N_q)$$

donde:

D = diámetro promedio de la placa helicoidal (pies)

L = distancia total entre las placas helicoidales superior e inferior (pies)

K = coeficiente de empuje de tierras adimensional (considerado conservadoramente como en reposo)

$\sigma' \cdot v$ = tensión de sobrecarga vertical efectiva

Φ = ángulo de fricción del suelo (grados)

A_h = área proyectada de la placa helicoidal delantera (pies²). Este modelo es más realista en suelos homogéneos o donde el confinamiento lateral del suelo sea importante.



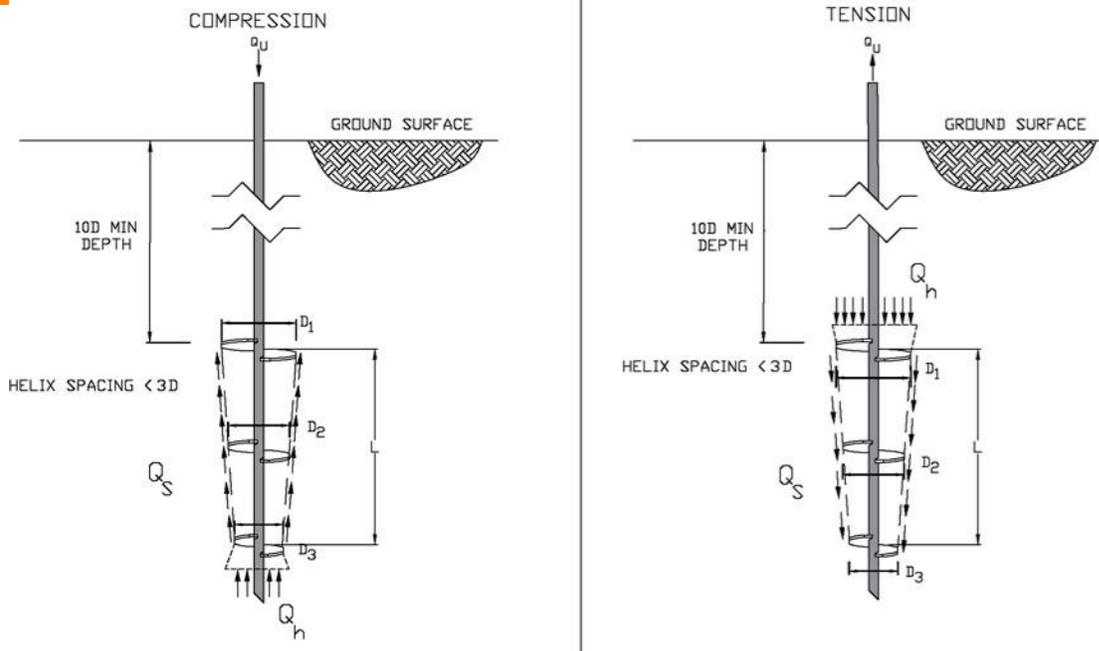


FIGURA 16 MODELO DE CORTE CILÍNDRICO A) EN COMPRESIÓN Y B) EN TENSION (IMAGEN CORTESÍA DE HUBBELL POWER SYSTEMS).

5.1.4 SEPARACIÓN DE LAS PLACAS HELICOIDALES

Las placas de apoyo helicoidales múltiples suelen estar espaciadas entre 2,4 y 3,6 veces el diámetro de la placa. Una separación entre placas helicoidales de aproximadamente tres veces el diámetro de la placa suele ser la más eficiente para maximizar la contribución de las placas individuales a la capacidad. Con una separación entre placas inferior a aproximadamente tres veces el diámetro, los bulbos de distribución de tensiones de Boussinesq de las placas adyacentes comienzan a superponerse, y el diseñador no puede asignar la capacidad de carga teórica completa a cada placa individual. En ese caso, se debe utilizar el modelo de corte cilíndrico. Con una separación entre placas superior a aproximadamente tres veces el diámetro de la placa, no hay suficiente arqueamiento ni confinamiento de suelos entre placas adyacentes para mantener eficazmente el cilindro de suelo, y el diámetro efectivo vuelve al diámetro del fuste de acero. La separación teórica óptima de las placas de apoyo puede calcularse para condiciones específicas del suelo, el diámetro del fuste y el diámetro de la placa de apoyo como la separación en la que la capacidad de carga de cada placa es igual a la capacidad de corte cilíndrico.

Es importante considerar la estratigrafía del sitio al seleccionar el número y la separación de las placas helicoidales. El uso de múltiples placas de apoyo es más eficiente si todas se ubican dentro de una capa de suelo relativamente uniforme. El uso de múltiples placas de apoyo en capas de suelo con propiedades muy diferentes probablemente solo se beneficiaría de las placas en las capas de suelo más rígidas. Consulte la Sección 5.5.1 para obtener más información sobre este tema.

5.1.5 CORRELACIONES DE TORQUE

Las relaciones capacidad-par para pilotes helicoidales se utilizan con frecuencia para los siguientes fines:



- Como criterio de finalización de la instalación (parte de la aceptación) en pilotes de diámetro relativamente pequeño a mediano (p. ej., los contemplados en la norma AC 358) o para tamaños de pilotes y suelos con una amplia base de datos de pruebas de carga.
- Como criterio de finalización de la instalación cuando se han determinado correlaciones específicas del sitio entre el par y la capacidad mediante pruebas de carga.
- Para proporcionar datos cualitativos sobre la aceptación, el rechazo o la modificación de pilotes durante la instalación.
- Para estimar la capacidad de cabeza de hincado y la resistencia a la torsión requeridas para los acoplamientos de pilotes.

Se usa frecuentemente la relación empírica:

$$Q_t = K_t \cdot T$$

donde:

Q_t = Capacidad última del pilote

T = Torque promedio medido en los últimos 3 pies

K_t = Factor de correlación torque-capacidad

Los factores de correlación capacidad-par, K_t , se han establecido estadísticamente a partir de una extensa base de datos de instalaciones, y el método se ha utilizado con éxito en aplicaciones de pilotes helicoidales. Esta relación empírica entre el par y la capacidad fue formalizada académicamente por Hoyt y Clemence (1989) y, desde entonces, ha sido respaldada por miles de pruebas de carga en pilotes helicoidales. Las relaciones empíricas entre el par medido durante la instalación y la capacidad de los pilotes helicoidales se utilizan ampliamente en Norteamérica, especialmente para pilotes helicoidales de diámetro pequeño. Se han publicado correlaciones en Hoyt y Clemence (1989); Manual Canadiense de Ingeniería de Cimentaciones (CFEM) (2006), Perko (2009), ICC-ES AC358 (2016), Padros et al. (2012). También se han reportado numerosas correlaciones teóricas entre el torque de instalación para pilotes helicoidales y sus capacidades axiales (Ghaly y Hanna (1991); Perko (2001); Tsuha y Aoki (2010); Sakr (2013).

Con base en la cantidad significativa y alta calidad de los datos, la correlación capacidad-torque se integró como parte de ICC-ES AC358. Se han generado datos adicionales durante el proceso de prueba de productos AC358 por organizaciones de prueba independientes que respaldan aún más las correlaciones. La Figura 17 muestra una compilación de datos de ese proceso de prueba independiente (CTL|Thompson, 2016).



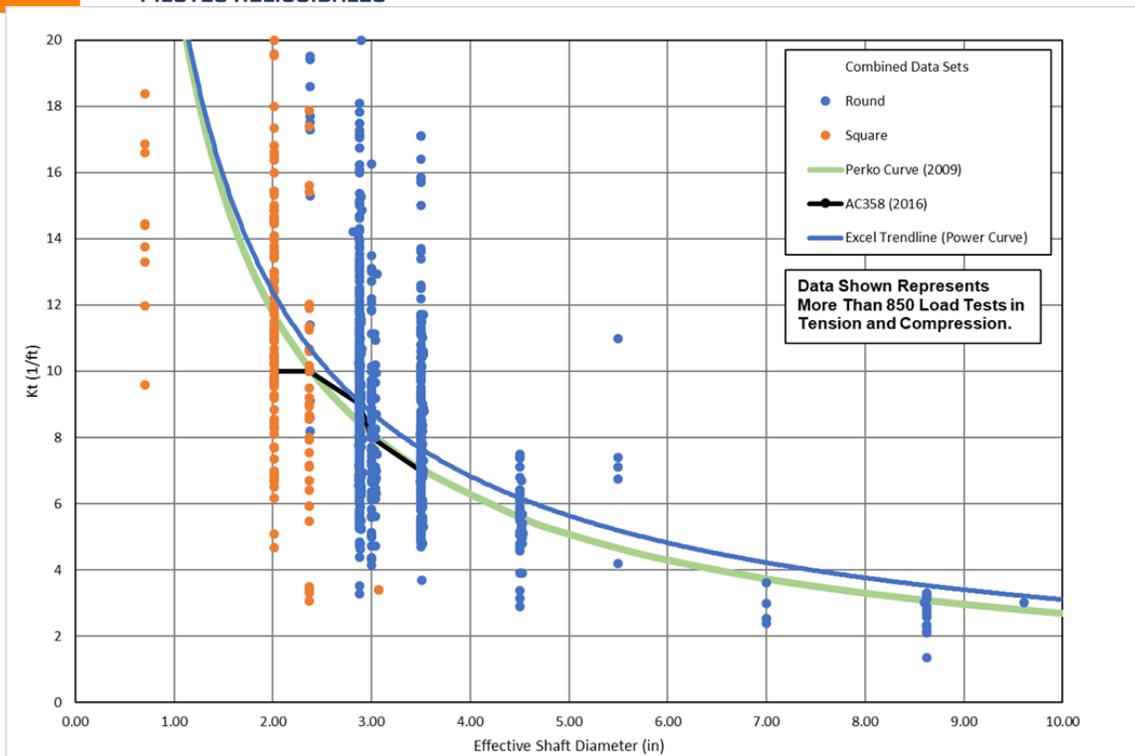


FIGURA 17 RELACIÓN ENTRE EL FACTOR DE CORRELACIÓN CAPACIDAD-PAR (KT) Y EL DIÁMETRO EFECTIVO DEL EJE (COMPILACIÓN DE CTL|THOMPSON, 2016).

Como se puede observar en la figura, la relación varía. Numerosos factores afectan el torque de instalación, como el tipo y las condiciones del suelo, la habilidad del operador, la velocidad de avance (aproximadamente un paso por revolución), la presión de empuje, la velocidad de rotación (de 5 a 15 RPM), la precisión de las mediciones de torque, el tamaño del fuste, la forma del fuste del pilote, el número de hélices, el diámetro de las hélices y el paso. De estos factores, el diámetro del fuste es el que parece correlacionarse más significativamente con la relación capacidad/torque (Hoyt y Clemence, 1989). Los valores de Kt son ligeramente superiores en compresión que en tensión. En promedio, los valores de Kt son un 10 % superiores en compresión que en tensión (Perko, 2009).

En ciertas condiciones, la relación capacidad/torque se vuelve menos precisa. Estas pueden incluir:

- Pilotes helicoidales instalados sobre lecho de roca dura.
- Los diámetros de fuste más grandes dependen más de la fricción del fuste para determinar la capacidad; en algunos suelos, la capacidad de fricción del fuste puede aumentar después de la instalación.
- Instalaciones superficiales donde el torque es relativamente bajo.
- Instalaciones de pilotes helicoidales inyectados.

Cuando no se dispone de la relación capacidad-torque, se han utilizado ensayos dinámicos de pilotes según la norma ASTM D4945 para verificar la capacidad de los pilotes helicoidales siguiendo los métodos de alta deformación de múltiples impactos descritos por



White et al., 2013. La ventaja de este método es que resulta más rápido y, por lo general, menos costoso probar un gran número de pilotes helicoidales para su aceptación o para establecer la confiabilidad, en comparación con los ensayos de carga estática a escala real.

El siguiente ejemplo ilustra el uso de una correlación $Q_t = K_t T$.

- La capacidad admisible deseada de los pilotes helicoidales para soportar una estructura específica es de 20.000 lb ($Q_a = 20.000$ lb).
- El terreno se encuentra en una ubicación y unidad de suelo donde se han instalado y probado anteriormente numerosos pilotes helicoidales de pequeño diámetro. Se utiliza un factor de seguridad de 2.
- La capacidad última requerida del pilote instalado es $Q_u = Q_a \times FS = 20.000 \text{ lb} \times 2 = 40.000 \text{ lb}$.
- Los cálculos geotécnicos preliminares sugieren que una sola hélice de 25 cm de diámetro empotrada en el material de apoyo a profundidad puede proporcionar la Q_u requerida.
- El diseñador de pilotes estima que los pilotes del proveedor local, con un fuste de 76 cm de diámetro, tendrán suficiente resistencia estructural para soportar la carga última y resistir el torque requerido para la instalación. Para un fuste de 3 pulgadas, el K_t de la Figura 17 es de 8 pies-1. Por lo tanto, el par de instalación mínimo requerido y la capacidad estructural del pilote son: $T = Q_u / K_t = 40.000 \text{ lb} / 8 \text{ pies-1} = 5.000 \text{ pies-lb}$.

El diseñador verifica que las conexiones seleccionadas entre el pilote y la sección tengan suficiente capacidad estructural para resistir el par de instalación mínimo y que el cabezal de hincado seleccionado pueda proporcionar dicho par (sin sobredimensionarlo innecesariamente).

Los criterios de instalación incluyen atornillar los pilotes hasta que el par sostenido sea de 5.000 pies-lb.

Para cargas mayores y en geologías donde la experiencia con pilotes helicoidales es limitada, se recomienda el uso de factores de seguridad más altos o pruebas de carga para desarrollar correlaciones de torque específicas para cada sitio y producto. Como se puede observar en la Figura 17, se han publicado menos datos para pilotes helicoidales de fuste de mayor diámetro. Por esta razón, las pruebas de carga estáticas específicas del sitio se utilizan a menudo para verificar la capacidad de dichos pilotes. No es raro ver dos o más pruebas de carga estáticas en grandes proyectos de construcción comercial e industrial para verificar el diseño de pilotes helicoidales. Como precaución, el uso de un número reducido de pruebas de carga para establecer relaciones capacidad-torque que superen significativamente los rangos publicados sin justificación no se considera una buena práctica.

Si el ejemplo de correlación de torque anterior fuera para una carga mayor o una unidad de suelo sin historial de pruebas de pilotes helicoidales, el diseño preliminar podría haber utilizado un factor de seguridad de 3 o 4 para la selección inicial del pilote. Si hubiera muchos pilotes, se podrían desarrollar curvas Q_u vs. K_t específicas del sitio a partir de pruebas de carga y reducir el factor de seguridad a 2. Si solo hubiera unos pocos pilotes y se conociera la geología lo suficiente como para descartar capas compresibles o muy débiles debajo de la punta del pilote, el diseño podría basarse en el uso de un factor de seguridad alto, como 3 o 4, para desarrollar criterios de instalación.

El siguiente ejemplo ilustra el uso de una correlación $Q_t = K_t T$ con un factor de seguridad más alto.





- La capacidad admisible deseada de los pilotes helicoidales para soportar una estructura específica es de 100.000 lb ($Q_a = 100.000 \text{ lb}$).
- El sitio se encuentra en una ubicación remota y la unidad de suelo en la que se trabaja con pilotes helicoidales es limitada. Solo se necesitan unos pocos pilotes, por lo que una prueba de carga no es práctica. Se utiliza un factor de seguridad de 3.
- La capacidad última requerida del pilote instalado es $Q_u = Q_a \times FS = 100.000 \text{ lb} \times 3 = 300.000 \text{ lb}$.
- Los cálculos geotécnicos preliminares sugieren que una sola hélice de 18 pulgadas de diámetro empotrada en el material de apoyo a profundidad puede proporcionar la Q_u requerida.
- El diseñador de pilotes estima que los pilotes del proveedor local, con un fuste de 7 pulgadas de diámetro, tendrán suficiente resistencia estructural para soportar la carga última y resistir el torque requerido para la instalación. Para un fuste de 7 pulgadas, el K_t de la Figura 17 es de 4 pies-1. Por lo tanto, el par de instalación mínimo requerido y la capacidad estructural del pilote son: $T = Q_u / K_t = 300.000 \text{ lb} / 4 \text{ pies-1} = 75.000 \text{ pies-lb}$.

El diseñador verifica que las conexiones del pilote y la sección seleccionadas tengan suficiente capacidad estructural para resistir el par de instalación mínimo y que el cabezal de hincado seleccionado pueda proporcionar dicho par (pero no innecesariamente).

Los criterios de instalación incluyen atornillar los pilotes hasta que el par sostenido sea de 75.000 pies-lb.

5.2 DESPLAZAMIENTO VERTICAL

El desplazamiento vertical de la cabeza de un pilote helicoidal puede incluir hasta cuatro componentes:

1. Deformación elástica del material del pilote.
2. Movimiento necesario para movilizar la resistencia del suelo (fricción y apoyo).
3. Asentamiento del suelo bajo el plano neutro.
4. Creep (fluencia) del suelo con el tiempo.

Estos cuatro componentes, así como el desplazamiento de los grupos de pilotes helicoidales y las deformaciones medidas durante las pruebas de carga estática, se analizan en las subsecciones siguientes. Se puede encontrar más información sobre el desplazamiento vertical de los pilotes helicoidales en las publicaciones de Cherry y Perko (2013) y Konstantakos y Perlow (2014), que incluyen bases de datos de respuesta al desplazamiento. Konstantakos y Perlow (2014, 2015) presentan un método único para predecir la respuesta al desplazamiento de los pilotes helicoidales.

5.2.1 DEFORMACIÓN ELÁSTICA

La deformación elástica del material del pilote se analiza en la Sección 6.1.8.

5.2.2 DESPLAZAMIENTO DE PILOTES PARA MOVILIZAR RESISTENCIA DEL SUELO

Al igual que en otras cimentaciones profundas, el movimiento del pilote para movilizar la resistencia del suelo difiere según la fricción del fuste y el apoyo en los extremos, o en el caso de un pilote helicoidal, el apoyo en las placas. Las pruebas de carga estáticas del pilote son el método más fiable para determinar el movimiento de la cabeza del pilote necesario para movilizar la resistencia del suelo bajo diversas cargas. Desafortunadamente, debido a la dificultad de instrumentar pilotes helicoidales de diámetro pequeño, no existen suficientes datos para estimar el comportamiento de la carga frente a la deflexión, en particular la contribución relativa de la fricción del fuste frente al





apoyo en las placas o en los extremos, como sí ocurre con los pilotes hincados y los pilotes perforados. Sin embargo, en ausencia de relaciones carga-deflexión específicas para pilotes helicoidales, se pueden aplicar los métodos utilizados para estimar las deflexiones de un pilote hincado. Generalmente, se considera que este movimiento ocurre relativamente rápido después de la aplicación de la carga, a diferencia de la consolidación del suelo y la fluencia.

Las siguientes subsecciones muestran cómo calcular el desplazamiento del pilote. La fricción del fuste, si está presente, suele movilizarse primero, seguida del apoyo en las placas. Sin embargo, ambos factores no son acumulativos. El desplazamiento máximo para movilizar la resistencia del suelo es el desplazamiento necesario para movilizar completamente la placa de apoyo.

5.2.2.1 DESPLAZAMIENTO PARA MOVILIZAR LA PLACA DE CARGA

El desplazamiento de una placa helicoidal para movilizar la resistencia total de la placa se puede calcular mediante ecuaciones para el asentamiento de la punta del pilote. Una de estas ecuaciones (Das, 1990) es:

$$s_t = q_{wp} D (1 - \mu^2) I_{wp} / E_s$$

donde, s_t

s_t = desplazamiento del pilote helicoidal causado por la carga soportada en la(s) placa(s) helicoidal(es).

q_{wp} = Carga puntual por unidad de área basada en la carga soportada por la placa helicoidal. Diámetro de la placa helicoidal.

μ = coeficiente de Poisson del suelo.

I_{wp} = factor de influencia (véase Das, 1990).

E_s = módulo de Young del suelo.

Para muchos pilotes helicoidales de diámetro pequeño, el diámetro del fuste es tan pequeño en relación con el diámetro de la placa que los cálculos de desplazamiento se pueden realizar suponiendo que toda la carga aplicada se aplica a la(s) placa(s) helicoidal(es) y que ninguna se distribuye por fricción a lo largo del fuste.

5.2.2.2 DESPLAZAMIENTO PARA MOVILIZAR LA FRICCIÓN DEL EJE

Para fustes de mayor diámetro y en pilotes de hélice múltiple que utilizan el modelo de corte cilíndrico, parte de la carga total aplicada se sustenta en la fricción del fuste. En ese caso, la carga total se distribuiría entre dos componentes: apoyo en el extremo y fricción del fuste. La ecuación anterior (Ecuación 11) se utilizaría para estimar el desplazamiento de la placa de apoyo para movilizar completamente la resistencia de la placa, y la siguiente ecuación puede utilizarse para estimar el desplazamiento promedio del fuste para movilizar completamente la fricción del fuste (Das, 1990):

$$s_s = (Q_{ws} / pL) * (D_s / E_s) * (1 - \mu^2) I_{ws}$$

donde,

s_s = asentamiento del pilote debido a la carga soportada por el fuste.





Q_{ws} = carga soportada por fricción superficial.

p = perímetro del pilote.

L = longitud del pilote que proporciona resistencia.

D_s = diámetro del fuste.

E_s = módulo elástico del suelo.

μ_s = coeficiente de Poisson del suelo. I_{ws} = factor de influencia (véase Das, 1990).

5.2.3 DESPLAZAMIENTO DEL PLANO NEUTRO

Un pilote o grupo de pilotes puede desplazarse a medida que el suelo bajo el plano neutro experimenta compresión elástica o consolidación. El plano neutro es la profundidad donde no hay desplazamiento relativo entre el pilote y el suelo, o (en caso de carga de compresión) donde la suma de la carga muerta sobre la cabeza del pilote y la carga de arrastre es igual a la suma ascendente de la fricción del fuste y el apoyo en los extremos. Véase Fellenius (2014) u otros textos sobre cimentaciones profundas para obtener información más detallada sobre el método del plano neutro en general. Para la mayoría de los pilotes de una sola hélice, el plano neutro se encuentra en la hélice o muy cerca de ella. Para pilotes de múltiples hélices en un suelo uniforme, a menudo se puede suponer que el plano neutro se ubica en el punto 2/3 medido desde la parte superior del cilindro equivalente formado por hélices con una separación no mayor que aproximadamente 3D; esta simplificación supone que la fricción del fuste a lo largo del fuste de acero sobre la hélice superior es muy pequeña en relación con la fricción del cilindro equivalente de múltiples hélices y el apoyo de la placa de la hélice inferior.

El desplazamiento (comúnmente conocido como asentamiento) del plano neutro de un grupo de pilotes helicoidales puede determinarse mediante los mismos métodos empleados para grupos de pilotes hincados, calculando el asentamiento de una zapata equivalente con un área de huella igual al área del encepado del pilote colocado a la profundidad del plano neutro. También existen programas comerciales para determinar la ubicación del plano neutro.

5.2.4 CREEP

El término fluencia, tal como se utiliza en esta guía, describe la compresión del suelo que se produce con el tiempo sin un aumento de la tensión efectiva. El término "fluencia" no está bien definido en la industria y, en ocasiones, se considera el movimiento del pilote con respecto al suelo circundante debido a la relajación de tensiones, la consolidación localizada o la compresión secundaria localizada del suelo que se produce con el tiempo. Algunos profesionales incluyen la consolidación del suelo debido a la disipación de agua intersticial en arcillas y limos como parte de la fluencia, por lo que los diseñadores deben comprender la mecánica del cambio de la tensión efectiva y procurar la claridad al utilizar este término.

La fluencia puede ser un componente importante del desplazamiento del pilote en casos especiales, como en suelos orgánicos, residuos municipales, suelos congelados o arcillas de alta plasticidad normalmente consolidadas.

Si la fluencia a largo plazo es un problema, se debe considerar un programa de exploración del subsuelo que incluya pruebas de consolidación del material a lo largo y muy por debajo de la punta del pilote, junto con un programa de pruebas de carga que proporcione períodos de retención más largos. Algunas pruebas de carga tienen períodos de retención que suelen oscilar entre 10 y 60





minutos. Sin embargo, se han utilizado períodos de retención de varios días o meses para los casos especiales de fluencia real del suelo mencionados anteriormente. La clave reside en considerar las características del depósito de suelo y su profundidad en relación con los elementos portantes del pilote helicoidal, en lugar de aplicar períodos de retención prolongados en cada prueba de carga.

5.2.5 ASENTAMIENTO DE GRUPOS DE PILOTES

Cuando se utilizan pilotes en grupo con espaciamientos cortos (menos de $3D$ entre centros, donde D es el diámetro de la hélice de mayor tamaño), los esfuerzos de los pilotes individuales interactúan, de modo que la carga aplicada a un pilote provoca el desplazamiento de otros pilotes cercanos. Esta interacción incrementa el asentamiento total del grupo de pilotes y redistribuye las cargas entre los pilotes individuales.

Cabe señalar que los estudios sobre el efecto de grupo en pilotes helicoidales con múltiples hélices son limitados. Por lo tanto, en ausencia de estudios integrales y datos de prueba publicados, se sugiere aplicar el mismo principio utilizado para pilotes de punta (end bearing).

El método del plano neutro puede emplearse para calcular el asentamiento de un grupo de pilotes. También existen varios programas de cómputo disponibles para evaluar el asentamiento de grupos de pilotes cercanamente espaciados.

5.2.6 DEFORMACIONES MEDIDAS DURANTE PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA

La Figura 18 presenta un ejemplo típico de desplazamiento en la cabeza de un pilote helicoidal bajo carga axial de compresión. Las deformaciones medidas representan una combinación de:

la compresión elástica del material del pilote,

y la deformación necesaria para movilizar la resistencia del suelo.

Si los suelos por debajo del plano neutro son no cohesivos, el movimiento del pilote durante una prueba de carga también puede incluir el asentamiento del plano neutro, aunque normalmente será pequeño. Este desplazamiento también puede afectar el suelo sobre el que se apoya la viga de referencia (desde donde se registran los valores de desplazamiento).

Por lo general, una prueba estática no aplica carga durante el tiempo suficiente como para que ocurran asentamientos por consolidación significativos (como sucede en suelos cohesivos), tanto por encima como por debajo del plano neutro.

El creep (fluencia) puede medirse mediante una prueba de carga estática, pero los períodos de retención de carga deben ser diseñados específicamente para ese propósito.

Como en otros tipos de cimentaciones profundas, la capacidad geotécnica última de los pilotes helicoidales generalmente no se alcanza en las pruebas estáticas realizadas en pilotes de producción, ya que esta se manifiesta con desplazamientos muy grandes. En cambio, la capacidad de diseño de un pilote helicoidal se define por un criterio de aceptación, según el código de construcción aplicable o según los desplazamientos admisibles definidos por los diseñadores estructurales o mecánicos de la estructura que se está soportando.



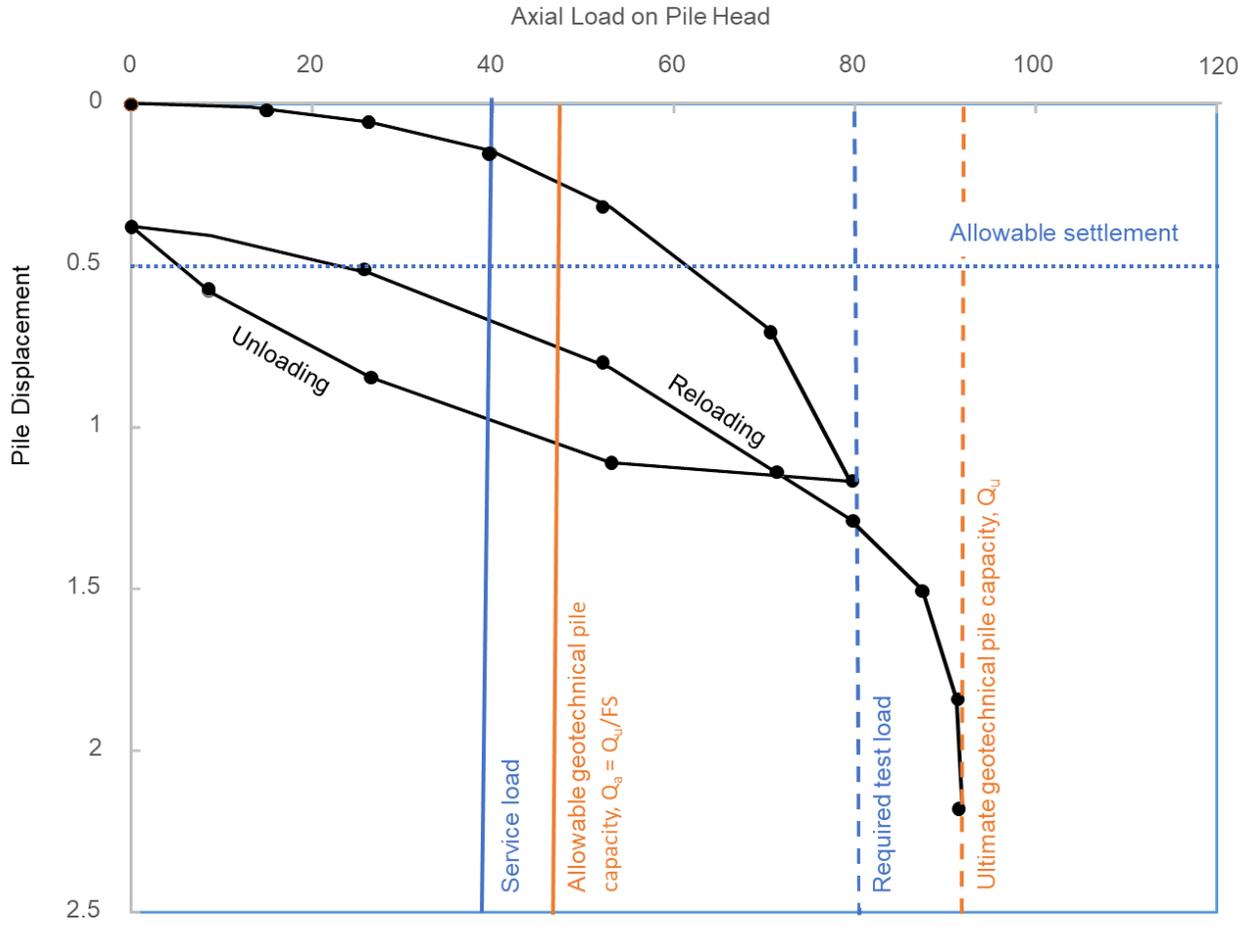




FIGURA 18 RESPUESTA TÍPICA DE DESPLAZAMIENTO EN CABEZA DE PILOTE HELICOIDAL BAJO CARGA AXIAL DE COMPRESIÓN.

Cuando se aplica carga axial a un pilote helicoidal, la carga se transfiere primero al fuste del pilote, donde ocurre un acortamiento elástico y una distribución hacia el suelo circundante. La carga transferida al suelo por fricción del fuste variará dependiendo de la forma y diámetro del fuste.

Por ejemplo:

En pilotes con eje cuadrado, la rotación durante la instalación puede crear un espacio alrededor del fuste, reduciendo o eliminando la fricción.

Del mismo modo, el movimiento de acoples grandes puede crear un espacio (ver Figura 15).

En muchos casos, la fricción del fuste se ignora para pilotes de pequeño diámetro o con ejes cuadrados.

La carga restante se transfiere a través del fuste hacia la(s) placa(s) helicoidal(es) y luego al suelo circundante. En pilotes con múltiples hélices, cuando las cargas o desplazamientos son pequeños, no hay interacción significativa entre hélices sucesivas, y el pilote actúa como si cada placa trabajara individualmente. Sin embargo, a medida que aumenta la carga, si las hélices están suficientemente próximas para que se forme un modelo de corte cilíndrico, la respuesta en desplazamiento estará controlada por la fricción del suelo confinado entre las placas helicoidales.

5.3 ANÁLISIS LATERAL

5.3.1 COMPORTAMIENTO Y LIMITACIONES DE LOS PILOTES HELICOIDALES BAJO CARGAS LATERALES

El diseño de una cimentación con pilotes helicoidales sometida a cargas laterales debe considerar los desplazamientos laterales admisibles bajo las cargas de servicio. En muchos casos, la capacidad lateral de un pilote depende principalmente del tipo de suelo en los 8 a 12 diámetros del fuste superiores del perfil del suelo.

Si se usa un pilote vertical para resistir carga lateral, es crucial que cualquier hueco que se forme entre el suelo y el pilote durante la instalación sea rellenado adecuadamente, para asegurar un buen contacto. De lo contrario, la capacidad lateral se reducirá significativamente.

En suelos orgánicos o muy blandos, la profundidad efectiva del pilote (desde el punto de aplicación de la carga hasta suelos firmes) puede ser mucho mayor que los 8 a 12 diámetros, dependiendo de la estratigrafía del suelo.

Las cargas laterales también pueden ser resistidas usando pilotes inclinados (battered piles). Los pilotes helicoidales con ángulos de inclinación de hasta 45° son comunes en aplicaciones con grandes cargas laterales, como anclajes de empuje para tuberías. También son comunes en anclajes para estructuras con cables de tensión (guyed anchors).





FIGURA 19 CIMENTACIÓN CON UNA COMBINACIÓN DE PILOTES HELICOIDALES VERTICALES E INCLINADOS.

5.3.2 ANÁLISIS INDIVIDUAL DEL PILOTE

El análisis de un pilote vertical sometido a carga lateral es un problema clásico de interacción suelo-estructura, como se muestra esquemáticamente en la Figura 20.

Cuando se aplica la carga lateral, el pilote se deforma, y en consecuencia, se moviliza la resistencia del suelo, incluyendo:

- la resistencia por esfuerzos normales (presión pasiva),
- y la fricción lateral entre el suelo y el fuste del pilote.

La resistencia total del suelo, p , depende de la deformación lateral del pilote, y .

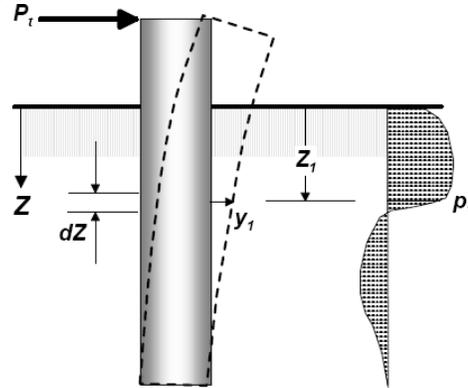


FIGURA 20 PILOTE VERTICAL ÚNICO SOMETIDO A CARGA LATERAL.

5.3.3 MÉTODOS ANALÍTICOS

Desde la perspectiva del diseño del pilote, las dos principales preocupaciones relativas a la carga lateral son el margen de seguridad del pilote frente a la falla y la deflexión lateral en la parte superior del pilote o en la superestructura soportada por el mismo. Para condiciones de carga estática o pseudoestática, se utilizan ampliamente dos tipos de métodos de análisis: métodos de capacidad lateral última (Brinch-Hansen, 1961; Broms, 1964a, 1964b; Yang, 2006) y métodos de deflexión (Reese y Matlock, 1956; Matlock, 1970; y Reese et al., 1975; entre otros). Estos métodos de diseño/análisis se discuten en las *Directrices de Diseño y Ensayo para Cargas Sísmicas y Laterales* del DFI (2012). Las opciones de software también se enumeran en ese documento. Las subsecciones siguientes discuten métodos de ejemplo para estimar la capacidad lateral última y la deflexión lateral.

5.3.3.1 MÉTODO DE CAPACIDAD ÚLTIMA (MÉTODO DE BROMS)

La resistencia lateral última del suelo al fallar puede estimarse simplemente como resistencia pasiva del suelo, como lo propone el método de Broms. Broms utilizó el enfoque de equilibrio límite para derivar soluciones para estimar la carga lateral última al fallar y el correspondiente momento flector máximo y esfuerzo cortante en un pilote. Este método considera tanto el rendimiento del pilote como la falla del suelo (falla por resistencia pasiva). También puede estimar el momento máximo y el esfuerzo cortante en el pilote, que pueden usarse para el diseño estructural del mismo.

El método de Broms asume dimensiones y propiedades uniformes del pilote, así como un perfil de suelo cohesivo o no cohesivo uniforme. Para perfiles de suelo estratificados, pueden utilizarse parámetros promedio del suelo ponderados por espesor para representar un perfil uniforme. Este método no es adecuado para materiales $c-\phi$ o una mezcla de depósitos de arcilla y arena.

5.3.3.2 MÉTODO DE DEFLEXIÓN (MÉTODO P-Y)

El método p-y es un modelo de deflexión comúnmente utilizado que representa la respuesta no lineal del suelo utilizando una solución por diferencias finitas. La respuesta no lineal del suelo se caracteriza mediante curvas p-y no lineales. La Figura 21 muestra el sistema suelo-pilote utilizado en el análisis p-y.



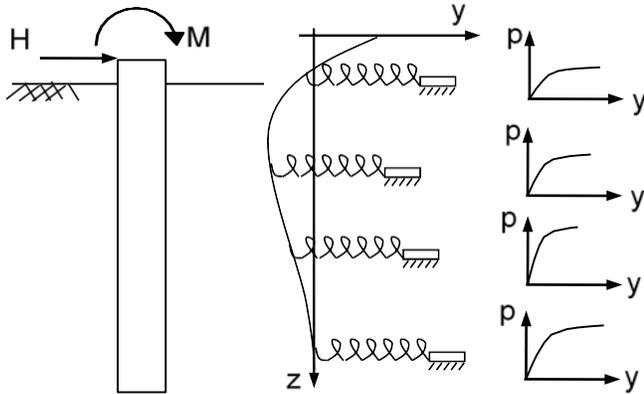


FIGURA 21 MODELOS DE PILOTE Y SUELO DEL ANÁLISIS P-Y.

Generalmente se requieren programas de cómputo para realizar un análisis p-y basado en soluciones por diferencias finitas.

Nota: En la industria de pilotes helicoidales se considera comúnmente que el comportamiento lateral de pilotes de pequeño diámetro no se modela con precisión utilizando el análisis p-y. Varios conjuntos de datos han mostrado que el análisis p-y sobreestima la magnitud de la deflexión lateral de los pilotes helicoidales. Dado que el análisis p-y es la base de muchas aplicaciones de software, se recomienda al diseñador interpretar los resultados con respecto a los resultados reales. Si el desempeño lateral es crítico para el diseño, se deben realizar pruebas de carga en campo para confirmar que la deflexión real cumpla con las especificaciones.

5.4 COMPORTAMIENTO SÍSMICO

Ensayos sísmicos a escala real de pilotes helicoidales se llevaron a cabo en 2016 en la mesa vibradora de la Universidad de California – San Diego. Se realizaron varias simulaciones diferentes, incluyendo los eventos sísmicos de Northridge y Takatori. Se instalaron diversas configuraciones de pilotes helicoidales dentro de la caja de prueba, incluyendo pilotes con eje cuadrado y redondo de varios diámetros.

El análisis de datos de estas pruebas ha proporcionado las siguientes observaciones:

- Las deflexiones de pilotes helicoidales a un nivel inferior a 15D (D = diámetro del eje) son relativamente insignificantes.
- Debido a que los acoples suelen encontrarse a más de 15D por debajo de la superficie del terreno, el efecto de los acoples en la capacidad lateral puede, a menudo, ser despreciado.
- El coeficiente de amortiguamiento de pilotes helicoidales en grupo excede el coeficiente de amortiguamiento de pilotes individuales.
- Los grupos de pilotes helicoidales con conexiones de cabeza fijas tienen menor capacidad de amortiguamiento que los grupos con conexiones de cabeza articuladas.
- La geometría del eje (cuadrado versus redondo) no mostró diferencias notables en capacidad.
- Un pilote con una segunda placa portante helicoidal en la sección de avance no mostró una diferencia significativa en desempeño respecto a uno con una sola hélice.



Se remite al lector a numerosos documentos publicados sobre estos estudios (Cerato et al., 2017; Elsayy et al., 2017 y 2019).

5.5 FACTORES QUE AFECTAN LA CAPACIDAD

Un número de factores pueden afectar la capacidad, incluyendo la resistencia por punta en estratos estratificados, efectos de grupo, condiciones de hinchamiento y carga negativa. Estos se discuten en las siguientes subsecciones.

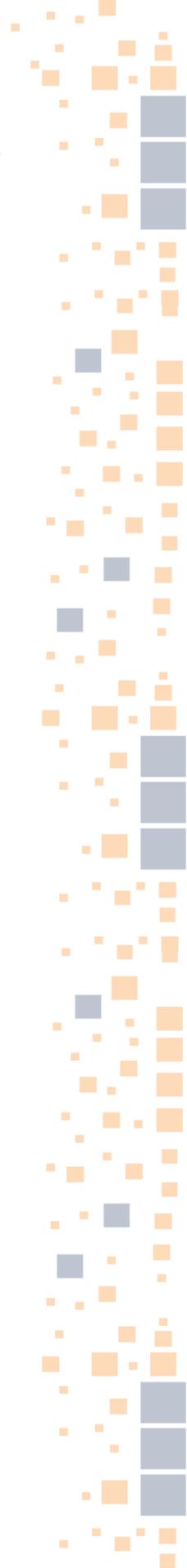
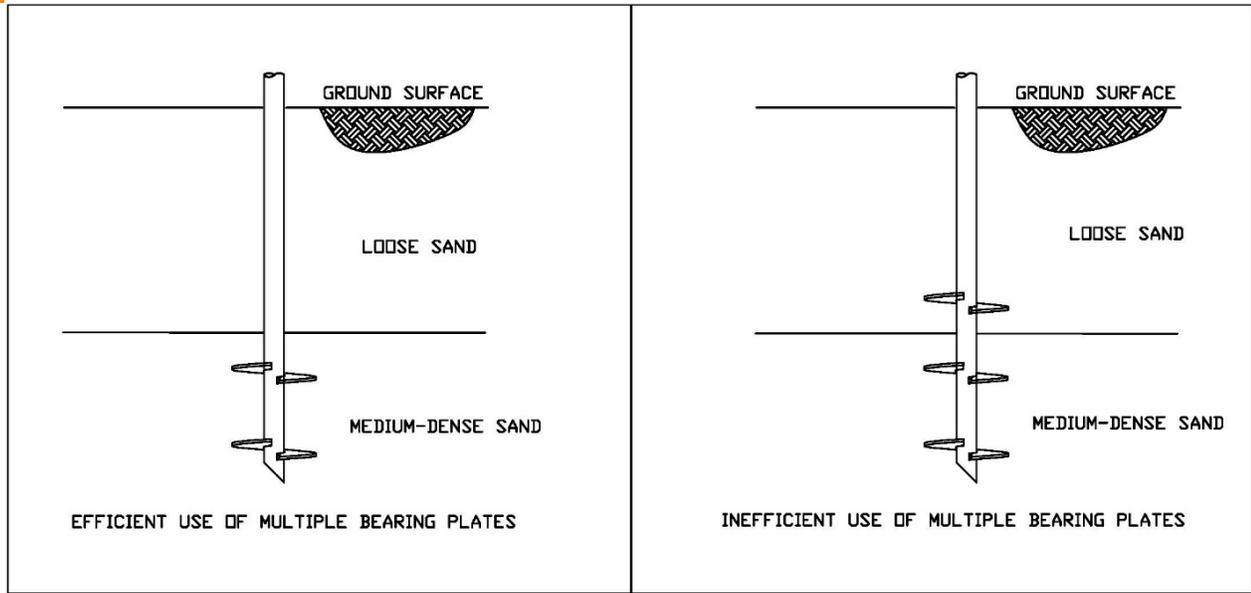
5.5.1 RESISTENCIA POR PUNTA EN ESTRATOS ESTRATIFICADOS

Si los pilotes helicoidales están diseñados principalmente para soporte por placa helicoidal en estratos estratificados, y una capa subyacente es más débil que la capa superior para cargas en compresión axial, el efecto de la capa más débil sobre el soporte por placa debe ser considerado. En general, el efecto de la capa débil puede ser ignorado cuando la distancia entre la placa helicoidal inferior y la base de la capa más fuerte es mayor a aproximadamente tres diámetros de placa helicoidal. En carga de levantamiento, el efecto de la capa más débil puede ser ignorado cuando la distancia entre la placa helicoidal superior y la parte superior de la capa más fuerte es mayor a tres diámetros de placa helicoidal. Para placas helicoidales de pequeño diámetro, debe aplicarse criterio al usar el criterio de 3D. Por ejemplo, una placa helicoidal de 8 pulgadas de diámetro altamente cargada puede estar justo a 24 pulgadas por encima de la capa teóricamente blanda y puede "perforar" la capa de suelo más rígido. La variabilidad en las profundidades de los estratos debe ser cuidadosamente considerada.

Cuando la distancia a la capa más débil es menor a tres diámetros de placa helicoidal, se deben usar pruebas de carga para desarrollar relaciones entre la resistencia del pilote y la profundidad de empotramiento dentro del suelo más fuerte. También deben considerarse perforaciones exploratorias geotécnicas adicionales en suelos estratificados donde suelos más débiles podrían subyacer a suelos más fuertes.

Los pilotes con múltiples placas portantes helicoidales deben usarse con precaución en suelos estratificados con propiedades de ingeniería marcadamente diferentes (Figura 22). Debido a la incompatibilidad de deformaciones, la carga tenderá a aplicarse mayormente al material más denso o duro primero, con poca carga distribuida a través de las placas helicoidales en el material más débil. Por lo tanto, la capacidad debe ser ignorada o significativamente reducida para las placas helicoidales en los suelos más blandos.





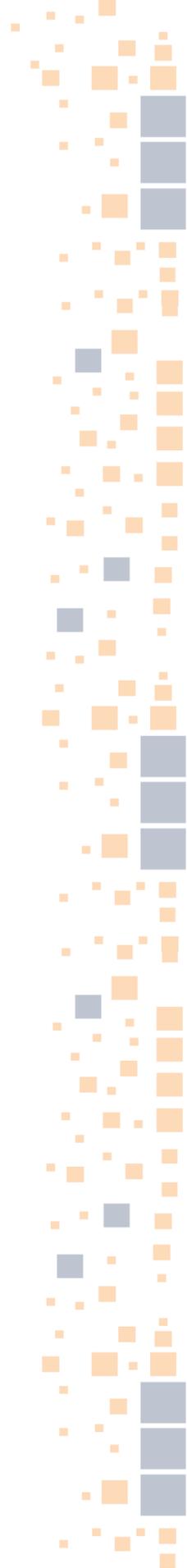


5.5.2 EFECTOS DE GRUPO

Una vez que se determina la capacidad del anclaje/pilote helicoidal, es importante revisar la ubicación del elemento de cimentación con respecto a la estructura y a otros anclajes/pilotes helicoidales. Si el espaciamiento centro a centro entre elementos portantes de pilotes/aditamentos adyacentes es menor a 5 veces el diámetro del elemento, entonces debe considerarse una reducción por efectos de grupo. Típicamente, el espaciamiento mínimo recomendado entre pilotes helicoidales verticales es de 2.5 a 3 veces el diámetro de la hélice más grande. Para pilotes inclinados alejándose unos de otros en un grupo, el espaciamiento entre las placas helicoidales será mayor que el espaciamiento entre las cabezas de los pilotes. Por lo tanto, el espaciamiento de pilotes debe medirse con base en la distancia entre las placas helicoidales y no en las cabezas de los pilotes.

El factor de reducción de grupo se basa en el diámetro y el espaciamiento de cada elemento a lo largo de la profundidad del pilote. Los factores de reducción para efectos de grupo aplicados a la fricción del fuste y al soporte por placa helicoidal pueden ser diferentes. Para pilotes en grupo, el factor de reducción para el diámetro del fuste debe aplicarse a la fricción del fuste, y el factor de reducción para el diámetro de la hélice debe aplicarse al soporte por placa y considerar el espaciamiento entre los elementos portantes asociados.

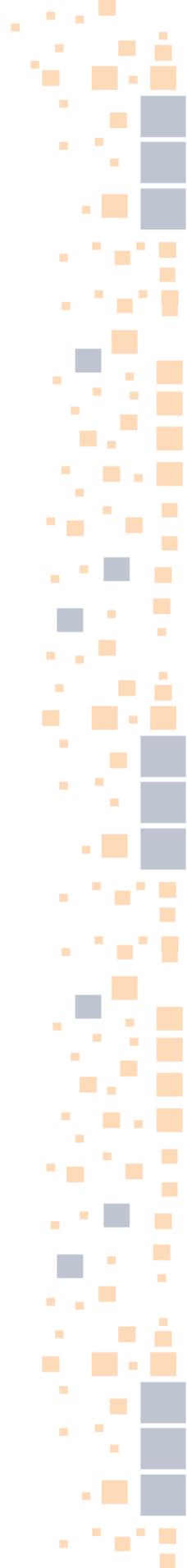
En ausencia de relaciones específicas desarrolladas mediante pruebas, las reducciones recomendadas en la resistencia de pilotes individuales debido a efectos de grupo deben ser similares a aquellas comúnmente utilizadas para pilotes hincados, como los factores AASHTO que se muestran a continuación en la Tabla 2. La Figura 23 representa la dirección de carga y el espaciamiento para los efectos de grupo en cargas laterales. La Tabla 3 lista los multiplicadores P de pilotes, P_m , para espaciamientos de múltiples hileras.





HELICAL[®]
PILOTES HELICOIDALES

TABLA 2 REDUCCIONES RECOMENDADAS EN LA RESISTENCIA DE PILOTES INDIVIDUALES DEBIDO A EFECTOS DE GRUPO (SEGÚN AASHTO, 2012).





Componente de Resistencia del Pilote	Ajuste Recomendado de Resistencia	Comentarios
Soporte por hélice de pilotes individuales dentro del grupo en compresión axial y levantamiento	Aplicar un factor de eficiencia , η , a la resistencia determinada para un solo pilote. $\eta = 0.65$ para espaciamiento entre pilotes de 2.5 diámetros de hélice $\eta = 1.0$ para espaciamiento entre pilotes de 5 diámetros de hélice	Considera zonas superpuestas de deformación por corte
Resistencia del fuste de pilotes individuales dentro del grupo en compresión axial y levantamiento	Aplicar un factor de eficiencia , η , a la resistencia determinada para un solo pilote. $\eta = 0.65$ para espaciamiento entre pilotes de 2.5 diámetros de fuste $\eta = 1.0$ para espaciamiento entre pilotes de 5 diámetros de fuste	Considera zonas superpuestas de deformación por corte
Resistencia del grupo de pilotes en compresión axial	No mayor a la resistencia combinada de un pilar equivalente compuesto por: <ul style="list-style-type: none">• El bloque de suelo delimitado por los pilotes para suelo cohesivo	
Resistencia del grupo de pilotes en levantamiento	No mayor a la resistencia combinada de un pilar equivalente compuesto por: <ul style="list-style-type: none">• El bloque de suelo delimitado por los pilotes para suelo cohesivo• Un bloque de suelo delimitado por los perímetros de las hélices en la base del grupo y que se extiende hacia arriba	
Resistencia lateral de pilotes	Para el método de análisis p-y, multiplicar los valores p por multiplicadores P , los cuales dependen del espaciamiento de los pilotes como múltiplo del diámetro equivalente del pilote, d . • Para pilotes con una sola hélice, el diámetro equivalente es el del fuste. • Para pilotes con múltiples hélices (espaciadas a menos de aproximadamente 3 diámetros de hélice entre sí y presentes dentro de unos 7 diámetros desde la superficie del terreno), el diámetro equivalente es el del cilindro definido por las hélices.	Ver Tabla 10.7.2.4-1 y Figura 10.7.2.4-1 de AASHTO

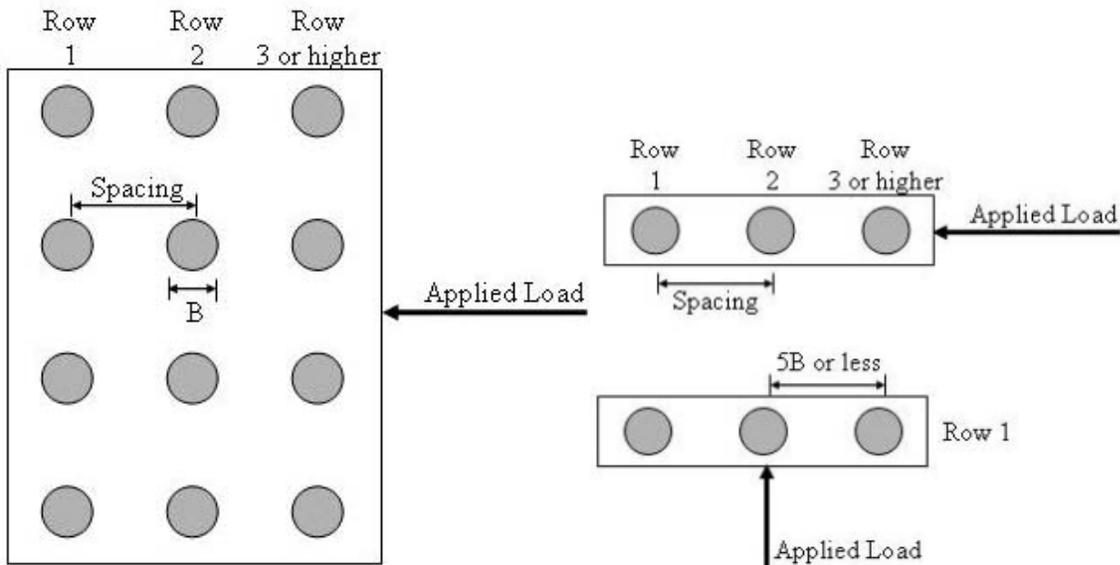


FIGURA 23. DEFINICIONES DE DIRECCIÓN DE CARGA Y ESPACIAMIENTO PARA EFECTOS DE GRUPO EN RESISTENCIA A CARGA LATERAL (SEGÚN AASHTO, 2012).

TABLA 3 MULTIPLICADORES P DE PILOTES, P_m , PARA ESPACIAMIENTO EN MÚLTIPLES HILERAS SOBRE RESISTENCIA LATERAL (PROMEDIO DE HANNIGAN ET AL., 2006) (SEGÚN TABLA 10.7.2.4-1 DE AASHTO, 2012).

Pile <i>CTC</i> spacing (in the direction of loading)	<i>P</i> -Multipliers, P_m		
	Row 1	Row 2	Row 3 and higher
$3B$	0.8	0.4	0.3
$5B$	1.0	0.85	0.7

5.5.3 CONDICIONES DE HINCHAMIENTO (HEAVING CONDITIONS)

La congelación estacional en suelos susceptibles a heladas y la expansión debido a la humectación de suelos arcillosos pueden inducir cargas de levantamiento en los pilotes. En el caso de heladas estacionales, es vital definir la profundidad de penetración de la helada, las cargas de expansión y su distribución con la profundidad. En el caso de suelos expansivos, se debe definir la profundidad de secado y humectación y la distribución de la presión de hinchamiento con la profundidad. El ingeniero geotécnico, en consideración al momento de la construcción de la instalación y sus requisitos de mantenimiento, también debe definir la carga muerta apropiada que puede ser utilizada para resistir el movimiento inducido por heladas o el levantamiento por expansión del suelo. La Figura 24 muestra una instalación típica de pilotes helicoidales en permafrost.



FIGURA 24 INSTALACIÓN DE PILOTES HELICOIDALES A TRAVÉS DE PERMAFROST (IMAGEN CORTESÍA DE AMERICAN PILE DRIVING EQUIPMENT).

El empotramiento del pilote y el dimensionamiento de la placa portante helicoidal deben ser suficientes para resistir el levantamiento si ocurre congelación o expansión (humectación) antes de que se aplique la carga muerta completa. Los pilotes helicoidales deben ser diseñados e instalados de tal manera que la placa helicoidal superior esté por debajo de la máxima profundidad estimada de penetración de heladas o profundidad de humectación, considerada durante la vida útil del servicio de la estructura.

Los criterios de instalación para condiciones de hinchamiento deben incluir siempre una profundidad mínima o empotramiento en una capa resistente. Además, el diseñador debe considerar el torque requerido para penetrar hasta la profundidad deseada. En algunos casos, puede requerirse el uso de ejes más fuertes (de mayor diámetro o material más resistente) para alcanzar la profundidad requerida.

5.5.4 CARGA DE ARRASTRE (FRICCIÓN NEGATIVA)

La carga de arrastre se desarrolla a lo largo de secciones del pilote helicoidal donde el suelo que rodea el fuste del pilote se asienta más que el propio pilote. Las cargas de arrastre con el potencial de inducir grandes desplazamientos del pilote pueden ser inducidas por las siguientes condiciones:

1. Pilotes instalados en rellenos recientes donde el relleno es cohesivo, no está bien compactado en capas delgadas, y se asienta en relación con el pilote.
2. Pilotes instalados a través de suelos compresibles con relleno recientemente colocado sobre ellos, donde no se ha permitido que los suelos se consoliden antes de la instalación del pilote.
3. Después de una licuefacción sísmica, cuando los suelos se reconsolidan a medida que se disipa el exceso de presión de poro.



4. Si el nivel freático se reduce, causando asentamiento del suelo por encima del plano neutro del pilote.
5. Donde los pilotes se instalan a través de material altamente orgánico o residuos que experimentan asentamiento secundario.
6. Donde los pilotes se instalan a través de permafrost rico en hielo que se descongela.

El momento entre la colocación del relleno y la instalación del pilote, los suelos del subsuelo, las condiciones de drenaje y la altura del relleno pueden influir significativamente en las fuerzas estimadas de arrastre.

La carga de arrastre sobre la porción de un pilote helicoidal en suelos que se mueven hacia abajo se calcula de la misma manera que se calcula la resistencia del fuste en la Sección 5.1. Si alguna placa helicoidal se encuentra dentro de un suelo que podría moverse hacia abajo en relación con el fuste del pilote, la fuerza de arrastre descendente puede incluir contribuciones del soporte por placa (calculado como la suma de la resistencia de placas individuales o usando el modelo de corte cilíndrico según corresponda).

No es deseable ubicar placas helicoidales dentro de estratos de suelo que puedan comprimirse o asentarse en relación con el fuste del pilote. Los pilotes helicoidales correctamente diseñados pueden ofrecer ventajas sobre otros tipos de pilotes en estas circunstancias. Siempre que las placas helicoidales estén ubicadas por debajo del material compresible (que induce arrastre), el diámetro relativamente pequeño del fuste desarrollará menos carga de arrastre que un pilote hincado o perforado con un diámetro de punta igual al diámetro de la hélice. En pilotes helicoidales cementados, se puede construir un diámetro de mortero efectivo mínimo a través de capas compresibles y expandirse a un diámetro mucho mayor por debajo de los suelos compresibles.

6. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PILOTE (CAPACIDAD MECÁNICA)

Un pilote helicoidal debe tener tanto suficiente capacidad geotécnica, como se discutió en el Capítulo 5, como capacidad estructural, de aquí en adelante referida como capacidad mecánica, para resistir las cargas aplicadas. El suelo es más débil que los materiales del pilote, por lo tanto, la capacidad geotécnica es con frecuencia menor que la capacidad mecánica y, por lo tanto, controla el diseño. Sin embargo, la capacidad mecánica siempre debe ser verificada. La capacidad mecánica del pilote está típicamente controlada por uno de cuatro elementos: capacidad del fuste, capacidad de la placa portante helicoidal y su conexión, capacidad del acoplamiento/empalme, o capacidad del cabezal del pilote.

6.1 DISEÑO DEL FUSTE

La capacidad mecánica a compresión del fuste del pilote helicoidal debe determinarse como la menor entre la capacidad axial de diseño basada en el área de la sección transversal del fuste, o la carga crítica de pandeo. La capacidad total de diseño podría estar controlada por cargas axiales combinadas con momentos flectores cuando los pilotes experimentan cargas laterales o momentos aplicados en los cabezales.



6.1.1 ANÁLISIS AXIAL

La capacidad axial de un pilote en compresión, cuando no existen problemas de flexión ni de pandeo, puede determinarse a partir de las siguientes ecuaciones generales para pilotes de acero; otras ecuaciones aplicarán para pilotes de acero rellenos con mortero o concreto u otros materiales compuestos:

$$P_{str.all} = \alpha A_s F_y$$

$$P_{str.ult} = \Phi A_s F_y$$

donde:

- $P_{str.all}$ = capacidad mecánica axial admisible del pilote
- $P_{str.ult}$ = capacidad mecánica axial última del pilote
- α =factor de esfuerzo admisible para diseño axial, típicamente tomado como 0.5
- Φ = factor de resistencia última para diseño axial, típicamente tomado como 0.9
- A_s = área de la sección transversal de diseño del fuste (puede incluir pérdidas por corrosión)
- F_y = esfuerzo de fluencia de diseño del material estructural del fuste, posiblemente limitado por los códigos aplicables

La versión 2018 del *International Building Code* (IBC) usa el diseño por factores de resistencia (LRFD) para elementos estructurales y usa el diseño por esfuerzos admisibles (ASD) para elementos geotécnicos. Para pilotes helicoidales, el IBC actualmente usa esfuerzos admisibles, limitando el esfuerzo admisible del acero del fuste a:

$$0.6F_y < 0.5f_u$$

donde:

- f_u = resistencia a la tracción de diseño del material de acero del fuste.
- La capacidad a tracción del fuste está gobernada por la resistencia de la conexión.

6.1.2 ANÁLISIS DE PANDEO

El pandeo del pilote debe ser considerado y puede volverse crítico cuando los pilotes tienen secciones muy delgadas, experimentan cargas de compresión considerables, están instalados en depósitos blandos, o tienen longitudes libres sin arriostrar por encima del terreno. Cuando el pilote está rodeado por suelo, la resistencia lateral proporcionada incluso por suelos muy blandos puede tener un beneficio considerable para evitar fallas por pandeo. Para pilotes helicoidales de pequeño diámetro, se debe considerar el potencial de pandeo. Puede ser apropiado un examen más riguroso del pandeo potencial en suelos muy blandos y blandos, o en la superficie suelo-aire o suelo-agua.

6.1.2.1 ANÁLISIS CRÍTICO DE PANDEO

Una verificación inicial para determinar si el pandeo controla los requerimientos estructurales del pilote puede hacerse mediante un cálculo rápido del **módulo de reacción lateral límite del suelo**,



ELIMIT, recomendado por el *DFI Micropile Committee* (Cadden y Gomez, 2002) y adoptado en la *Guía de Diseño y Construcción de Micropilotes* de la FHWA (Sabatini et al., 2005):

$$E_{LIMIT} = \frac{L_s^4 IE}{(A^2)(\pi^2)}$$

- E= módulo de elasticidad del eje del pilote helicoidal
- I= momento de inercia del eje del pilote helicoidal
- A= área de la sección transversal del eje del pilote helicoidal
- L_s= longitud “no soportada” del eje del pilote helicoidal, asumida como el espesor de la capa de suelo relativamente débil

La solución anterior es para un pilote helicoidal totalmente empotrado en el suelo. Si ELIMIT es menor que el módulo de suelo asumido o medido, E_s, entonces la resistencia geotécnica y estructural del pilote helicoidal controlará la capacidad del mismo, y el pandeo no necesita ser considerado.

La Tabla 4 proporciona valores típicos de E_s para una variedad de suelos. La Tabla 5 proporciona valores típicos de E_s para una variedad de suelos con base en los conteos de golpes del Ensayo de Penetración Estándar (SPT), (N1)₆₀. Los valores (N1)₆₀ incluyen correcciones por presión de confinamiento y eficiencia del martillo. Si ELIMIT es mayor que el módulo de suelo asumido o medido, E_s, entonces se puede usar el método de Broms, o un análisis computacional utilizando métodos de diferencia finita o elemento finito.

TABLA 4 CONSTANTES ELÁSTICAS* DE VARIOS SUELOS SEGÚN EL TIPO DE SUELO (MODIFICADO SEGÚN AASHTO, 2002).

Soil Type	Range of Equivalent Elastic Modulus, kPa (ksf)
Clay	
Soft sensitive	2,400 - 14,400 (50 - 300)
Medium stiff	14,400 - 48,000 (300 - 1,000)
Very stiff	48,000 - 96,000 (1,000 - 2,000)
Loess	14,400 - 57,500 (300 - 1,200)
Silt	1,900 - 19,000 (40 - 400)
Fine sand	
Loose	7,600 - 11,500 (160 - 240)
Medium dense	11,500 - 19,000 (240 - 400)
Dense	19,000 - 29,000 (400 - 600)
Sand	
Loose	9,600 - 29,000 (200 - 600)
Medium dense	29,000 - 96,000 (600 - 1,000)
Dense	96,000 - 76,000 (1,000 - 1,600)
Gravel	
Loose	29,000 - 76,000 (600 - 1,600)
Medium dense	76,000 - 96,000 (1,600 - 2,000)
Dense	96,000 - 192,000 (2,000 - 4,000)





TABLA 5 CONSTANTES ELÁSTICAS DE VARIOS SUELOS EN FUNCIÓN DEL VALOR SPT N (MODIFICADO SEGÚN AASHTO, 2002).

Soil Type	Equivalent Elastic Modulus, kPa (ksf)
Silts, sandy silts, slightly cohesive mixtures	400 (N ₁) ₆₀ (8 (N ₁) ₆₀)
Clean fine to medium sands and slightly silty sands	700 (N ₁) ₆₀ (14 (N ₁) ₆₀)
Coarse sands and sands with little gravel	1.000 (N ₁) ₆₀ (20 (N ₁) ₆₀)
Sandy gravels	1.200 (N ₁) ₆₀ (24 (N ₁) ₆₀)

6.1.2.2 CAPACIDAD DE PANDEO

El pandeo de columnas no arriostradas fue descrito originalmente por **Euler** utilizando la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\pi^2 EI}{(k \cdot l)^2}$$

- P= capacidad última a pandeo
- E= módulo de elasticidad del eje del pilote
- I= momento de inercia del eje del pilote
- k= factor de longitud efectiva, dependiente de las condiciones de apoyo en los extremos, como se ilustra en la Figura 25
- l= longitud no soportada del pilote

Para ejes de acero típicos, puede utilizarse el AISC-360: Specification for Structural Steel Buildings. De acuerdo con AISC, la resistencia al pandeo puede determinarse como sigue:

$$P_n = A_s F_{cr}$$

$$\frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

donde:

- P_n= capacidad nominal a pandeo
- L_c=k·l
- r= radio de giro
- F_y= esfuerzo de fluencia del material estructural del eje

entonces:





$$F_{cr} = (0.658F_e)F_y$$

$$\frac{L_c}{r} > 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

donde:

- F_{cr} = esfuerzo local de pandeo
- F_e = esfuerzo elástico de pandeo

entonces:

$$F_{cr} = 0.877F_e$$

El radio de giro, r , se determina como:

$$r = \frac{d}{\sqrt{3}} \quad \text{para secciones cuadradas macizas,}$$

$$r = 0.5\sqrt{d^2 - d_i^2} \quad \text{para tubos, donde } d \text{ y } d_i \text{ son los diámetros externo e interno, o}$$

$$r = \sqrt{\frac{d_o^2 + d_i^2}{12}} \quad \text{para secciones cuadradas huecas, donde } d_o \text{ y } d_i \text{ son las dimensiones externa e interna.}$$

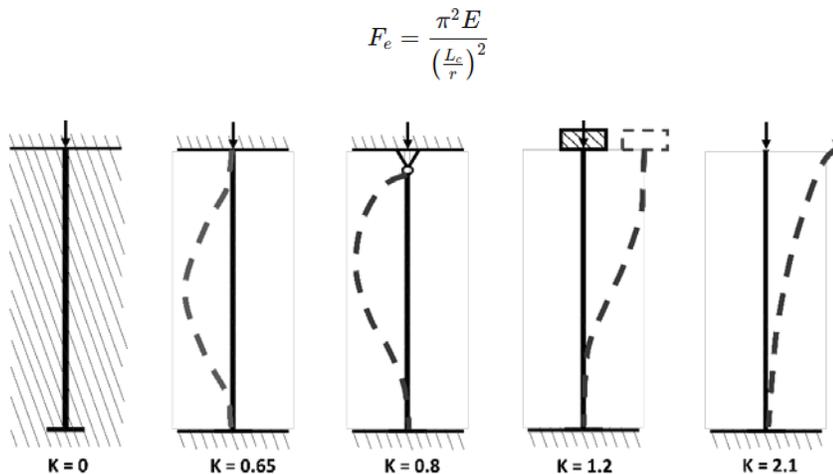


FIGURA 25 FACTORES TÍPICOS DE LONGITUD EFECTIVA PARA EL PANDEO DE PILOTES CON CONDICIONES TEÓRICAS DE APOYO EN LOS EXTREMOS.

Cuando un pilote está empotrado en el suelo, el punto idealizado de empotramiento mostrado en la Figura 25 debe ser modificado para tener en cuenta el movimiento del pilote a través del suelo. Perko (2009) y algunos códigos (por ejemplo, IBC 1808.2) han sugerido algunos enfoques simplificados para modificar la profundidad de empotramiento, considerando la aplicación gradual del empotramiento ofrecido por suelos que varían desde blandos hasta firmes en consistencia (Figura 26).



Cuando el pilote no arriostrado se extiende por encima de suelos blandos, el término de longitud (L) en la ecuación de Euler se incrementa en 10 pies y el extremo inferior se considera fijo. En suelos firmes, la longitud no arriostrada se incrementa en 5 pies.

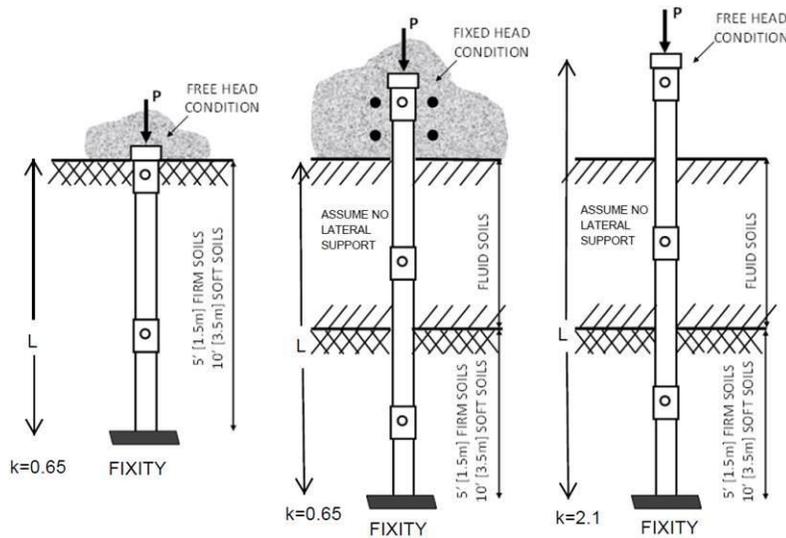


FIGURA 26 LONGITUD NO ARRIOSTRADA PARA PILOTES HELICOIDALES (ADAPTADO Y AMPLIADO DE PERKO, 2009).

6.1.2.3 CONSIDERACIONES ESPECIALES DE PANDEO PARA PILOTES HELICOIDALES

Existen consideraciones adicionales que afectarán el pandeo para pilotes helicoidales. Estas incluyen:

- Propiedades de la sección del pilote: El mortero interno puede aumentar el módulo de elasticidad de la sección compuesta.
- Módulo del suelo: El mortero externo para llenar el espacio anular también puede ayudar a densificar localmente suelos más blandos. Aunque esto no puede calcularse de manera efectiva y es difícil de medir, proporciona un factor de seguridad adicional.
- Rigidez estructural en las uniones: Dependiendo de la rigidez del acoplamiento, la rigidez de la unión puede ser un problema, especialmente en suelos más blandos.
- Capacidad de la hélice para limitar la rotación lateral y efectivamente “fijar” la condición del extremo en ciertos tipos de suelo: La hélice inferior puede proporcionar rigidez rotacional y cambiar la condición de diseño del extremo de articulado a fijo (o parcialmente fijo). Esta distinción puede ser importante si hay suelos más blandos directamente por encima de la hélice empotrada.

6.1.2.4 CONSIDERACIONES DE CÓDIGO PARA EL PANDEO

El *International Building Code (IBC, 2018)* y el *Código de Construcción de la Ciudad de Nueva York (2014)* incluyen secciones que establecen lo siguiente:

“Cualquier suelo distinto del suelo fluido se considerará que proporciona suficiente soporte lateral para evitar el pandeo de elementos de cimentación profunda...”.

Muchos municipios y estados siguen el código IBC, pero es necesario revisar los códigos locales vigentes para conocer los requisitos específicos.





El **AC358** define los “suelos fluidos” como aquellos que tienen un valor de SPT (Standard Penetration Test) de peso del martillo. El **AC358** también define suelos blandos como aquellos con un SPT entre 1 y 5, sin incluir 5.

Como se indicó anteriormente, el pandeo del fuste del pilote puede controlar en suelos blandos. Por lo tanto, se recomienda al diseñador prudente que investigue este modo de falla en todos los suelos con un valor de SPT menor que 5.

6.1.3 ANÁLISIS LATERAL

La capacidad lateral de los pilotes está usualmente controlada por la capacidad geotécnica. Sin embargo, la capacidad a cortante y momento del fuste debe ser verificada utilizando los mismos métodos estructurales empleados para verificar pilotes de acero tipo tubo.

La diferencia en el análisis entre pilotes helicoidales y una sección constante de tubo de acero es que los pilotes helicoidales podrían involucrar acoplamientos. Aunque algunos fabricantes producen acoplamientos con resistencia a cortante y flexión equivalente a la del fuste, muchas de las conexiones son más débiles y más flexibles que el propio fuste.

Se deben consultar los cálculos certificados del fabricante para conocer la resistencia de la conexión. En algunos casos, puede ser necesario restringir la ubicación de los acoplamientos para alejarlos de la zona de máximo cortante o momento.

Consulte la Sección 6.3 – Acoplamiento (Empalme).

El diseñador también debe considerar el mecanismo de conexión (terminación estructural) entre la parte superior del pilote y la cimentación para garantizar conexiones adecuadas. Debe considerarse la resistencia de los pernos o el fallo por desprendimiento del concreto.

6.1.4 ANÁLISIS DE TORSIÓN

Los pilotes helicoidales deben ser capaces de resistir las fuerzas de torsión que se les aplican durante la instalación. La resistencia torsional del fuste debe verificarse en comparación con la torsión aplicada prevista, tal como se describe en un libro típico de mecánica de materiales (Logan, 1991).

Para formas típicas de acero, la resistencia a la torsión, TTT, puede calcularse utilizando una de las siguientes ecuaciones:

Eje macizo cuadrado:

$$T = 0.208F_y a^3$$

donde:

- T= Capacidad torsional del fuste
- a= lado del fuste cuadrado

Tubo redondo hueco:

$$T = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{16D} F_y$$





donde:

- D= diámetro exterior
- d= diámetro interior

Sección cuadrada hueca:

$$T = 2(a - t)^2 \cdot t \cdot F_y$$

donde:

- a= lado de la sección cuadrada
- t= espesor de la pared del fuste

En todas las ecuaciones anteriores, no se han aplicado factores de seguridad. Es importante tener en cuenta que también se debe verificar la capacidad torsional de la hélice, la conexión entre la hélice y el fuste, y del acoplamiento.

6.1.5 DEFORMACIÓN ELÁSTICA

Al considerar la deformación total de un pilote, debe tenerse en cuenta la deformación elástica del fuste ($\Delta=PL/AE$). Además, los acoplamientos con conexiones empernadas también deben ser evaluados por el movimiento en los agujeros de los pernos debido a tolerancias en el tamaño del agujero y/o deformación del acero en el costado del agujero del perno.

La acortamiento elástico teórico del fuste, $\Delta_{elástica}$, es:

$$\Delta_{elástica} = \frac{PL}{AE}$$

donde:

- P= carga en el fuste
- L= longitud del fuste sobre la cual se aplica la carga
- A= área de la sección transversal del fuste
- E= módulo de elasticidad del fuste

Los valores de A y E deben ser términos compuestos cuando el fuste está relleno con mortero o concreto.

El mortero fuera del fuste normalmente se ignora porque su resistencia y consistencia son difíciles de controlar en comparación con otras características estructurales.

6.2 DISEÑO DE LA PLACA HELICOIDAL

6.2.1 CONEXIÓN AL FUSTE

Todas las hélices están conectadas al fuste principal mediante soldadura, típicamente utilizando cordones de soldadura de filete. Dependiendo de la geometría y las cargas, el modo de falla de la conexión soldada puede deberse a la torsión de instalación, o a los esfuerzos cortantes inducidos por cargas axiales a lo largo del fuste una vez que el pilote helicoidal está cargado.





Las conexiones pueden diseñarse utilizando la teoría normal de diseño de soldaduras (AISC 360), pero las pruebas a menudo pueden demostrar capacidades admisibles más altas.

6.2.2 RESISTENCIA DE LA HÉLICE

Debido a su forma, no existen métodos matemáticos simples disponibles para determinar la capacidad de una placa helicoidal. El análisis por elementos finitos y las pruebas de carga a escala real proveen ambas opciones razonablemente rentables para determinar la capacidad de la placa helicoidal.

Dado que la placa helicoidal actúa esencialmente como un voladizo desde el fuste, el espesor de la placa es el principal contribuyente a la capacidad de la hélice.

6.3 ACOPLAMIENTO (EMPALME)

Todas las conexiones de acoplamiento deben diseñarse para las cargas anticipadas de compresión axial y tensión, así como para los esfuerzos de torsión durante la instalación. La resistencia a flexión del acoplamiento debe considerarse cuando sea apropiado. El diseñador siempre debe considerar cuidadosamente los pernos utilizados en el diseño de la conexión. En específico, el plano de corte puede atravesar la parte roscada del perno, y esa reducción en el área del perno debe tenerse en cuenta.

El diseño puede llevarse a cabo usando los criterios del American Institute of Steel Construction (AISC) 360, entendiendo que las secciones macizas y las secciones estructurales huecas (HSS) tienen ecuaciones de diseño diferentes en dicho código.

Las soldaduras para unir ejes de mayor diámetro son similares a las soldaduras que conectan secciones de tubos de acero. Estas pueden ser:

- Soldaduras a tope (butt welds)
- Soldaduras de penetración parcial de junta (PJP)
- Soldaduras de penetración completa de junta (CJP)

Estas deben diseñarse utilizando los métodos típicos de diseño de conexiones en acero.

Las soldaduras en campo deben ser inspeccionadas por un inspector de soldadura capacitado y certificado.

Cuando el acoplamiento está ubicado en el aire o en el agua (no completamente arriostrado), debe considerarse la excentricidad en la alineación del eje en los acoplamientos en los cálculos de pandeo.

6.4 CABEZAL DEL PILOTE (PILE CAP)

Cuando se utilizan cabezales de pilote de concreto, los pilotes helicoidales deben empotrarse un mínimo de 6 pulgadas dentro del concreto, y al menos 3 pulgadas por encima del refuerzo inferior.

Para obtener una condición de cabeza fija, los pilotes helicoidales deben empotrarse al menos el doble del diámetro del eje, o 6 pulgadas, lo que sea mayor.

El detallado y diseño de los cabezales de pilote de concreto reforzado debe cumplir con el código estructural de edificación aplicable (*American Concrete Institute 318, IBC, etc.*). Entre otros elementos, los cabezales de pilote de concreto reforzado deben diseñarse para resistir:

- el corte por punzonamiento,





- la rotura por desprendimiento en la cabeza del pilote,
- así como los esfuerzos de corte y flexión.

Cuando se utilizan rejillas de acero (steel grillages), los pilotes helicoidales pueden soldarse o atornillarse a las rejillas de acero conforme a los estándares aplicables de diseño en acero y soldadura.

Para soportes de reparación de cimentaciones (bastidores de underpinning), los cálculos pueden realizarse utilizando los códigos de diseño estructural típicos en acero para el bastidor, y los códigos de concreto para el concreto soportado.

Para pilotes desplazados de hasta 4.5 pulgadas de diámetro, el AC358 también proporciona criterios de prueba para determinar capacidades base para soportes que sustentan concreto estructural.



FIGURA 27 CABEZALES DE PILOTE TÍPICOS – SOPORTE PARA CONSTRUCCIÓN NUEVA (IZQUIERDA) Y SOPORTE PARA REHABILITACIÓN (DERECHA) (IMAGEN CORTESÍA DE GRIP-TITE MANUFACTURING).

7. PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

La corrosión de pilotes helicoidales se aborda típicamente utilizando uno o una combinación de los siguientes métodos:

- Tolerancia a la corrosión: un espesor sacrificial de metal determinado usando la tasa de corrosión anticipada y la vida útil de diseño del pilote.
- Galvanizado por inmersión en caliente: una capa delgada de zinc fundido adherida a la superficie de acero. Las tasas de corrosión del acero galvanizado pueden variar significativamente dependiendo de las condiciones del suelo. La American Galvanizers Association (AGA, 2015) ha publicado tablas de orientación sobre las posibles tasas de corrosión del acero galvanizado, y esta es una fuente que puede consultarse para determinar



si el galvanizado en caliente es una alternativa adecuada para la protección contra la corrosión.

- **Revestimientos protectores:** una barrera resistente a la corrosión entre la superficie metálica y el ambiente corrosivo. Debido a las condiciones abrasivas asociadas con la instalación de pilotes, un revestimiento protector debe tener excelente adherencia y buenas propiedades de resistencia a la abrasión. Históricamente, se han utilizado recubrimientos de epóxico de película relativamente delgada para pilotes hincados. Las formulaciones más recientes de recubrimientos epóxicos permiten una alta acumulación de película, y algunas incluyen cargas que mejoran la resistencia a la abrasión. Los recubrimientos de poliuretano de sólidos 100% de alta acumulación tienen muy buena resistencia a la abrasión y pueden aplicarse en un amplio rango de espesores.
- **Protección catódica:** un método electroquímico de control de corrosión en el cual se aplica una corriente continua (DC) sobre el pilote metálico enterrado. La protección catódica puede proporcionarse utilizando ánodos galvánicos o corriente impresa. La cantidad de corriente eléctrica requerida para la protección es función del área superficial del metal expuesto y las condiciones de exposición. Generalmente, los ánodos galvánicos son más adecuados como sistema suplementario de protección contra la corrosión para pilotes con un recubrimiento dieléctrico (como el poliuretano). Los sistemas de corriente impresa generalmente se utilizan para mitigar la corrosión en estructuras con una mayor superficie metálica expuesta. Estos sistemas deben ser diseñados por un profesional con experiencia en esta tecnología.

Para pilotes helicoidales pequeños, el AC358 proporciona algunas orientaciones sobre protección mediante galvanizado y recubrimiento en polvo. Las tasas de corrosión anticipadas para cada tipo de protección, así como para acero desnudo, están cuantificadas en las Secciones 1.2.2 y 3.9 de ese documento.

El potencial de corrosión aumentará donde los pilotes se instalen en:

- suelos perturbados,
- suelos que contengan escoria,
- suelos con altas concentraciones de material orgánico,
- suelos donde el nivel freático fluctúa y tiene un contenido apreciable de sales.

Otros factores que pueden aumentar el potencial de corrosión incluyen el contacto del pilote con el acero de refuerzo en el concreto o la corriente eléctrica directa (DC) errante. Las fuentes comunes de corriente directa errante incluyen:

- sistemas de protección catódica de corriente impresa,
- operaciones de soldadura,
- y sistemas de tránsito operados con corriente directa.

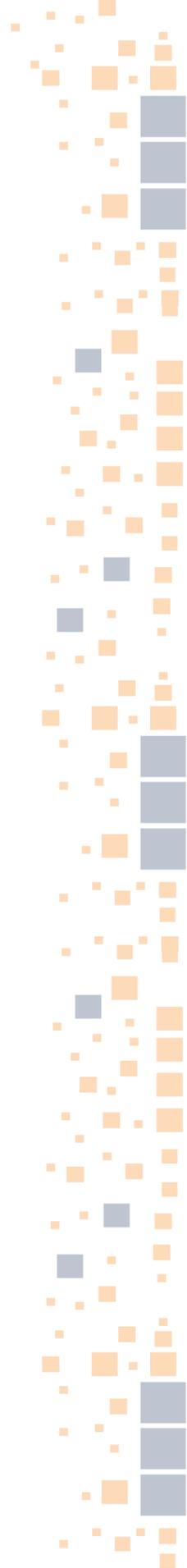
La Tabla 6 enumera ensayos y valores críticos de propiedades del suelo que podrían indicar que se requiere un examen más profundo del potencial de corrosión. Cuando el potencial de corrosión sea alto, se debe consultar a un profesional en control de corrosión.





HELICAL[®]
PILOTES HELICOIDALES

TABLA 6 DESENCADENANTES PARA UN EXAMEN MÁS PROFUNDO DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN



Propiedad	Designación del Ensayo	FHWA para Refuerzo de Micropilotes (Sabatini et al., 2005)	NACE International, 2001	Administración Federal de Carreteras (Hannigan et al., 2006)	Caltrans 2012 (1)
Resistividad	AASHTO T-288, ASTM G57	Menor a 3,000 ohm-cm	Menor a 10,000 a 2,000 ohm-cm	Menor a 2,000 ohm-cm	Menor a 1,000 ohm-cm
pH	AASHTO T-289, ASTM G51	Menor a 5, mayor a 10	Menor a 4, mayor a 9	Menor a 4.5	5.5 o menor
Sulfato	AASHTO T-290, ASTM D516M, ASTM D4327	Mayor a 200 ppm	(el efecto se correlaciona bien con la resistividad)	Mayor a 200 ppm con resistividad menor a 2,000 ohm-cm	Igual o mayor a 2,000 ppm
Cloruro	AASHTO T-291, ASTM D512, ASTM D4327	Mayor a 100 ppm	(el efecto se correlaciona bien con la resistividad)	Mayor a 100 ppm con resistividad menor a 2,000 ohm-cm	Igual o mayor a 500 ppm
Contenido de Agua	ASTM D2216	No especificado	Mayor a 20%, pero insaturado	No especificado	No especificado



8. ENSAYOS DE CARGA

Los ensayos de carga pueden realizarse durante la etapa de diseño para refinar el dimensionamiento de los elementos, desarrollar criterios de instalación, y verificar los parámetros de diseño de los pilotes. Los ensayos de carga también pueden llevarse a cabo como ensayos de comprobación durante la producción como medio de aseguramiento de calidad. Un montaje típico de ensayo de carga se muestra en la Figura 28.



FIGURA 28 MONTAJE TÍPICO DE ENSAYO DE CARGA A COMPRESIÓN PARA UN PILOTE HELICOIDAL
(IMAGEN CORTESÍA DE RAMJACK)

Los estudios han demostrado que los pilotes de pequeño diámetro en suelos uniformes muestran buena correlación entre el torque de instalación y la capacidad de carga axial. Esos factores de correlación han sido codificados en el AC358. Para aquellos pilotes que han sido ensayados y calificados conforme al AC358, puede que no se requieran ensayos de carga, dependiendo de los requerimientos del propietario, el equipo de diseño, y la Autoridad con Jurisdicción (AHJ).

En todos los demás casos, se deben requerir ensayos de carga para verificar la capacidad de pilotes helicoidales. Incluso en condiciones con correlaciones bien documentadas de capacidad-torque, los diseñadores pueden querer considerar realizar ensayos de carga si el equipo de instalación de pilotes helicoidales, la configuración de las uniones, o la geometría del pilote helicoidal son diferentes a las utilizadas para desarrollar las correlaciones.

Los ensayos de carga también pueden implementarse para reducir factores de seguridad (aumentar factores de resistencia de diseño), si lo permite el código.



Los ensayos de carga estática proporcionan una medición directa de la resistencia del pilote construido frente a una carga aplicada. Para pilotes muy cargados, los ensayos de carga estática pueden ser costosos.

Los ensayos dinámicos de alta deformación también son utilizados comúnmente con pilotes helicoidales. Los resultados de los ensayos dinámicos pueden usarse para desarrollar calibraciones específicas del sitio en combinación con los resultados de ensayos de carga estática, como una manera rentable de verificar cualitativamente el desempeño de carga de otros pilotes en el sitio. Los resultados de los ensayos dinámicos deben ser analizados por especialistas calificados.

Los ensayos de carga estática y dinámica deben realizarse, en general, de acuerdo con los siguientes métodos ASTM:

ASTM D1143 para carga axial estática a compresión

ASTM D3689 para carga axial estática a tensión

ASTM D3966 para carga lateral

ASTM D4945-2000 para ensayos dinámicos de alta deformación

En suelos susceptibles a fluencia, se utilizan periodos de carga sostenida más largos para medir las deformaciones por fluencia. Para facilitar y aumentar la precisión de la interpretación de los datos, cada incremento de carga debe mantenerse durante una duración constante.

Para minimizar la duración del ensayo en suelos potencialmente sujetos a fluencia, puede ser aconsejable realizar el ensayo con duraciones de carga cortas al inicio, y luego volver a cargar el pilote con incrementos de tiempo más largos, ya sea a la carga de diseño o a la carga máxima del ensayo.

Debido a que la información de los ensayos de carga es comúnmente distribuida a múltiples personas dentro de un proyecto, es una buena práctica de calidad incluir datos resumidos sobre la instalación y dimensiones del pilote en el formulario de datos del ensayo de carga o adjuntos a este.

8.1 ENSAYOS DE CARGA EN FASE DE DISEÑO

La instalación y los ensayos de carga se recomiendan para verificar la capacidad del pilote y para desarrollar correlaciones específicas del sitio entre capacidad y torque.

El pilote de prueba debe instalarse lo más cerca posible, pero fuera de la zona de influencia de una perforación exploratoria (preferentemente al menos 6 diámetros de placa helicoidal), de modo que los parámetros de instalación puedan correlacionarse con la estratigrafía, y los resultados del ensayo de carga puedan compararse con los predichos a partir de las propiedades geotécnicas de las capas de suelo y el torque de instalación.

La economía y la evaluación de riesgos determinarán si los ensayos se realizan en ubicaciones seleccionadas como representativas del sitio, o si se justifican ensayos adicionales en áreas discretas con condiciones poco definidas.

Para pilotes de mayor diámetro, galgas extensiométricas o instrumentación similar pueden ser beneficiosas para ayudar a determinar la contribución de la placa de soporte frente a la fricción en el fuste.

El ensayo de pilotes helicoidales con:





múltiples diámetros de eje y de placa helicoidal,
diferentes profundidades de punta,
múltiples placas helicoidales, y
perforación previa vs. sin perforación previa,

Deben también considerarse

8.2 ENSAYOS DE PRODUCCIÓN

Los ensayos de carga de pilotes helicoidales en producción pueden incluir ensayos de verificación y ensayos de prueba, como se describe a continuación:

Los ensayos de verificación al inicio de la construcción pueden ser similares a los descritos para los ensayos durante el diseño. En esta etapa, el enfoque de los ensayos está en lo siguiente:

- Verificar que los pilotes helicoidales pueden instalarse hasta las profundidades mínimas requeridas.
- Confirmar que el pilote puede desarrollar la capacidad mínima especificada de soporte por punta y fricción en el fuste.
- Registrar cambios abruptos en el torque que puedan usarse para identificar cambios en la estratigrafía.
- Establecer criterios de instalación y terminación.
- Refinar las relaciones de capacidad versus torque.

Los ensayos de prueba pueden implicar ya sea:

- el ensayo de un porcentaje predeterminado de pilotes helicoidales de producción de forma aleatoria, o
- el ensayo de pilotes helicoidales que se sospecha tienen menor capacidad, basado en:
 - torque de instalación bajo,
 - penetración superficial,
 - perforación excesiva causada por desalineación del pilote helicoidal,
 - u otros factores.

La ubicación de los pilotes de prueba debe ser seleccionada por el diseñador, a menudo después de consultar con el ingeniero geotécnico.

Se recomienda comúnmente un mínimo de dos ensayos de carga por sitio por materiales del subsuelo similares para otros tipos de cimentaciones profundas, como los pilotes hincados (AASHTO, 2012).

La efectividad del programa de exploración del subsuelo para caracterizar la variabilidad del sitio debe considerarse al determinar el número de ensayos de carga. Se deben realizar más ensayos en sitios con mayor variabilidad del subsuelo que en sitios más uniformes.





Paikowsky et al. (2004) presenta un método para considerar la variabilidad del sitio al determinar el número apropiado de ensayos.

9. CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD

Los métodos de control de calidad (QC) incluyen procesos de construcción que son planificados, ejecutados y registrados por el instalador, y los métodos de aseguramiento de calidad (QA) son utilizados por el representante del propietario para verificar la naturaleza del producto final. Los ensayos de campo previos a la producción también son opciones de QC/QA a considerar.

El control y aseguramiento de calidad para instalaciones de pilotes helicoidales incluye:

- Verificar que la exploración del subsuelo define adecuadamente las condiciones que se encontrarán; esto se basa comúnmente en el juicio del ingeniero geotécnico, aunque algunas agencias publican guías con el número/sitios sugeridos de exploraciones (por ejemplo, WSDOT, 2015).
- Seleccionar instaladores calificados.
- Proveer inspectores bien capacitados.
- Realizar ensayos para verificar o refinar los criterios preliminares de instalación.
- Monitorear los parámetros apropiados durante la instalación y los ensayos.
- Revisar continuamente los datos de instalación para su aceptación.

La documentación cuidadosa de las condiciones del subsuelo, los parámetros de instalación y los ensayos es importante para proporcionar una base de datos de experiencia. Esta base de datos puede utilizarse para:

refinar las ecuaciones de diseño para incluir condiciones de suelo y cargas no tradicionales, así como para una mejor comprensión de la interacción suelo-estructura.

El control y aseguramiento de calidad en la instalación sirve para dos propósitos:

1. Proporciona documentación de que los pilotes helicoidales se instalaron conforme a los criterios especificados de instalación.
2. Recolecta información que debe ser utilizada por el ingeniero de diseño para verificar indirectamente que las condiciones del suelo son similares a las asumidas en el diseño.

Se recomienda seguir las especificaciones guía del Comité de Pilotes y Anclajes Helicoidales de DFI para el control y aseguramiento de calidad de pilotes helicoidales y cimentaciones ancladas (DFI, 2015 y 2014, respectivamente).

9.1 PERSONAL DEL PROYECTO

Los contratistas instaladores y los inspectores deben tener las calificaciones adecuadas para instalar y verificar instalaciones de pilotes helicoidales.

9.1.1 CALIFICACIONES DEL CONTRATISTA INSTALADOR

Los instaladores calificados tendrán personal clave con experiencia trabajando en su función dentro de proyectos de construcción con cimentaciones profundas. El número de años de experiencia o el número de proyectos completados requeridos deben definirse en función de la singularidad de la instalación del pilote helicoidal.





Por ejemplo, en muchas localidades de los EE. UU. y Canadá, hay varios contratistas con tres o más años de experiencia instalando pilotes helicoidales en el rango de carga de trabajo de 10 a 200 kips.

Se recomienda que la experiencia del superintendente de cuadrilla se base en el riesgo relativo y la redundancia de las cimentaciones, y que además tenga experiencia utilizando el tipo general de equipo propuesto para el proyecto.

En circunstancias donde la experiencia local con pilotes helicoidales sea poco común (por ejemplo, cargas muy altas, instalaciones muy profundas o suelos muy densos), puede ser posible lograr una instalación de calidad si la empresa y el personal clave tienen varios años de experiencia en perforación o hincado de pilotes. El superintendente también debe recibir capacitación del fabricante del equipo para el personal clave y los operadores, así como asistencia en el sitio durante la puesta en marcha inicial y asistencia bajo demanda durante la producción.

9.1.2 CALIFICACIONES DEL INSPECTOR

Los inspectores necesitan capacitación sobre los factores involucrados en el diseño, sobre cómo los cambios en las condiciones del subsuelo o en los métodos de instalación del constructor podrían afectar el diseño, y sobre la importancia de documentar la información requerida y los cambios.

Los inspectores adecuadamente capacitados deben trabajar bajo la supervisión de un ingeniero de cimentaciones con experiencia.

9.1.3 INSPECCIONES ESPECIALES SEGÚN EL IBC

El monitoreo continuo de la instalación para cimentaciones helicoidales es esencial en todos los proyectos.

También pueden ser aplicables los requisitos de certificación para inspección especial, como se describen en el IBC (Sección 1705.9) y el Código de Construcción de la Ciudad de Nueva York.

9.2 ENTREGABLES

Los detalles de los entregables variarán según los mecanismos de contratación, pero en general deben incluir calificaciones de los contratistas, certificaciones de materiales (o resultados de pruebas), mezclas de lechada y resultados de prueba (si se utilizan), detalles de conexiones, plan de trabajo, registros de instalación y planos conforme a obra. Los entregables deben ser revisados y aprobados por el propietario o el representante del propietario antes del inicio de los trabajos.

9.3 CONTROL DE CALIDAD

9.3.1 CALIDAD DE LA EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

No se pueden proporcionar directrices para determinar la idoneidad de una exploración del subsuelo en ninguna guía de diseño, ya que intervienen demasiados factores de experiencia y juicio. El medio recomendado para garantizar una instalación de pilotes helicoidales de calidad es contratar a un ingeniero geotécnico calificado que tenga conocimiento de las condiciones del subsuelo local, exploración, diseño e instalación de pilotes helicoidales.

9.3.2 CONTROL DE CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN

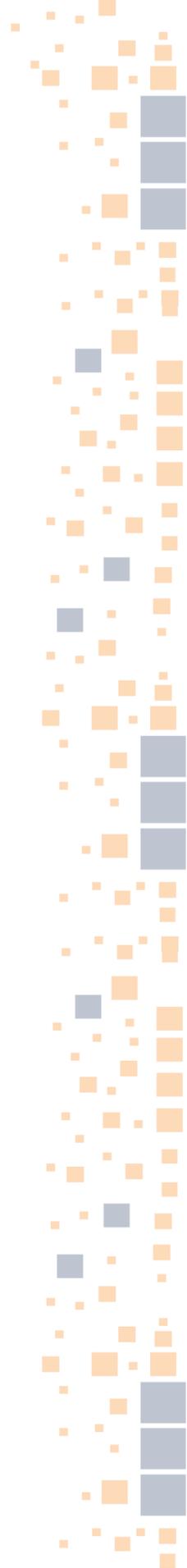
La información sugerida para registrar durante la instalación de pilotes helicoidales se enumera en la Tabla 7, y la información mínima para los planos de taller de pilotes helicoidales se presenta en la Tabla 8. La lista incluye no solo información relacionada con los criterios de instalación, sino también información sobre el equipo y los dispositivos de medición que son valiosos para resolver problemas y abordar cambios en las condiciones.





HELICAL[®]
PILOTES HELICOIDALES

TABLA 7 INFORMACIÓN MÍNIMA SUGERIDA PARA DOCUMENTAR DURANTE LA INSTALACIÓN DE PILOTES HELICOIDALES



ITEM	COMENTARIOS
Información del Proyecto	Esta información puede ser la misma para cada pilote helicoidal o para varios en un grupo, pero sigue siendo importante documentar estos detalles en registros individuales de instalación.
Criterios de instalación de diseño	Específicos del proyecto, típicamente incluye: • Profundidad mínima de punta del pilote o penetración en un estrato especificado. • Torque mínimo de instalación. • Tolerancia de ubicación horizontal. • Tolerancia de verticalidad.
Nombre del inspector u observador	Importante para resolver discrepancias.
Equipo de perforación	Puede impactar la presión descendente disponible, problemas de tracción con la salida de potencia, tolerancias de instalación, etc.
Cabezal de perforación y torque máximo nominal	
Método de medición de torque, incluidos factores de conversión si aplica	
Información del Pilote	
Número de pilote	
Elevación del terreno o elevación de referencia durante la instalación	
Elevación de corte de diseño	
Longitud mínima requerida sobre rasante (stickup)	Esta longitud puede ser mayor que la diferencia entre la elevación del terreno y la elevación de corte si el acoplamiento de instalación del pilote helicoidal necesita estar por encima de la elevación final de corte.
Verificación de que la geometría del pilote coincide con los planos de taller	Ver Tabla 8 para información mínima en los planos de taller.
Profundidad de perforación previa	Puede ser necesaria en materiales muy densos o duros, especialmente si se necesita una profundidad mínima para resistencia a carga de levantamiento o carga lateral.
Método de perforación previa y diámetro del agujero	¿Se extraen los recortes o se levantan del agujero? Si es así, ¿hasta qué profundidad o volumen aproximado se ha removido?
Torque vs. profundidad por debajo del nivel del suelo o elevación de referencia, registrado en incrementos de 1 pie o 0.33 metros	Muy importante para notar cambios en la estratigrafía, así como para correlacionar con resistencia del suelo o capacidad del pilote helicoidal.
Longitud de la sección inicial	Frecuentemente contabilizadas para cantidades de pago y sirven como verificación de calidad sobre la profundidad final de la punta y la longitud sobresaliente.
Longitud y número de secciones de extensión	



ITEM	COMENTARIOS
Fecha y hora de inicio de instalación	Útil para seguimiento de productividad y verificación cruzada en caso de discrepancias.
Fecha y hora de finalización de instalación	
Razón de la terminación de la instalación	Además de alcanzar la profundidad de diseño y el torque mínimo, a veces el equipo de instalación o los pilotes se rompen, no hay secciones de extensión disponibles, o el pilote gira sobre un obstáculo.
ITEM	COMENTARIOS
Resumen de instalación (aunque esta información puede determinarse a partir de los datos anteriores, es útil tenerla resumida en un solo lugar para facilitar su transferencia a una hoja de resumen donde puedan identificarse tendencias o pilotes sospechosos).	
Torque promedio en los últimos 3 diámetros de placa helicoidal de penetración del pilote	
Torque al momento de la terminación del pilote	
Profundidad final de la punta del pilote	
Elevación final de la punta del pilote	
Longitud sobresaliente final del pilote sobre el terreno o elevación de referencia	
Plomada en dirección N/S	Se recomienda listar los criterios en el formulario de instalación como el desplazamiento horizontal máximo permitido sobre una distancia vertical de 4 a 6 pies, de modo que se pueda utilizar un nivel largo para la verificación. Requerir un dato que se deba llenar en el formulario aumenta la probabilidad de que sea verificado.
Plomada en dirección E/O	
Desviación respecto a la ubicación horizontal de diseño	Comúnmente no puede ser medida o verificada por el inspector en el momento de la instalación, pero debe ser revisada y aprobada antes del corte.
Confirmación de que el pilote cumple con los criterios de instalación	



TABLA 8 INFORMACIÓN MÍNIMA DEL PLANO DEL TALLER DE PILOTES HELICOIDALES.

Diámetro exterior del eje	Espesor del eje
Diámetro de la placa helicoidal	Espesor de la placa helicoidal
Paso de la placa helicoidal	Distancia entre placas helicoidales
Geometría y longitud de la punta	Espesor y ubicación de la placa de extremo
Diámetro y ubicación del orificio de lechada	Resistencia de fluencia del eje y de la placa helicoidal
Detalles de soldadura	Detalles del acoplamiento

Las instalaciones exitosas de pilotes helicoidales utilizarán registros individuales de instalación de cada pilote para extender el conocimiento de las condiciones del subsuelo (ubicaciones de perforaciones exploratorias) al resto del sitio. El ingeniero de cimentaciones debe revisar continuamente los registros de instalación y compararlos con los registros de las perforaciones y ubicaciones de prueba para verificar que se cumplan los criterios de instalación y que las condiciones del subsuelo sean consistentes con las esperadas y para las cuales se desarrollaron los criterios de instalación.

10. REFERENCIAS

Adamczak, Jr., S., S.P. Clemence, B.M. Das, M. Finn, R.E. Howard, F.H. Kulhawy, M.P. Mitsch,

J.S. Mooney, V. Rapoport, J.A. Valdes, A.G. Young. 1985. "Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil," Ed. S.P. Clemence, American Society of Civil Engineers, New York City, New York.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2012. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications for Deep Foundations, Washington, DC.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC.

AASHTO T-288 Standard Method of Test for Determining Minimum Laboratory Soil Resistivity

AASHTO T-289 Standard Method of Test for Determining pH of Soil for Use in Corrosion

Testing

AASHTO T-290 Standard Method of Test for Determining Water-Soluble Sulfate Ion Content in Soil

AASHTO T-291 Standard Method of Test for Determining Water-Soluble Chloride Ion Content in Soil

American Galvanizers Association (AGA). 2015. <http://www.galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/how-long-does-hdg-last/in-soil>. Web site accessed August 20, 2015.





American Society for Testing and Materials (ASTM). West Conshohocken, PA. ASTM
D516M Standard Test Method for Sulfate Ion in Water

ASTM D4327 Standard Test Method for Anions in Water by Suppressed Ion Chromatography
ASTM D512 Standard Test Methods for Chloride Ion In Water

ASTM D2216 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture)
Content of Soil and Rock by Mass

ASTM D1143 Standard Test Method for Deep Foundations Under Static Axial Compressive
Load

ASTM D3689 Standard Test Method for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load
ASTM D3966 Standard Test Method for Lateral Loading

ASTM D4945-2000 Standard Test Method for High Strain Dynamic Testing

ASTM G51 Standard Test Method for Measuring pH of Soil for Use in Corrosion Testing

ASTM G57 Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner
Four-Electrode Method

Bowles, J. E. 1968, *Foundation Analysis and Design*, First Edition, McGraw-Hill, New York City,
New York.

Bowles, J. E. 1988, *Foundation Analysis and Design*, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York City,
New York.

Brinch-Hansen, J. 1961. "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transverse Forces," *The
Danish Geotechnical Institute Bulletin*, No. 12, pp. 5-9.

Broms, B.B. 1964a. Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils. *Journal of the Soil
Mechanics and Foundations Division*, Vol. 90, Issue 3, American Society of Civil Engineers,
Reston, VA, pp. 123-158.





Broms, B. B. 1964b. Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 90, Issue 2, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp. 27-64.

Cadden, A. and J. Gomez. 2002. Buckling of Micropiles - A review of historic research and recent experiences. ADSC: International Association of Foundation Drilling, Dallas, TX, May, 19 p.

California Department of Transportation (Caltrans). 2012. Corrosion Guidelines, Version 2.0. Division of Engineering Services Materials Engineering and Testing Services, Corrosion and Structural Concrete Field Investigation Branch, November, Sacramento, CA.

Canadian Geotechnical Society. 2006. Canadian Foundation Engineering Manual. 4th Edition.

Cerato, A.B., *Vargas, T. and *Allred, S. (2017). A critical review: State of Knowledge in Seismic Behavior of Helical Piles. Deep Foundations Institute (DFI) Journal.
<http://dx.doi.org/10.1080/19375247.2017.1414108>.

CH2M HILL. 2013. Helical Pile Test Program APE Yard, Kent, Washington. Prepared for American Piledriving Equipment, Inc., June 10, 88 p.

Cherry, J.A. and H.A. Perko. 2013. "Deflection of Helical Piles: A Load Test Database Review," Proceedings of the 1st International Geotechnical Symposium on Helical Foundations, International Society for Helical Foundations, Amherst, MA, August 8-10, pp. 81-91.

CTL|Thompson. 2016. Letter to ICC-Evaluation Service on Behalf of AC 308 Ad-Hoc Committee, July.

Das, B.M. 1990. *Principles of Foundation Engineering*, PWS-Kent Publishing Co., 731 p.

Dawson, K.J. and F. Johnson. 2016. "Pressure-Grouting Improves Performance of Helical Piles: A Production Case History, Static Load Test Results, and Comparisons to Predicted Lateral Deflection and Axial Resistance," Proceedings of 41st Annual Conference on Deep Foundations, Seepage Control and Remediation, October 12-14 New York, NJ, Deep Foundations Institute, Hawthorne, NJ.

Davisson, M.T. 1963. Estimating Buckling Loads for Piles. Proceedings, 2nd Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil, Vol. 1

Deep Foundations Institute. 2012. Seismic and Lateral Load Design and Testing Guidelines. DFI Seismic and Lateral Loads Committee, Robert Kruger Editor., Hawthorne, NJ, 68 p.



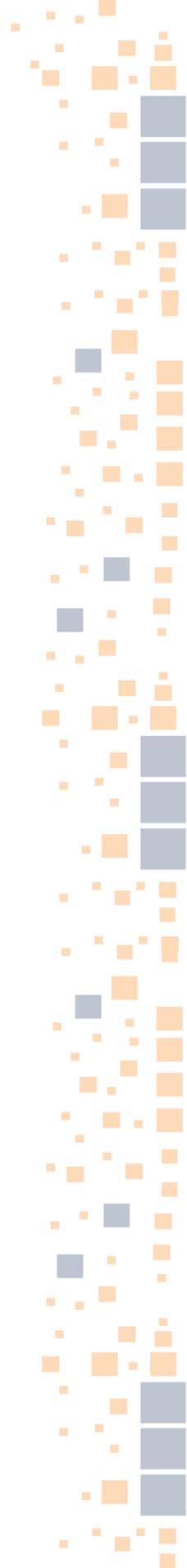


HELICAL[®]
PILOTES HELICOIDALES

Deep Foundations Institute. 2014, Model Specifications for Helical Anchor Foundations Tension Applications., Hawthorne, NJ, 10 p.

Deep Foundations Institute. 2015, Model Specifications for Helical Pile Foundations Compression Applications., Hawthorne, NJ, 11 p.

ElSawy, M.K., M.H. El Nagggar, A.B. Cerato, and A.W. Elgamal. 2019. Seismic Performance of Helical Piles in Dry Sand from Large Scale Shake Table Tests. Geotechnique.
<https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.001>.





ElSawy, M.K., M. Heidari, M.H. El Naggar, A.B. Cerato, and A. Elgamal. 2017. Interpretation of Seismic Response Data from Full Scale Helical Pile Tests. *DFI 42nd Annual Conference on Deep Foundations*. New Orleans, LA. October 24-27, 2017.

Fellenius, B.H. 2014. Basics of Foundation Design, Electronic Edition, February. <http://www.fellenius.net/papers>, accessed April 6, 2015.

FHWA. 2005. Micropile Design and Construction. NH Course No. 132078. Publication No. FHWA NHI-05-039, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. December.

Ghaly, A.M. and A. Hanna. 1991. "Experimental and Theoretical Studies on Installation Torque of Screw Anchors," *Canadian Geotechnical Journal*, 28, No. 3, pp. 353-364.

Gouvenot, D. (1973), "Essais En France et a L'Etranger sur le Frottement Lateral en Fondation: Amelioration par Injection," Travaux, 464, Nov, Paris, France.

Gustavo, P., D. Bien, B. Li and R. Schmidt. (2012). "Predicted and Measured Compressive Capacity and Torque of Large Helix Diameter Screw Piles in Stiff to Very Stiff Cohesive Soils," GeoManitoba, September 30-October 3, Canadian Geotechnical Society, Richmond, BC, Canada.

Hannigan, P. J., G.G. Goble, G. Thendean, G.E. Likins, and F. Rausche. 2006. Design and Construction of Driven Pile Foundations, NHI-05-42, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.

Hoyt, R. L. and S.P. Clemence. 1989. Uplift Capacity of Helical Anchors in Soil, Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil.

International Code Council. 2009. IBC – International Building Code, First Printing.

International Code Council. 2015. IBC – International Building Code, Third Printing.

International Code Council-Evaluation Services. (originally published 2007, updated as needed) AC358 - Helical Systems and Devices, www.icc-es.org.

Konstantakos, D. and M. Perlow, Jr. 2014. "Settlement Based Performance Prediction of Helical Piles," PowerPoint Presentation DFI Seminar Helical Pile History and Current Practice Seminar, St. Charles, MO, April, Deep Foundations Institute, Hawthorne, NJ.

Logan, D. L. (1991). *Mechanics of Materials*, Harper Collins, New York, 784 p.

Matlock, H. 1970. Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay. 2nd Annual Offshore Technology conference, Houston, Texas, USA, OTC 1204, Vol. 1, pp. 577-595.

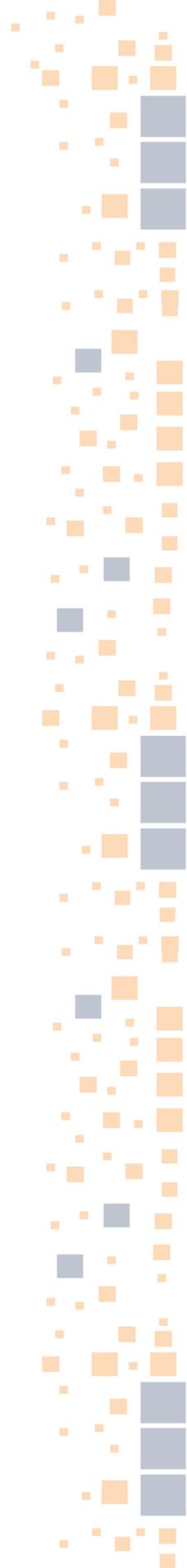




HELICAL[®]
PILOTES HELICOIDALES

Meyerhof, G. G. 1976, Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Volume 102, No. GT3, New York City, New York.

Mitchell, A. 1848, "On Submarine Foundations; particularly Screw-Pile and Moorings", Civil Engineer and Architects Journal, Vol. 12.





National Association of Corrosion Engineers (NACE). 2001. State-of-the-Art Survey on Corrosion of Steel Pilings in Soils. Item No 24216, NACE International Publication 05101. December. 23 p.

National Research Council Canada. 2015. Canadian National Building Code, Ottawa, ON, Canada.

National Research Council of Canada (NRCC). 2015. The National Building Code of Canada (NBC), Ottawa, ON, Canada.

Paikowsky, S.G., C. Kuo, G. Baecher, B. Ayyub, K Stenersen, L. O'Malley, L Chernauskas, and M. O'Neill. 2004. Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Deep Foundations, National Cooperative Highway Research Program Report 507, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

Perko, H.A. 2001. "Energy Method for Predicting Installation Torque of Helical Foundation and Anchors," *New Technological and Design Developments in Deep Foundations*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp 342-352.

Perko, H.A. 2009. *Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation*, John Wiley & Sons, New Jersey, 512 p.

Reese, L.C. and H. Matlock. 1956. "Non-Dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth," *Proceedings of the Eighth Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Special Publication No. 29, Bureau of Engineering Research, The University of Texas, 41 p.

Reese, L. C., W, R. Cox, and F. D. Koop. 1975. "Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay," in *Proceedings, Seventh Offshore Technology Conference*, Vol. 2, Dallas, Texas, pp. 672-690.

Romanoff, M. 1962. Corrosion of Steel Pilings in Soils. National Bureau of Standards Monograph 58, October 24. United States Department of Commerce.

Sabatini, P.J., B. Tanyu, T.A. Armour, P. Groneck, and J. Keeley. 2005. *Micropile Design and Construction*, Publication No. FHWA NHI-05-039, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, December, 436 p.

Sabatini, P.J., R.C. Bachus, P.W. Mayne, J.A. Schneider, and T.E. Zettler. 2002. *Evaluation of Soil and Rock Properties*, Publication No. FHWA-IF-02-034, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, December, 385 p.





HELICAL®
PILOTES HELICOIDALES

Sakr, M. 2013. "Relationship between Installation Torque and Axial Capacities of Helical Piles in Cohesive Soils", *DFI Journal*, Vol. 7, No. 1, Deep Foundation Institute, Hawthorne, NJ, pp. 44-58.

Seider, G.S., S. Clemence, and R. Thorsten. 2003. "Helical Piles with Grouted Shafts - A Practical Overview", Proceedings of 28th Annual Conference on Deep Foundations, Oct 22-24, Miami Beach, FL, Deep Foundations Institute, Hawthorne, NJ, pp. 221-231.





Tsuha, C. and N. Aoki. 2010. Relationship Between Installation Torque and Uplift Capacity of Deep Helical Piles in Sand, *Canadian Geotechnical Journal*, Canadian Science Publishing, Ottawa, ON, Canada, Vol. 47, pp. 635-647.

US Navy Design Manual DM7, NAVFAC. 1974, Foundations and Earth Structures, Government Printing Office, Washington, DC.

US Navy Design Manual DM7, NAVFAC, 1986, Foundations and Earth Structures, Government Printing Office, Washington, DC.

Vickars, R. A., J.C.T. Vickars, and G. Toebosch. United States Patent 5,707,180, Method and Apparatus for Forming Piles In-Situ, US Patent Office, Washington, DC.

Washington State Department of Transportation (WSDOT). 2015. Geotechnical Design Manual. M46-03. Olympia, Washington. 868 pp.

White, B., A. Alzawi, T. Bradka, Y. Phang. 2013. High Strain Dynamic Load Testing on Helical Piles - Case Study, Proceedings of 1st International Geotechnical Symposium on Helical Foundations: Amherst, MA; August, pp. 336-346.

Yang, J. 2006. "Influence zone of end bearing piles in sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, Vol. 132, No. 9, pp. 1229-1237.





SI* (MODERN METRIC) CONVERSION FACTORS				
APPROXIMATE CONVERSIONS TO SI UNITS				
Symbol	When You Know	Multiply By	To Find	Symbol
LENGTH				
in	inches	25.4	millimeters	mm
ft	feet	0.305	meters	m
yd	yards	0.914	meters	m
mi	miles	1.61	kilometers	km
AREA				
in ²	square inches	645.2	square millimeters	mm ²
ft ²	square feet	0.093	square meters	m ²
yd ²	square yard	0.836	square meters	m ²
ac	acres	0.405	hectares	ha
mi ²	square miles	2.59	square kilometers	km ²
VOLUME				
fl oz	fluid ounces	29.57	milliliters	mL
gal	gallons	3.785	liters	L
ft ³	cubic feet	0.028	cubic meters	m ³
yd ³	cubic yards	0.765	cubic meters	m ³
NOTE: volumes greater than 1000 L shall be shown in m ³				
MASS				
oz	ounces	28.35	grams	g
lb	pounds	0.454	kilograms	kg
T	short tons (2000 lb)	0.907	megagrams (or "metric ton")	Mg (or "t")
TEMPERATURE (exact degrees)				
°F	Fahrenheit	5 (F-32)/9 or (F-32)/1.8	Celsius	°C
ILLUMINATION				
fc	foot-candles	10.76	lux	lx
fl	foot-Lamberts	3.426	candela/m ²	cd/m ²
FORCE and PRESSURE or STRESS				
lbf	poundforce	4.45	newtons	N
lbf/in ²	poundforce per square inch	6.89	kilopascals	kPa
APPROXIMATE CONVERSIONS FROM SI UNITS				
Symbol	When You Know	Multiply By	To Find	Symbol
LENGTH				
mm	millimeters	0.039	inches	in
m	meters	3.28	feet	ft
m	meters	1.09	yards	yd
km	kilometers	0.621	miles	mi
AREA				
mm ²	square millimeters	0.0016	square inches	in ²
m ²	square meters	10.764	square feet	ft ²
m ²	square meters	1.195	square yards	yd ²
ha	hectares	2.47	acres	ac
km ²	square kilometers	0.386	square miles	mi ²
VOLUME				
mL	milliliters	0.034	fluid ounces	fl oz
L	liters	0.264	gallons	gal
m ³	cubic meters	35.314	cubic feet	ft ³
m ³	cubic meters	1.307	cubic yards	yd ³
MASS				
g	grams	0.035	ounces	oz
kg	kilograms	2.202	pounds	lb
Mg (or "t")	megagrams (or "metric ton")	1.103	short tons (2000 lb)	T
TEMPERATURE (exact degrees)				
°C	Celsius	1.8C+32	Fahrenheit	°F
ILLUMINATION				
lx	lux	0.0929	foot-candles	fc
cd/m ²	candela/m ²	0.2919	foot-Lamberts	fl
FORCE and PRESSURE or STRESS				
N	newtons	0.225	poundforce	lbf
kPa	kilopascals	0.145	poundforce per square inch	lbf/in ²

*SI is the symbol for the International System of Units. Appropriate rounding should be made to comply with Section 4 of ASTM E380. (Revised March 2003)





HELICAL[®]
PILOTES HELICOIDALES

