

Instrucciones de Construcción



Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera

serie normativas

Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera



2005

GUÍA PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE MICROPILOTES EN OBRAS DE CARRETERA

Esta *Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera* forma parte de una serie de un documentos de divulgación tecnológica elaborados por la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras, incluidos en una línea editorial que pretende el conocimiento y la armonización de conceptos sobre aspectos relevantes relacionados específicamente con el quehacer de los técnicos del Centro Directivo.

En el ámbito de lo concreto, pretende desarrollar las principales cuestiones a tener en cuenta en lo referente a materiales y productos, diseño y cálculo, ejecución y procedimientos de control de micropilotes en los proyectos y obras de carretera. Para ello los define y clasifica, introduce métodos de cálculo, expone los criterios a seguir para su ejecución, formula prescripciones básicas sobre su control, e incluye una serie de apéndices sobre aspectos diversos; todo ello sin perjuicio de la existencia de cuestiones particulares de cada obra o proyecto que puedan quedar, por su singularidad, fuera del contexto de la misma.

Su elaboración se ha dividido en dos fases sucesivas: la primera de redacción de un documento básico de partida que reflejara la experiencia en la ejecución de este tipo de trabajos en España, y la segunda que ha comprendido su ampliación y puesta al día, a la luz de los principales textos sobre la materia —normativos y divulgativos— a nivel nacional e internacional, la revisión integral del documento por especialistas en geotecnia y estructuras, la fase de consultas internas y la redacción definitiva, con la consiguiente introducción de nuevos conceptos en diferentes campos, si bien, fundamentalmente relativos a cuestiones de proyecto geotécnico y estructural, métodos de cálculo y normativa.

La primera fase, dirigida por el catedrático de Ingeniería del Terreno D. Carlos Oteo Mazo, fue llevada a cabo, en primer lugar, por el ingeniero de caminos, canales y puertos D. José Luis Fernández Salsó, con la colaboración del Comité Técnico de la Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y del Subsuelo (AETESS), compuesto por ingenieros de caminos, canales y puertos de las empresas integradas en dicha asociación, reconocidos especialistas en geotecnia. En esta fase se ha pretendido recoger la gran experiencia de dicha asociación en la realización de este tipo de trabajos.

La segunda de las fases descritas ha sido llevada a cabo por ingenieros de caminos, canales y puertos, funcionarios de la Dirección General de Carreteras. La redacción del texto definitivo ha sido responsabilidad del Servicio de Geotecnia:

D.^a Mercedes L. Gómez Álvarez.

D. Ángel Juanco García.

D. Álvaro Parrilla Alcaide

quienes además han contado con las valiosas opiniones de:

D.^a Pilar Crespo Rodríguez, Servicio de Estudios Especiales.

D. César Fernández-Nespral Pérez, Demarcación de Carreteras del Estado en Asturias.

D. Francisco Javier González Cabezas, Demarcación de Carreteras del Estado en Castilla-La Mancha.

D. Ángel Carlos Paradela Sánchez, Servicio de Estudios Especiales.

D. Javier Payán de Tejada González, Demarcación de Carreteras del Estado en Castilla y León Occidental.

D. Fernando Pedrazo Majarrez, Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura.

D. Francisco Ruiz Hidalgo, Demarcación de Carreteras del Estado en Andalucía Oriental.

Asimismo han recibido las observaciones de los reconocidos expertos en estructuras, D. Juan Luis Alcalá Sánchez, y en geotecnia, profesor D. Luis Sopeña Mañas y, de nuevo, del profesor D. Carlos Oteo Mazo.

La utilización de esta Guía en el proyecto, construcción y seguimiento de las obras, permitirá en el futuro matizar y completar los criterios recogidos en la misma, teniendo en cuenta que se trata de un tipo de trabajos en que los avances e innovaciones se producen de manera casi continua.

Octubre de 2005

ÍNDICE

1. Consideraciones generales	7
1.1. Introducción	7
1.2. Definición y clasificaciones	7
1.3. Recomendaciones sobre la posible idoneidad de cada tipo de micropilote	8
1.4. Principales aplicaciones	8
2. Materiales y productos	13
2.1. Armaduras	13
2.2. Lechadas y morteros de cemento	14
2.3. Protección contra la corrosión	15
3. Cálculo de los micropilotes	19
3.1. Estados límite	19
3.2. Comprobaciones específicas a efectuar en las aplicaciones más usuales	21
3.3. Comprobación frente al hundimiento	24
3.4. Comprobación frente al arranque	32
3.5. Comprobación frente a solicitudes transversales	34
3.6. Fallo estructural de los micropilotes	36
3.7. Cálculo de asientos de los micropilotes	42
3.8. Grupos de micropilotes	45
3.9. Unión a las cimentaciones o encepados	48
3.10. Consideraciones de cálculo en aplicaciones especiales	50
4. Ejecución de los micropilotes	59
4.1. Operaciones básicas	59
4.2. Perforación del taladro del micropilote	60
4.3. Colocación de la armadura	63
4.4. Inyección del micropilote	63
4.5. Ejecución de micropilotes de eje no vertical	68
4.6. Conexión de los micropilotes con la estructura	69
4.7. Protocolo de ejecución y partes de trabajo	69
5. Procedimientos de control	73
5.1. Consideraciones generales	73
5.2. Control de materiales	73
5.3. Control de ejecución	74
5.4. Pruebas de carga	75
Apéndice 1. Clasificación de los micropilotes según la norma EN 14199	79
Apéndice 2. Aspectos relativos a la realización de pruebas de carga «in situ»	81
A.2.1. Introducción	81
A.2.2. Procedimientos de carga	82
A.2.3. Montaje de las pruebas de carga	85
A.2.4. Instrumentación de las pruebas de carga	85
A.2.5. Toma de datos e informe de la prueba de carga	87
A.2.6. Ejemplo práctico de realización de una prueba de carga	88

Apéndice 3. Desarrollos teóricos complementarios	89
A.3.1. Resistencia frente a solicitudes transversales	89
A.3.2. Comprobación de la inestabilidad estructural	95
A.3.3. Método de la imperfección geométrica	97
A.3.4. Ábacos de Souche	100
Apéndice 4. Resistencia estructural a flexión, cortante y esfuerzos combinados	109
A.4.1. Resistencia estructural a flexión	109
A.4.2. Resistencia estructural a cortante	110
A.4.3. Resistencia estructural frente a esfuerzos combinados	111
Apéndice 5. Ejemplos de conexión entre micropilotes y estructura	113
A.5.1. Ejemplos de conexión a una cimentación de nueva construcción	113
A.5.2. Ejemplos de conexión directa a una cimentación preexistente	118
A.5.3. Ejemplos de conexión a un nuevo encepado que se conecta a su vez a una cimentación preexistente	120
Apéndice 6. Correlaciones y clasificaciones empíricas de tipo geotécnico, referidas en esta Guía	121
A.6.1. Escala de meteorización de las rocas	121
A.6.2. Clasificación de la compacidad de las arenas	122
A.6.3. Correlación entre el índice N del ensayo SPT y la resistencia por punta del ensayo de penetración estática CPT	122
A.6.4. Clasificación de la consistencia de los suelos arcillosos	123
A.6.5. Módulo de reacción del terreno	124
Apéndice 7. Nomenclatura	131
A.7.1. Glosario	131
A.7.2. Notación	132
Apéndice 8. Normas UNE y bibliografía	139
A.8.1. Normas UNE	139
A.8.2. Bibliografía	140

CONSIDERACIONES GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN

Esta Guía contempla las principales cuestiones a considerar durante el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera, en sus principales aplicaciones.

Define las características que deben cumplir sus elementos constituyentes, así como las de los materiales y medios auxiliares empleados. Incluye las principales cuestiones relativas a la concepción, tipología y cálculo resistente de los micropilotes, todas ellas dependientes de la aplicación concreta a la que vayan a destinarse y de las características del terreno en el que se construyan, que deberán estudiarse con carácter previo a la ejecución de las obras.

Indica y describe las diferentes fases que pueden distinguirse durante la ejecución de un micropilote: la perforación del taladro en el terreno, la colocación de la armadura, la inyección del micropilote y su conexión con la estructura proyectada o preexistente en su caso.

Por último, señala las tolerancias en la ejecución y los ensayos de uso más frecuente para esta unidad de obra, e incluye una serie de apéndices que pretenden encaminar al lector hacia una mejor asimilación de ciertos conceptos incluidos en la Guía.

1.2. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIONES

La presente Guía se refiere a micropilotes cilíndricos, de diámetro inferior a trescientos milímetros (300 mm), perforados en el terreno, armados con tubería de acero reforzada a veces con una o varias barras corrugadas, e inyectado con lechada o mortero de cemento en una o varias fases. Si bien hay otros tipos de micropilotes, no son objeto de este documento.

En el apéndice 1 de esta Guía se reproduce la clasificación de los micropilotes según la norma *UNE EN 14199. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Micropilotes*. Los contemplados en esta Guía, se refieren en dicha clasificación como perforados con armadura constituida por un perfil tubular.

Los micropilotes objeto de esta Guía pueden clasificarse atendiendo, fundamentalmente, a los siguientes aspectos:

- Según la forma de **transmisión de los esfuerzos** al terreno:
 - Individualmente como cimentación profunda, a través del fuste y la punta.
 - Como grupo, actuando sobre una determinada zona del terreno.
- Según el tipo de **solicitud** dominante a la que están sometidos:
 - Esfuerzos axiles de compresión o tracción (normalmente en obras de cimentación)¹.
 - Momentos flectores y esfuerzos cortantes (normalmente en obras de estabilización de laderas, contención de tierras, paraguas en túneles, etc.).

¹ En cimentaciones, con acciones horizontales importantes (pilas en zona sísmica, estribos de puente, etc.), además de axiles, habrá flectores y cortantes.

-
- Según el **sistema de inyección** de la lechada o mortero de cemento:
 - Los inyectados en una sola fase, también denominados de inyección única global (IU).
 - Los reinyectados hasta dos veces a través de tubos o circuitos con válvulas antirretorno, también denominados de inyección repetitiva (IR).
 - Los reinyectados varias veces a través de tubos-manguito desde el interior de la tubería de armadura, en toda la longitud del micropilote o en parte, también denominados de inyección repetitiva y selectiva (IRS).

En esta Guía se abordará normalmente la clasificación de los micropilotes atendiendo al sistema de inyección empleado. En el epígrafe 4.4.2 se efectúa una descripción más detallada de cada uno de los tipos recién mencionados.

1.3. RECOMENDACIONES SOBRE LA POSIBLE IDONEIDAD DE CADA TIPO DE MICROPILOTE

El proceso de inyección tiene por objeto garantizar el contacto y la transmisión de esfuerzos entre la armadura tubular y el terreno. El sistema de inyección más adecuado a cada caso, deberá elegirse en función del terreno atravesado, entre otros aspectos.

A continuación se formulan algunas recomendaciones genéricas acerca de la posible adecuación del uso de unos u otros tipos de inyección, que deben considerarse únicamente a título orientativo.

- Los micropilotes del tipo IU suelen ser los más adecuados en rocas más o menos sanas, suelos cohesivos muy duros y suelos granulares.
- Los del tipo IR se emplean generalmente en rocas blandas y fisuradas y en materiales granulares gruesos y de compacidad media.
- Los del tipo IRS, que permiten efectuar una inyección más controlada, se recomiendan en suelos cohesivos (salvo los muy duros), suelos de consistencia baja o media y especialmente en suelos granulares en los que se intenta formar un bulbo.

No obstante lo anterior, cada caso precisa una definición específica de la tipología a utilizar, que será función, además, de la capacidad resistente requerida para el mismo y que el proyecto deberá evaluar de modo expreso.

1.4. PRINCIPALES APLICACIONES

Las aplicaciones más usuales de los micropilotes en obras de carretera, que se recogen en esta Guía, son las que se indican en este apartado; así, en lo sucesivo, se estudiará el empleo de los micropilotes como:

- a) **Estructuras de cimentación:** pueden emplearse tanto en obra nueva como en recalces, reparaciones, etc., de estructuras preexistentes:
 - Obras de **nueva planta**: su campo de aplicación fundamental son las estructuras con espacio de trabajo reducido o acceso complicado, los terrenos difíciles de perforar por intercalación de niveles rocosos, bolos o bloques de grandes dimensiones, etc. Los micropilotes transmiten las cargas de manera menos concentrada y más uniforme que los pilotes, pudiendo suponer una ventaja en determinadas circunstancias, como por ejemplo en zonas constituidas por roca alterada, etc.
 - Obras de reparación, refuerzo, rehabilitación, mejora o recalce de **estructuras preexistentes**: incluye la remodelación de aquéllas que presentan incrementos de las solicitudes, la actuación frente a determinadas patologías geotécnicas, etc.

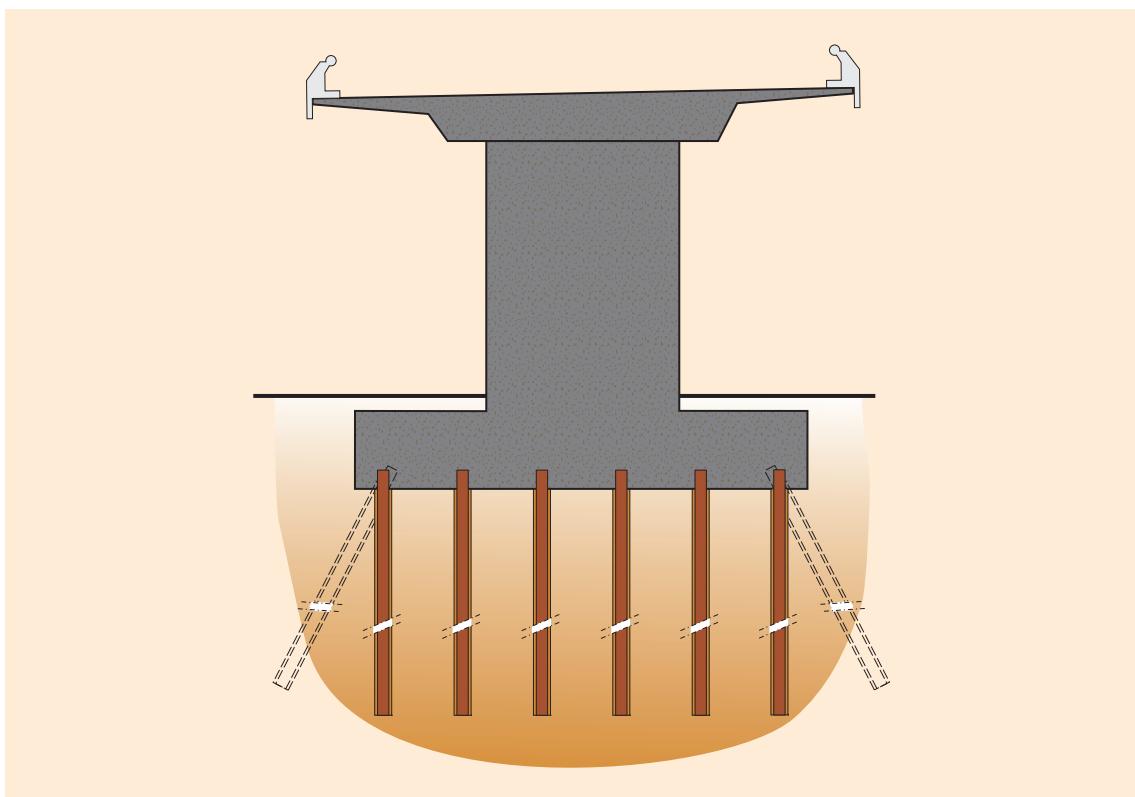
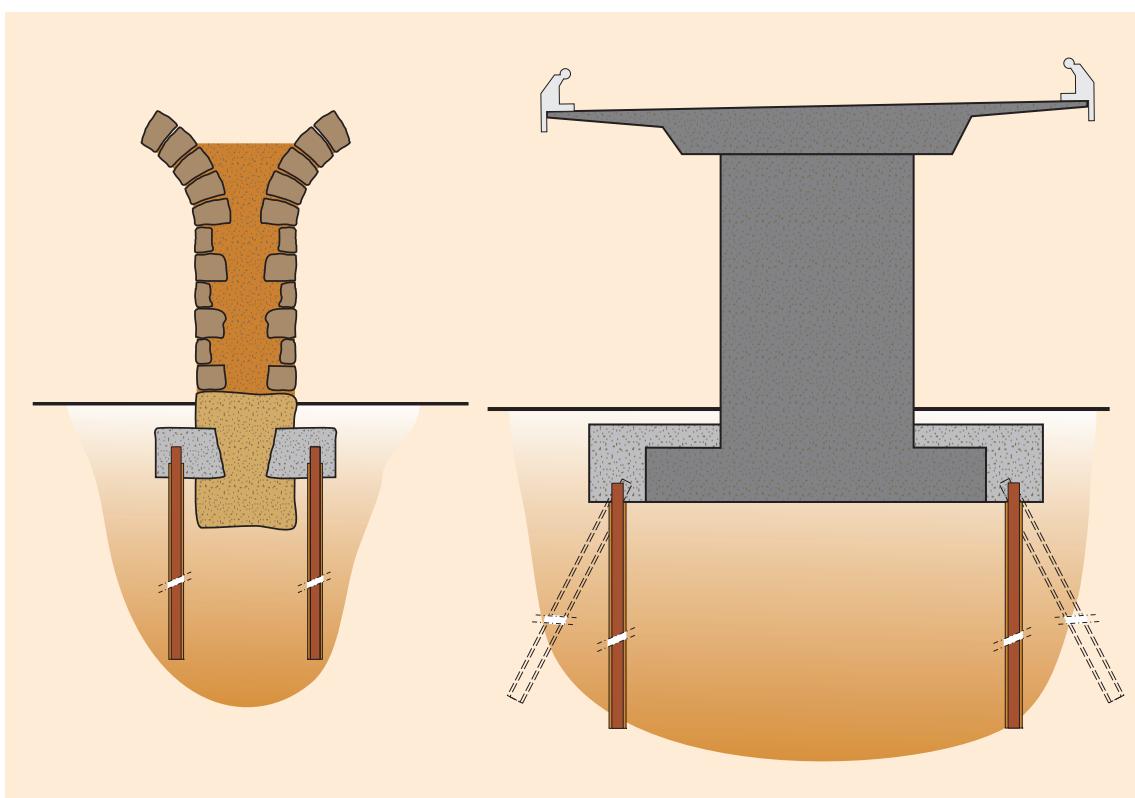


FIGURA 1.1. EJEMPLO DE CIMENTACIÓN DE NUEVA PLANTA CON MICROPILOTES



NOTA: Estas figuras son meramente ilustrativas y no incluyen detalles sobre las conexiones (véase apartado 3.9).

FIGURA 1.2. EJEMPLOS DE RECALCE DE CIMENTACIONES PREEXISTENTES MEDIANTE MICROPILOTES

- b) **Estructuras de contención o sostenimiento² del terreno:** normalmente se disponen formando alineaciones o grupos numerosos con varias inclinaciones, se encepan en cabeza y se acompañan de anclajes u otras unidades de obra. Se sitúan en un mismo plano (generalmente vertical) o formando abanico.

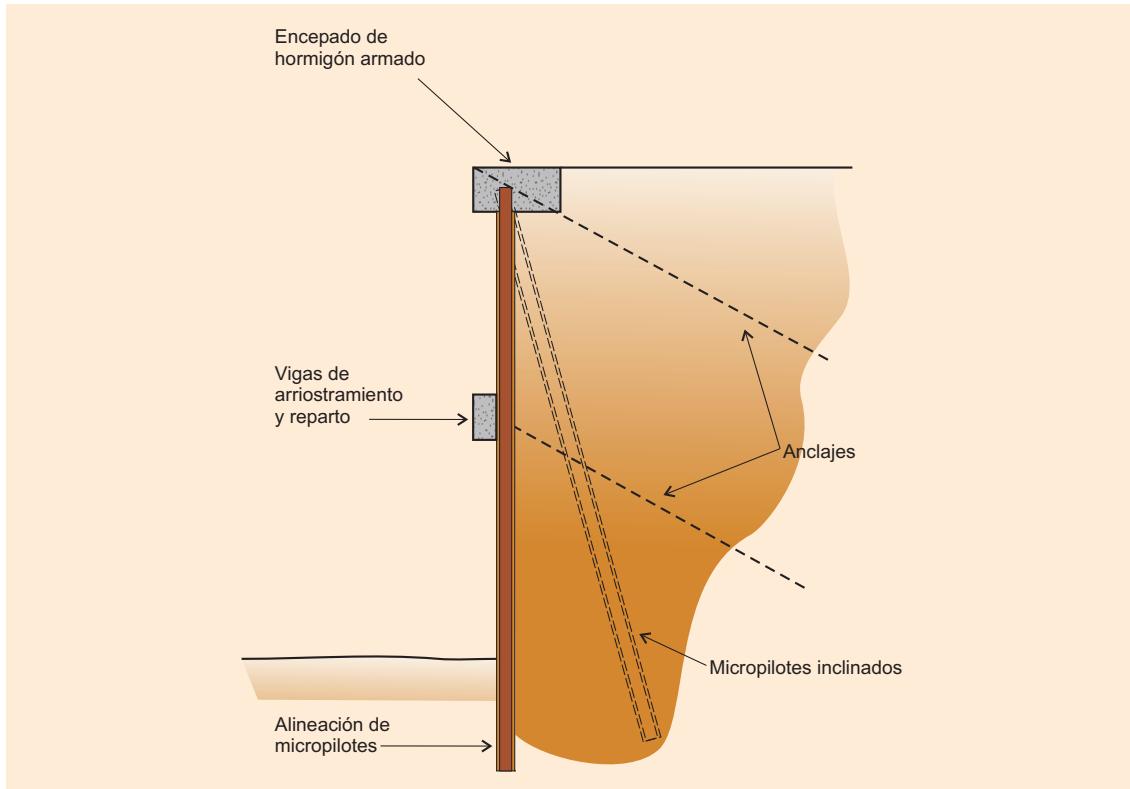


FIGURA 1.3. EJEMPLO DE MICROPILOTES COMO ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN O SOSTENIMIENTO

- c) **Estabilización de taludes o laderas:** se disponen formando alineaciones o grupos numerosos con varias inclinaciones y se encepan en cabeza, pudiendo ir acompañados de anclajes u otras unidades de obra.

Producen una mejora del coeficiente de seguridad global de los taludes o laderas por incremento de la resistencia al corte de las mismas, evaluada según potenciales superficies de rotura, que comprenden secciones transversales a la alineación de micropilotes.

² A los efectos de esta Guía se utilizan, de conformidad con lo especificado en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera* y en *Tipología de muros de carretera*, los conceptos de **estructura de contención** como obra que contiene terrenos, exteriores a la carretera, respecto a la misma y de **estructura de sostenimiento** como obra de sujeción, generalmente de rellenos, sobre la que se sitúa la propia plataforma de la carretera.

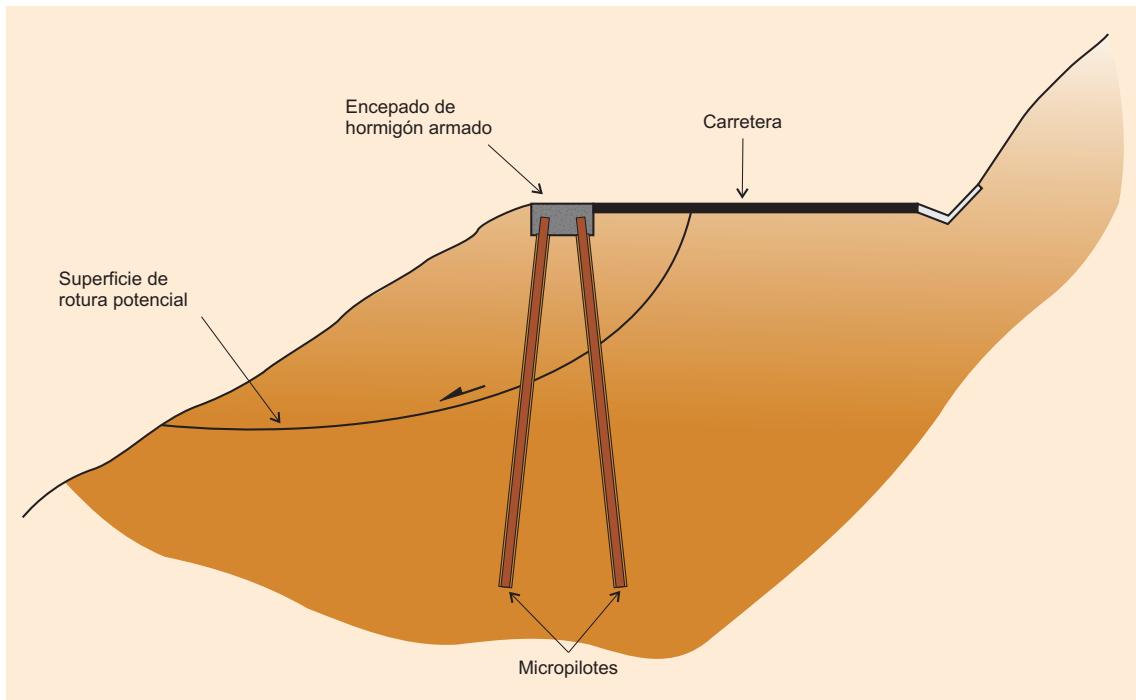


FIGURA 1.4. EJEMPLO DE MICROPILOTES PARA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES O LADERAS

- d) **Paraguas de sostenimiento:** ejecutados como sostenimiento del terreno en la excavación de túneles, normalmente antes de la fase de avance, bien con carácter general en toda una obra, en emboquilles, zonas de especial dificultad, etc.

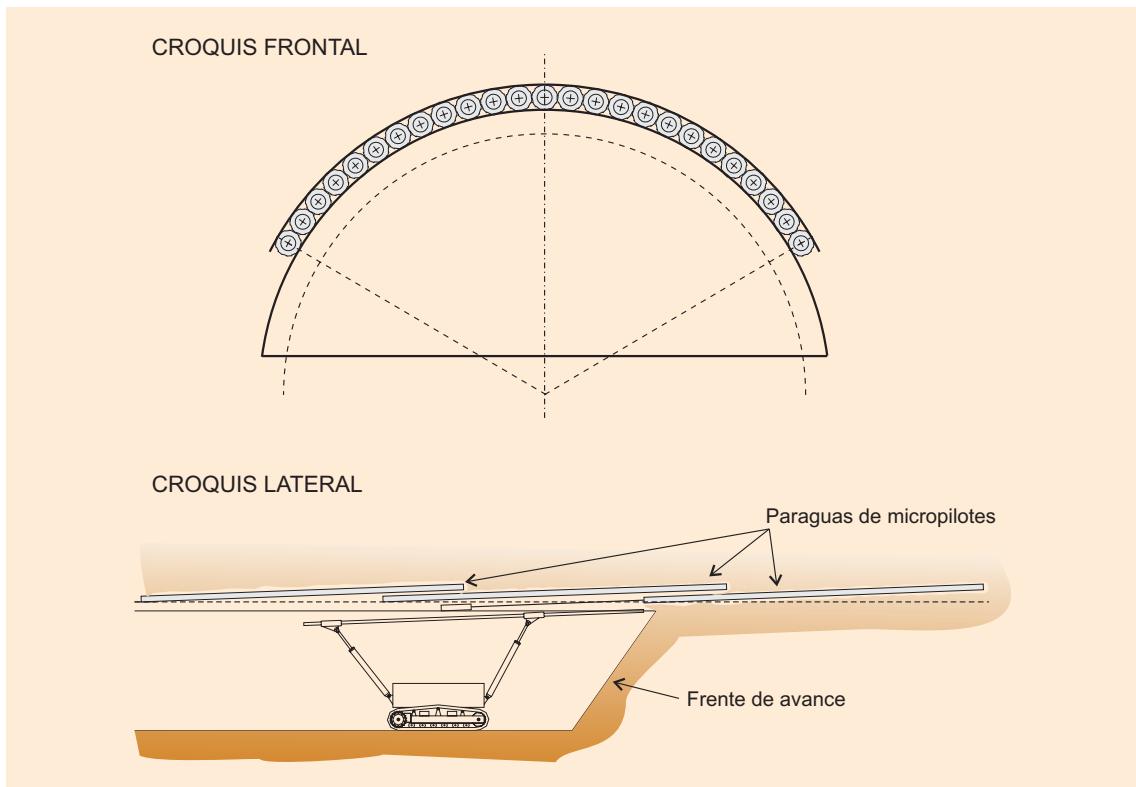


FIGURA 1.5. EJEMPLO DE MICROPILOTES COMO PARAGUAS DE SOSTENIMIENTO

- e) **Mejora del terreno:** pretenden el aumento de la capacidad de soporte global de una masa de terreno y la reducción de asientos de las estructuras, cimentadas posteriormente sobre el mismo.

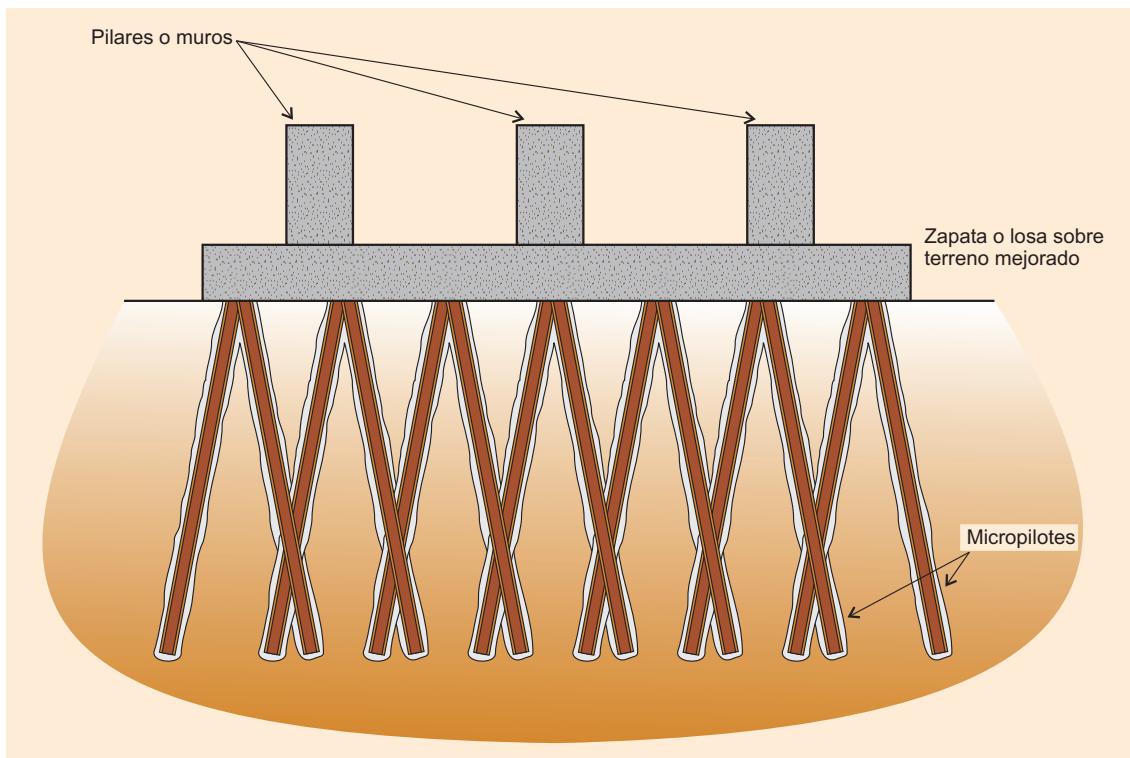


FIGURA 1.6. EJEMPLO DE MICROPILOTES COMO MEJORA DEL TERRENO

2.1. ARMADURAS

La armadura de los micropilotes considerados en esta Guía estará constituida por un tubo de acero estructural, pudiendo estar complementada por una o varias barras corrugadas de acero situadas en su eje, o dispuestas en torno al mismo.

Según el proceso de fabricación empleado, la **armadura tubular** deberá cumplir lo especificado en una de las dos normas siguientes, según el caso de que se trate:

- UNE EN 10210. Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado de grano fino.
- UNE EN 10219. Perfiles huecos para construcción, conformados en frío, de acero no aleado y de grano fino.

En obras permanentes no se reutilizarán, como armaduras tubulares, perfiles procedentes de campañas petrolíferas, sondeos, o cualquier otra aplicación. Sin embargo, en obras auxiliares, en las que la función resistente se desempeñe en un plazo muy corto, se podrá contemplar el uso de esos materiales siempre que cumplan los mismos requisitos que los exigidos a las armaduras tubulares nuevas.

A efectos de cálculo, los límites elásticos de los aceros más habituales empleados como armadura tubular son los que figuran en la tabla 2.1.

TABLA 2.1. LÍMITE ELÁSTICO DE LOS ACEROS PARA LAS ARMADURAS TUBULARES, f_y

DESIGNACIÓN UNE EN 10027	LÍMITE ELÁSTICO f_y (MPa)
S 235	235
S 275	275
S 355	355
S 420	420
S 460	460

Para la armadura constituida por **barras corrugadas de acero**, se estará a lo dispuesto en el artículo 240 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE).

Los límites elásticos de los aceros de las barras corrugadas, de acuerdo con la *EHE*¹, son los que figuran en la tabla 2.2.

¹ Véase: *EHE*, apartado 31.2.

TABLA 2.2. LÍMITE ELÁSTICO DE LOS ACEROS PARA LAS BARRAS CORRUGADAS DE ACERO, f_{sk}

DESIGNACIÓN UNE EN 36068:94	LÍMITE ELÁSTICO f_{sk} (MPa)
B 400 S	400
B 500 S	500

Respecto al posible uso de barras de alto límite elástico, se estará a lo especificado al respecto en la *EHE*² para barras de pretensado.

Los empalmes en las armaduras tubulares se efectuarán por soldadura o por roscado; en las barras corrugadas serán de tipo mecánico³; cualquier otro tipo de empalme habrá de considerarse como excepcional, debiendo justificarse expresamente en el proyecto.

En el caso de que se empleen aceros laminados en las conexiones con las estructuras a recalzar, encepados o vigas riostras, estos deberán cumplir lo especificado en UNE EN 10025 y UNE EN 10113.

2.2. LECHADAS Y MORTEROS DE CEMENTO

2.2.1. CONSIDERACIONES GENERALES

El cemento para la fabricación de lechadas y morteros cumplirá lo especificado en las vigentes instrucciones para la Recepción de Cementos (RC), Hormigón Estructural⁴ (*EHE*) y artículo 202 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

Los cementos a utilizar para las lechadas y morteros de cemento serán los especificados por la *EHE* para cimentaciones de hormigón armado y su clase resistente será al menos 42,5 N. En caso de existir sustancias agresivas en el terreno, el cemento a utilizar deberá ser resistente al ataque de las mismas.

El agua⁵ de amasado y los aditivos⁶ deberán cumplir asimismo las especificaciones de la *EHE*.

A los efectos de esta Guía, se definen las **lechadas** como mezclas de cemento, agua y aditivos en su caso. Asimismo se denominan también lechadas⁷, aquellas mezclas que incluyan la adición de polvo mineral o arena de tamaño inferior a dos milímetros (2 mm) en cantidad, inferior en peso, a la total de cemento de la mezcla. Las mezclas que incluyan áridos que superen las limitaciones anteriores de tamaño máximo o de peso total, serán consideradas como **morteros**.

2.2.2. LECHADAS DE CEMENTO

La **resistencia característica** a compresión de la lechada a utilizar en micropilotes debe cumplir:

- A veintiocho días de edad (28 d) será superior o igual a veinticinco megapascales ($f_{ck} \geq 25$ MPa).
- A siete días de edad (7 d) será superior o igual que el sesenta por ciento de la requerida a los veintiocho días ($f_{ck,7} \geq 0,6 f_{ck}$).

² Véase: *EHE*, apartado 32.4.

³ Véase: *EHE*, apartado 66.6.

⁴ Véase: *EHE*, artículo 26.

⁵ Véase: *EHE*, artículo 27.

⁶ Véase: *EHE*, artículo 29.

⁷ Definición conforme a UNE EN 14199.

Los ensayos para determinar la resistencia de la lechada se efectuarán con probetas cilíndricas fabricadas, curadas y ensayadas a compresión, según la normativa⁸ indicada en la *EHE* para el control de la resistencia del hormigón.

Respecto a su **dosificación**, las lechadas de cemento deberán presentar alta resistencia y estabilidad, ser fácilmente bombeables y alcanzar la resistencia a compresión requerida.

La relación agua/cemento, en peso, deberá mantenerse aproximadamente entre cuarenta y cincuenta y cinco centésimas ($0,40 \leq a/c \leq 0,55$). En caso de que sea necesario recurrir a lechadas con relaciones agua/cemento por debajo de cuarenta centésimas ($a/c < 0,40$), normalmente deberán agregarse aditivos a las mismas para permitir que se puedan bombear de forma adecuada.

La exudación de la lechada⁹, determinada según se indica en la *EHE*, será menor o igual que el tres por ciento (3%) en volumen, transcurridas dos horas (2 h) desde la preparación de la mezcla.

2.2.3. MORTEROS DE CEMENTO

La **resistencia característica** a compresión a veintiocho días (28 d) de los morteros de cemento a utilizar en micropilotes, será superior o igual a veinticinco megapascales ($f_{ck} \geq 25 \text{ MPa}$).

Los ensayos para determinar la resistencia del mortero se efectuarán con probetas cilíndricas fabricadas, curadas y ensayadas a compresión a veintiocho días (28 d) de edad según la normativa¹⁰ indicada en la *EHE* para el control de la resistencia del hormigón.

Respecto a su **dosificación**, los morteros deberán presentar un contenido mínimo de cemento de trescientos setenta y cinco kilogramos por metro cúbico (375 kg/m^3), salvo especificación expresa del proyecto.

Su relación agua/cemento, en peso, deberá ser inferior a sesenta centésimas ($a/c < 0,60$) y la distribución granulométrica del árido a emplear deberá cumplir:

$$D_{85} \leq 4 \text{ mm}$$

$$D_{100} \leq 8 \text{ mm}$$

donde:

D_x : Tamiz por el que pasa el $x\%$ de la muestra.

La arena de los morteros deberá cumplir las especificaciones recogidas en la *EHE*, estar limpia y seca, y normalmente no contener partículas que pasen por el tamiz 0,16 UNE. Las arenas rodadas, en general, mejoran la inyectabilidad de la mezcla.

2.3. PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

2.3.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Las armaduras de los micropilotes y el resto de elementos metálicos de los mismos, como por ejemplo los de unión, deberán estar protegidos frente a la corrosión durante su vida útil.

El sistema de protección considerado en esta Guía se basa en la disposición de un recubrimiento mínimo de la armadura, mediante lechada o mortero de cemento y en la consideración de una reducción del espesor de acero debida a la corrosión.

⁸ Véase: *EHE*, artículo 84.

⁹ Véase: *EHE*, anexo 6.

¹⁰ Véase: *EHE*, artículo 84.

Para micropilotes en ambientes agresivos, el proyecto podrá disponer protecciones adicionales, tales como:

- Uso de cementos y aceros especiales.
- Recubrimientos superiores a los especificados en la tabla 2.3.
- Protección catódica.
- Entubación permanente en el tramo de terreno considerado como agresivo.
- Tratamiento superficial.
- Otros sistemas.

2.3.2. RECURBIMIENTO MÍNIMO

En las aplicaciones consideradas en esta Guía, debe procurarse que las armaduras tubulares no actúen como sostenimiento de la perforación. Se recomienda que la punta de la armadura no apoye directamente sobre el fondo y que el recubrimiento mínimo entre armadura y terreno se materialice mediante centradores.

Los valores mínimos del recubrimiento se deberán tomar de la tabla 2.3, debiendo garantizarse, incluso en las secciones de empalme de las armaduras.

TABLA 2.3. RECURBIMIENTOS MÍNIMOS, r (mm)

	LECHADA	MORTERO
Compresión	20	30
Tracción	25	35

La diferencia entre el diámetro de perforación y el exterior de la armadura tubular, debe ser mayor o igual que el doble del recubrimiento previsto ($D_p - d_e \geq 2r$), si bien es recomendable que esta distancia sea algo mayor, en función del tipo de ejecución, de las características de los centradores empleados, etc.

2.3.3. REDUCCIÓN DE ESPESOR

En el cálculo de la resistencia estructural de los micropilotes, deberá tenerse en cuenta la correspondiente reducción de espesor de las armaduras por corrosión, en función de la vida útil de la estructura proyectada y de las características del terreno.

Salvo justificación expresa del proyecto, la reducción de espesor de la armadura que debe considerarse, a causa de la corrosión, por el contacto del micropilote con el terreno (con o sin presencia de agua subterránea) será mayor o igual que la reflejada en la tabla 2.4.

TABLA 2.4. REDUCCIÓN DE ESPESOR DE ARMADURA POR EFECTO DE LA CORROSIÓN¹, r_e (mm)

TIPO DE TERRENO	VIDA ÚTIL REQUERIDA AL MICROPILOTE ³ (años)				
	5	25	50	75	100
Suelos naturales sin alterar	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Suelos naturales contaminados o suelos industriales	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Suelos naturales agresivos (turbas, ciénagas, etc.)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Rellenos no agresivos sin compactar ²	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Rellenos agresivos sin compactar (cenizas, escorias, etc.) ²	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

¹ Según UNE EN 14199.² La corrosión es menor en rellenos compactados que en rellenos sin compactar; así, en los compactados, los valores reflejados en esta tabla pueden reducirse hasta la mitad.³ Los valores dados para 5 y 25 años se basan en mediciones reales, mientras que en los demás casos se han obtenido como resultado de extrapolaciones.

3.1. ESTADOS LÍMITE

3.1.1. INTRODUCCIÓN

El cálculo de los micropilotes requiere el conocimiento previo de los esfuerzos actuantes, transmitidos por la estructura a cimentar o recalzar, por el macizo de terreno a estabilizar, etc. Lo relativo a situaciones de proyecto, acciones y características del terreno, deberá abordarse de conformidad con lo especificado en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.

En esta Guía se aplica un procedimiento de análisis basado en coeficientes de seguridad parciales. Cuando se trate de micropilotes en cimentaciones, las acciones que habrán de considerarse para definir las diferentes situaciones de proyecto susceptibles de análisis, serán esencialmente las reacciones en los apoyos de la estructura correspondiente, para cargas mayoradas de acuerdo con la *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carreteras (IAP)* y la *EHE*.

En algunos casos de micropilotes dispuestos para contención del terreno, como estabilización de laderas o paraguas en túneles, se pueden seguir métodos basados en coeficientes de seguridad globales como los expuestos en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. En el apartado 3.10 de este documento se efectúan algunas indicaciones para el cálculo de esfuerzos en dichas aplicaciones.

Con carácter general, y de conformidad con lo especificado al respecto en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, deberán efectuarse las siguientes comprobaciones:

- Estados límite últimos:
 - Fallo de estabilidad global.
 - Fallo de capacidad de soporte del terreno.
 - Fallo estructural.
 - Socavación del cimiento.
- Estados límite de servicio.
- Otras comprobaciones.

3.1.2. ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS

Dan lugar a una situación de ruina o fallo del cimiento. Entre los estados límite últimos habrán de comprobarse, en todo caso, los que se citan a continuación:

Fallo de estabilidad global

Esta comprobación requiere suponer varias superficies de rotura que engloben a toda la cimentación, o a parte de ella, y analizar su estabilidad, en general, a partir de métodos de cálculo de

equilibrio límite. Los requisitos a satisfacer y los procedimientos de evaluación serán los indicados en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*¹.

Fallo de capacidad de soporte del terreno

El fallo del cimiento puede producirse por falta de resistencia del terreno, de los siguientes modos:

- *Hundimiento*: Cuando la capacidad de soporte del terreno es inferior a la carga (de compresión) que transmite el micropilote al terreno.
- *Arranque*: Cuando en micropilotes sometidos a esfuerzos de tracción se alcanza el agotamiento por esfuerzo rasante en el fuste.
- *Rotura horizontal del terreno*: Cuando en micropilotes de eje aproximadamente vertical, las presiones horizontales agotan la capacidad del terreno.

Fallo estructural

Deberán analizarse los siguientes modos de fallo:

- *Fallo estructural de los micropilotes*: Cuando los esfuerzos transmitidos superan la resistencia del micropilote como elemento estructural.
- *Fallo de conexión con la estructura*: Cuando los esfuerzos transmitidos superan la resistencia de la conexión entre el micropilote y la estructura de cimentación de la que forma parte, o el encepado que une sus cabezas, según el caso.

Socavación del cimiento

Su consideración como estado límite en la comprobación de cimentaciones deberá abordarse de conformidad con lo especificado al respecto en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, si bien su análisis específico excede el contenido de este documento.

3.1.3. ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

No implican la ruina o fallo del cimiento, aunque sí suponen una limitación de su capacidad funcional, estética, etc. Deberán abordarse con carácter general, según lo especificado en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.

El estado límite de servicio debido a los asientos podrá abordarse con la metodología de cálculo prevista en este documento. No obstante lo anterior, hay que tener en cuenta que los asientos del micropilote pueden originar un estado límite último por daños en la estructura soportada.

3.1.4. COMPROBACIONES ADICIONALES

En determinadas circunstancias serán necesarias otras comprobaciones adicionales entre las que pueden citarse:

- Estabilidad de los taludes de las excavaciones y plataformas realizadas para construir los micropilotes.

¹ Véase: *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, apartado 4.4.

- Expansividad del terreno, que puede provocar cierto levantamiento de la cimentación.
- Problemas de colapsabilidad en suelos.
- Heladidicidad del terreno, que puede afectar a encepados poco empotrados en el mismo.
- Ataque químico, del terreno o de las aguas, a los micropilotes.
- Posible contaminación debida a materiales que se utilicen en la perforación.
- Posibles efectos sísmicos y en particular la licuación del terreno en el entorno del cimiento.
- Erosión localizada por escorrentía.
- Cualquier otro fenómeno ligado a condiciones especiales de cimentación de las obras de que en cada caso se trate.

En el proyecto deberá hacerse mención expresa de la consideración de cada uno de los aspectos indicados en la lista precedente, así como de cualquier otra singularidad propia del emplazamiento de la cimentación, adicional a las de la relación anterior.

3.2. COMPROBACIONES ESPECÍFICAS A EFECTUAR EN LAS APLICACIONES MÁS USUALES

3.2.1. COMPROBACIONES ESPECÍFICAS

Para cada **modo de fallo**, la **capacidad resistente** del micropilote o del conjunto micropilote-terreno, deberá cumplir:

$$R_d \geq E_d$$

donde:

R_d : Resistencia de cálculo frente a un determinado modo de fallo, obtenida a partir de valores característicos (de las propiedades resistentes de los materiales o del terreno) minorados.

E_d : Esfuerzo de cálculo para un determinado modo de fallo, obtenido a partir de acciones mayoradas.

Si se siguieran métodos de cálculo basados en coeficientes de seguridad globales, la comprobación se efectuaría según la metodología presentada en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.

En los siguientes apartados se indican algunos criterios básicos de comprobación específica de los micropilotes para diferentes modos de fallo, si bien se deberá estar, en todo caso, a lo especificado con carácter general en el epígrafe 3.1 de este documento.

En el caso de micropilotes verticales sometidos simultáneamente a esfuerzos axiles y laterales, el análisis de los mismos, en relación con su rigidez y desplazamientos, se podrá efectuar de manera independiente, estudiando por separado el comportamiento frente a cargas axiles y frente a cargas laterales². Este principio resulta válido asimismo, para el estudio de micropilotes cuyas inclinaciones estén comprendidas entre 0 y 20° respecto de la vertical, que se podrán estudiar descomponiendo la carga en dos direcciones, una axial y otra transversal.

La inclinación de la carga respecto al eje del micropilote produce, en general, una reducción de su capacidad de soporte en las direcciones axial y lateral. En micropilotes verticales con una carga inclinada un ángulo a respecto a la vertical, la resistencia de cálculo se puede aproximar mediante la expresión:

² En cálculos con modelos tridimensionales de elementos finitos descritos en *Forever* (véase apéndice 8) se ha puesto de manifiesto que el comportamiento del micropilote en dirección lateral es independiente de la carga axial, pero que la rigidez frente a la carga axial puede aumentar con la existencia de la carga lateral. Este último aspecto puede despreciarse, quedando del lado de la seguridad.

$$\left(\frac{R_{\alpha,d}}{R_{c,d}} \cos \alpha\right)^2 + \left(\frac{R_{\alpha,d}}{R_{h,d}} \operatorname{sen} \alpha\right)^2 = 1$$

donde:

$R_{\alpha,d}$: Resistencia de cálculo frente a una carga que forma un ángulo α con la vertical.

$R_{c,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento. Si el sentido de la carga es de arranque debe tomarse la resistencia de cálculo frente a esfuerzos de tracción, $R_{t,d}$.

$R_{h,d}$: Resistencia de cálculo frente a carga horizontal.

3.2.2. APLICACIONES MÁS USUALES

La clasificación funcional efectuada en el capítulo 1 de esta Guía, junto con la relación de comprobaciones genéricas del apartado 3.1, permiten definir, para las aplicaciones más habituales, las comprobaciones específicas que deben plantearse en el proyecto de micropilotes.

No obstante lo anterior, debe entenderse que la relación que se presenta a continuación no será aplicable a todos los casos, sino únicamente a los de más frecuente aparición, y que la comprobación exhaustiva de los estados límite últimos, deberá efectuarse de conformidad con lo especificado en el epígrafe 3.1 de este documento y en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. En este apartado se presentan únicamente aquellos aspectos no recogidos en dicha publicación que resultan específicos para micropilotes.

Tal y como se ha puesto de manifiesto en 3.1.2, los estados límite últimos de estabilidad global y socavación del cimiento no implican una metodología de cálculo específica por tratarse de micropilotes. Por el contrario, los estados límite últimos de falta de capacidad de soporte del terreno de cimentación y de agotamiento estructural del micropilote, se abordan en esta Guía mediante métodos de cálculo concebidos expresamente para micropilotes.

De acuerdo con las aplicaciones indicadas en el apartado 1.4 de esta Guía, los **esfuerzos** más importantes y los **modos de fallo** a considerar en el cálculo de los micropilotes, en la mayoría de los casos, son:

- a) En **estructuras de cimentación**, tanto en obras de nueva planta como de refuerzo o recalce, en general, los micropilotes se deberán proyectar para que trabajen sometidos a esfuerzos axiles, fundamentalmente de compresión y en ocasiones de tracción.

Cuando la cimentación esté sometida a esfuerzos horizontales significativos, se podrán disponer micropilotes inclinados para absorber la componente horizontal de la carga, o parte de la misma.

Los modos de fallo más típicos para esta aplicación son los de:

- Hundimiento.
- Arranque.
- Rotura del terreno por esfuerzos horizontales.
- Fallo estructural de los micropilotes.
- Fallo de la conexión con la estructura.

En las aplicaciones de los micropilotes como elementos de cimentación, se deberán comprobar además los asientos, según se especifica en los apartados 3.7 y 3.8 de esta Guía.

- b) En **estructuras de contención o sostenimiento del terreno** los micropilotes estarán sometidos fundamentalmente a esfuerzos de flexión, cortante y, según su disposición, a esfuerzos de tracción o compresión.

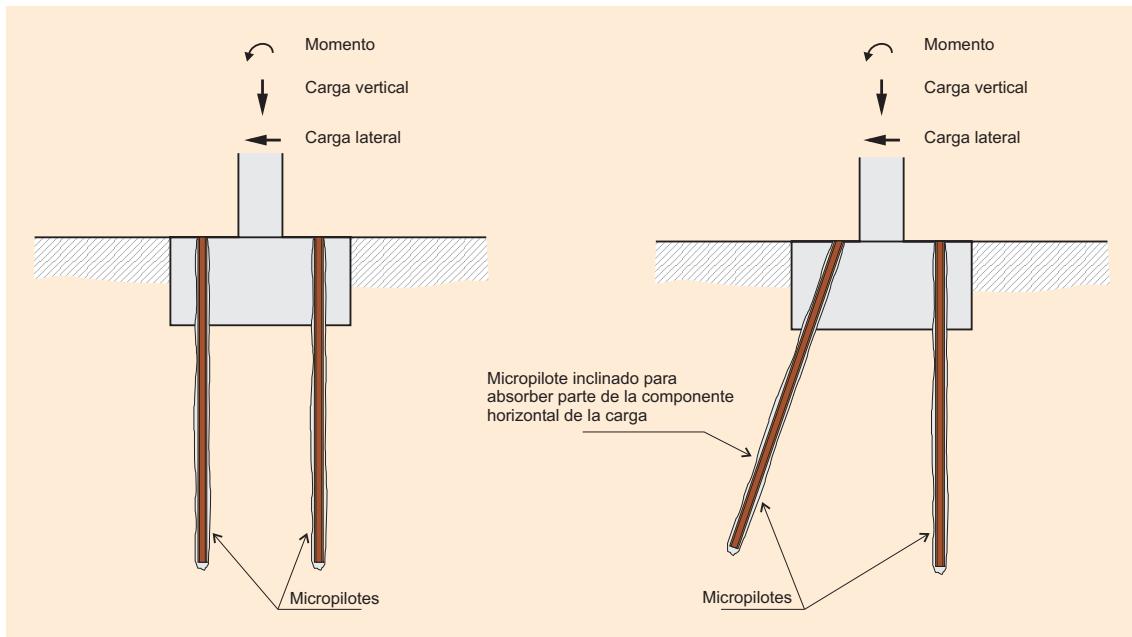


FIGURA 3.1. MICROPILOTES EN ESTRUCTURAS DE CIMENTACIÓN. ACCIONES A CONSIDERAR EN LOS CASOS MÁS HABITUALES

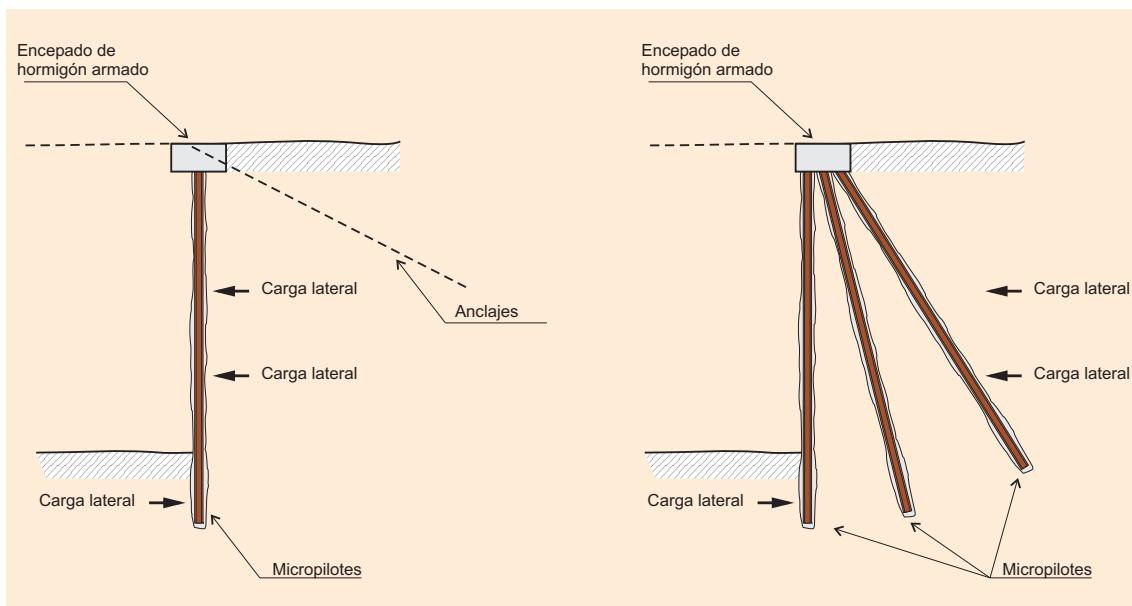


FIGURA 3.2. MICROPILOTES EN ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN O SOSTENIMIENTO DEL TERRENO. ACCIONES A CONSIDERAR EN LOS CASOS MÁS HABITUALES

Los modos de fallo más típicos para esta aplicación son los de:

- Fallo de estabilidad global.
 - Fallo estructural de los micropilotos.
 - Fallo de la conexión con el encepado.
- c) En **estabilización de terrenos** los esfuerzos transmitidos a los micropilotos serán fundamentalmente de cortante y de flexión.

Los modos de fallo más típicos para esta aplicación son los de:

- Fallo de estabilidad global.

- Fallo estructural de los micropilotes.
 - Fallo de la conexión con el encepado.
- d) En **paraguas de sostenimiento** los esfuerzos a los que se encuentran sometidos los micropilotes serán principalmente de flexión y cortante.
Los modos de fallo más típicos para esta aplicación son los de:
- Fallo estructural de los micropilotes.
- e) En **aplicaciones de mejora del terreno**: los esfuerzos transmitidos a los micropilotes son básicamente de compresión.
Los modos de fallo más típicos para esta aplicación son los de:
- Hundimiento.
 - Fallo estructural de los micropilotes.

3.3. COMPROBACIÓN FREnte AL HUNDIMIENTO

3.3.1. RESISTENCIA DE CÁLCULO FREnte AL MODO DE FALLO DE HUNDIMIENTO

El valor de la resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento $R_{c,d}$, deberá ser mayor o igual que el esfuerzo axil (compresión) de cálculo transmitido por la estructura en la hipótesis más desfavorable $N_{c,Ed}$, es decir:

$$R_{c,d} \geq N_{c,Ed}$$

donde:

$R_{c,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento (esfuerzo axil de compresión).

$N_{c,Ed}$: Esfuerzo axil de cálculo (compresión), obtenido a partir de acciones mayoradas.

La resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento será la suma de las resistencias de cálculo por fuste y por punta en su caso, las cuales dependen tanto de las características del micropilote, como del terreno de su entorno.

3.3.1.1. En suelos

Para poder considerar la resistencia por punta es preciso que se verifique, simultáneamente, en la zona de influencia de la misma³, que:

- En terrenos **granulares**⁴ el índice N del ensayo SPT según UNE 103800 sea superior a treinta⁵ ($N > 30$), es decir, compacidad densa a muy densa.

³ De acuerdo con lo especificado en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera* (epígrafe 5.10.2), el valor de cálculo de un determinado parámetro resistente correspondiente a la punta –en este caso N ó q_u – será la semisuma del que se asigne a la zona activa inferior (desde el plano de la punta, hasta tres diámetros nominales bajo el mismo, 3D) y a la zona pasiva superior (desde seis diámetros nominales, 6D, sobre el plano de la punta, hasta alcanzar éste). A su vez, el valor que se asigne a cada una de estas dos zonas, debe ser una estimación prudente del parámetro en cuestión dentro de las mismas.

⁴ A los efectos de esta Guía, se considera terreno granular, aquel cuyo cernido por el tamiz 0,080 UNE sea inferior al quince por ciento ($\# 0,080 \text{ mm} < 15\%$), y terreno cohesivo aquel cuyo cernido por el tamiz 0,080 UNE sea superior al treinta y cinco por ciento ($\# 0,080 \text{ mm} > 35\%$). En los casos comprendidos entre los límites anteriores y, sobre todo, en suelos saturados, será conveniente efectuar ambas hipótesis de comportamiento y adoptar finalmente la más pesimista respecto a la seguridad.

⁵ Los índices N del ensayo SPT deben ser corregidos por el efecto de la sobrecarga de tierras y normalizados a la energía estándar del sesenta por ciento (60%). Véase: *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, epígrafes 3.4.1.1, 4.5.2.1 y 5.10.2.1.

En terrenos **cohesivos** la resistencia a compresión simple del terreno, según UNE 103400, o mediante correlación con otros ensayos, sea superior a cien kilopascales ($q_u > 100 \text{ kPa}$), es decir, consistencia firme, muy firme o dura.

- La longitud de empotramiento en el terreno de las características recién referidas, debe ser superior o igual a seis diámetros nominales ($L_{\text{emp}} \geq 6D$), medidos sobre el plano de la punta.

De acuerdo con lo inmediatamente expuesto, la resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento $R_{c,d}$, en micropilotes sometidos a esfuerzos de compresión habrá de determinarse de alguna de las dos maneras que se indican a continuación, según pueda o no considerarse la contribución de la punta:

- a) Cuando **no pueda considerarse la resistencia por punta** habrá de tenerse en cuenta únicamente la resistencia por fuste de cálculo del micropilote $R_{fc,d}$:

$$R_{c,d} = R_{fc,d} = A_L \cdot r_{fc,d}$$

donde:

$R_{c,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento.

$R_{fc,d}$: Resistencia por fuste de cálculo frente a esfuerzos de compresión. Deberá deducirse de pruebas de carga según se especifica en el epígrafe 3.3.2.2, o en su defecto, calcularse a partir de estimaciones del rozamiento unitario por fuste.

A_L : Área lateral del micropilote. Deberá determinarse a partir del diámetro nominal⁶, D.

$r_{fc,d}$: Rozamiento unitario por fuste de cálculo frente a esfuerzos de compresión. Se obtendrá su valor de acuerdo con lo especificado en el epígrafe 3.3.2.

La expresión anterior resulta de aplicación en terrenos homogéneos; cuando se atravesen n horizontes de distinta naturaleza, deberá efectuarse una discretización y considerarse el producto del área lateral del micropilote en cada zona, por su rozamiento unitario por fuste de cálculo. Es decir:

$$R_{fc,d} = \sum_{i=1}^n A_{Li} \cdot (r_{fc,d})_i$$

donde:

n: Número de tramos que comprende la discretización.

A_{Li} : Área lateral del micropilote en la zona comprendida dentro del tramo i-ésimo de la discretización efectuada.

$(r_{fc,d})_i$: Rozamiento unitario por fuste de cálculo en el tramo i-ésimo de la discretización efectuada.

- b) Cuando **pueda considerarse la resistencia por punta**, la resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento $R_{c,d}$, será la suma de las resistencias por punta y fuste:

$$R_{c,d} = R_{p,d} + R_{fc,d}$$

donde:

$R_{c,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento.

⁶ Diámetro del micropilote considerado a efectos de cálculo, que será menor o igual que el de perforación (véase epígrafe 4.2.1).

$R_{p,d}$: Resistencia por punta de cálculo. Deberá determinarse según se especifique en el epígrafe 3.3.3.

$R_{fc,d}$: Resistencia por fuste de cálculo frente a esfuerzos de compresión. Deberá determinarse según se especifica en 3.3.1.1.a.

3.3.1.2. En roca

Para poder considerar que el micropilote está empotrado en roca es preciso que en la zona de influencia de la punta⁷ se cumpla, simultáneamente:

- La roca presente un grado de meteorización inferior o igual a III según la escala ISRM (véase apéndice A-6.1), el índice RQD sea superior a sesenta ($RQD > 60\%$) y la resistencia a compresión simple de la roca sea superior a veinte megapascales ($q_u > 20 \text{ MPa}$) determinada preferiblemente según UNE 22950-1, o en su defecto mediante correlación con otros ensayos.
- El empotramiento en el terreno de las características que se acaban de describir sea superior o igual a seis diámetros nominales ($L_{emp} \geq 6D$), medidos sobre el plano de la punta.

En tales circunstancias, la resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento $R_{c,d}$ será la proporcionada por el empotramiento, es decir:

$$R_{c,d} = R_{e,d}$$

donde:

$R_{c,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento.

$R_{e,d}$: Resistencia de cálculo en el empotramiento en roca. Deberá determinarse según se indica en el epígrafe 3.3.3.

En caso de que no se cumplan los requisitos especificados para poder considerar que el micropilote está empotrado en roca, se analizará el caso como si se tratase de un micropilote en suelos, conforme a lo indicado en 3.3.1.1.

3.3.2. RESISTENCIA DE CÁLCULO POR FUSTE

3.3.2.1. Sistemas de cálculo

La resistencia de cálculo por fuste $R_{fc,d}$, se puede obtener mediante ensayos de carga, o a partir del valor del rozamiento unitario por fuste de cálculo, deducido por métodos teóricos o correlaciones empíricas.

Los valores más representativos son los obtenidos en pruebas de carga realizadas sobre micropilotes del mismo tipo y dimensiones y en el mismo terreno que los que se vayan a ejecutar.

Para la adopción del valor de cálculo correspondiente al rozamiento unitario por fuste $r_{fc,d}$, se seguirá el siguiente orden de prelación:

- En primer lugar, y con carácter preferente, a partir de ensayos de carga «in situ», según los criterios especificados en el epígrafe 3.3.2.2.

⁷ De acuerdo con lo especificado en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera* (véase epígrafe 5.10.2), el valor de cálculo de un determinado parámetro resistente correspondiente a la punta —en este caso el grado de meteorización, el índice RQD, o la resistencia a compresión simple q_u — será la semisuma del que se asigne a la zona activa inferior (desde el plano de la punta, hasta tres diámetros nominales bajo el mismo, 3D) y a la zona pasiva superior (desde seis diámetros nominales, 6D, sobre el plano de la punta, hasta alcanzar éste). A su vez, el valor que se asigne a cada una de estas dos zonas, debe ser una estimación prudente del parámetro en cuestión dentro de las mismas.

- En ausencia de los referidos ensayos de carga, se adoptará el valor que se considere como más representativo de entre los siguientes:
 - El obtenido por el método teórico (véase epígrafe 3.3.2.3).
 - El obtenido por correlaciones empíricas (véase epígrafe 3.3.2.4).

En caso de que el micropilote atraviese cavidades o huecos, deberá considerarse nula la resistencia por fuste en el tramo en cuestión. También se considerará nula la resistencia por fuste en los tramos en los que, por cualquier circunstancia, se deje una tubería de revestimiento de forma permanente (camisa perdida), salvo justificación del proyecto.

3.3.2.2. Pruebas de carga

Los cálculos asociados al estudio de las cimentaciones profundas pueden resultar, en ocasiones, poco precisos y por ello la realización de ensayos o pruebas de carga resulta especialmente recomendable.

Las pruebas de carga conviene que se realicen sobre micropilotos de las mismas dimensiones (longitud y diámetro) que aquellos a cuyo estudio vayan a aplicarse los resultados, para evitar la consideración del efecto escala. Asimismo, estas pruebas deben realizarse sobre micropilotos construidos en terrenos semejantes a los del caso estudiado, preferiblemente en la propia obra y, sobre todo, deben ser construidos con técnicas análogas.

La máxima utilidad de los ensayos de carga se obtiene cuando los micropilotos ensayados son aquellos cuyo comportamiento se quiere conocer. En tales circunstancias, aunque no se alcance la carga de hundimiento, puede definirse con bastante precisión la deformabilidad de la cimentación.

Los ensayos de carga vertical de compresión hasta provocar el hundimiento, presentan el inconveniente de tener que proporcionar una reacción vertical suficientemente elevada, lo que normalmente se consigue con lastre o mediante el empleo de elementos de tracción construidos en el entorno: por lo general, otros micropilotos o anclajes dispuestos con este propósito.

En el apéndice 2 se incluye tanto la metodología recomendada para la obtención de la resistencia por fuste a partir de los resultados de pruebas de carga, como una serie de aspectos relativos a su realización.

3.3.2.3. Método teórico

El rozamiento unitario por fuste de cálculo a una determinada profundidad z , podrá obtenerse como:

$$r_{fc,d}(z) = \frac{c'}{F_c} + \sigma'_H(z) \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{F_\phi}$$

donde:

- $r_{fc,d}$: Rozamiento unitario por fuste de cálculo frente a esfuerzos de compresión.
- z : Profundidad, medida verticalmente desde la superficie del terreno.
- c' : Cohesión efectiva del terreno natural a la profundidad z . Puede determinarse mediante ensayos triaxiales según UNE 103402, o de corte directo según UNE 103401, con consolidación y con drenaje (CD). También pueden emplearse datos deducidos de ensayos de campo, observación del comportamiento de estructuras enterradas, etc.

En general, salvo que se tenga un conocimiento muy exhaustivo acerca de este parámetro en el terreno concreto a estudiar, se recomienda reducir el valor de la cohesión

efectiva deducida por estos sistemas, llegando incluso a considerarla nula ($c' = 0$) en el caso de valores poco representativos.

- δ : Ángulo de rozamiento del contacto terreno-fuste del micropilote, a la profundidad z . Es una fracción del ángulo de rozamiento interno efectivo del terreno ϕ' , que puede determinarse mediante ensayo de corte directo según UNE 103401, con consolidación y con drenaje⁸ (CD). También pueden emplearse datos deducidos de ensayos de campo, observación del comportamiento de estructuras enterradas, etc.

Resulta habitual considerar $\delta = k_r \cdot \phi'$

donde:

k_r : Relación entre los ángulos de rozamiento del contacto terreno-fuste e interno del terreno. Es un coeficiente comprendido habitualmente, para micropilotes, entre dos tercios y la unidad ($2/3 \leq k_r \leq 1$).

$\sigma'_H(z)$: Presión horizontal efectiva del terreno a la profundidad z . Se determinará como se indica a continuación, dependiendo del tipo de inyección:

- Inyecciones tipo IR ó IRS, con registro de presiones de inyección, para profundidades superiores a cinco metros ($z \geq 5$ m):

$$\sigma'_H(z) = k_o \cdot \sigma'_v(z) + \frac{p_i}{3}$$

- Resto de casos:

$$\sigma'_H(z) = k_o \cdot \sigma'_v(z)$$

donde:

$\sigma'_v(z)$: Presión vertical efectiva del terreno a la profundidad z .

p_i : Presión de inyección. Sólo se considerará no nula ($p_i \neq 0$) en micropilotes tipo IR ó IRS con registro de presiones de inyección, para zonas del fuste que se encuentren a una profundidad superior a cinco metros ($z \geq 5$ m); en caso contrario deberá considerarse de valor nulo ($p_i = 0$).

k_o : Coeficiente de empuje al reposo⁹.

F_c, F_ϕ : Coeficientes de minoración que dependen del tipo de aplicación y que pueden obtenerse de la tabla 3.1.

⁸ Como alternativa a los ensayos con consolidación y drenaje (CD), se puede considerar la opción de efectuar ensayos triaxiales consolidados no drenados (CU) con medida de presiones intersticiales.

⁹ La determinación de este parámetro excede el contenido de este documento. A falta de información más precisa, en terrenos con superficie horizontal, puede considerarse:

- Terrenos normalmente consolidados:

$$k_o = (1 - \operatorname{sen} \phi')$$

- Terrenos sobreconsolidados:

$$k_o = (1 - \operatorname{sen} \phi') \sqrt{R_{oc}}$$

donde:

ϕ' = Ángulo de rozamiento interno efectivo del terreno, determinado según se especifica en 3.3.2.3.

R_{oc} = Razón de sobreconsolidación. Se define como el cociente entre la máxima presión efectiva vertical a que un determinado punto de un suelo ha estado sometido en cualquier época y la que presenta en la actualidad.

TABLA 3.1. COEFICIENTES F_c , F_ϕ

TIPO DE APLICACIÓN	F_c	F_ϕ
Estructuras de cimentación de nueva construcción	1,50	1,50
Recalce de estructuras de cimentación preexistentes	1,20	1,20

Situaciones de corto plazo

Para el caso de micropilotes cuyo fuste esté en contacto con suelos arcillosos saturados y para el análisis concreto de situaciones de corto plazo¹⁰, el rozamiento unitario por fuste de cálculo, se obtendrá como:

$$r_{fc,d} = \frac{s_u}{F_{cu}}$$

donde:

$r_{fc,d}$: Rozamiento unitario por fuste de cálculo frente a esfuerzos de compresión.

s_u : Resistencia al corte sin drenaje del terreno natural a la profundidad z. En general es equivalente a la mitad de la resistencia a la compresión simple del terreno en cuestión, salvo en arcillas fisuradas en las cuales se debe obtener a partir de ensayos triaxiales sin consolidación y sin drenaje (UU) según UNE 103402. También puede obtenerse «in situ», mediante el ensayo de molinete.

F_{cu} : Coeficiente de minoración, cuyo valor puede considerarse un noventa por ciento del coeficiente F_c , obtenido de la tabla 3.1.

$$F_{cu} = 0,90 F_c$$

3.3.2.4. Correlaciones empíricas

Utilizando correlaciones empíricas, el rozamiento unitario por fuste de cálculo se obtiene mediante la expresión:

$$r_{fc,d} = \frac{r_{f,lim}}{F_r}$$

donde:

$r_{fc,d}$: Rozamiento unitario por fuste de cálculo frente a esfuerzos de compresión.

$r_{f,lim}$: Rozamiento unitario límite por fuste. Puede obtenerse a partir de la figura 3.3, siempre que se cumplan los criterios de aplicabilidad de dicha figura, que se refieren en este mismo epígrafe.

F_r : Coeficiente de minoración que tiene en cuenta la duración de la función estructural de los micropilotes, que puede obtenerse de la tabla 3.2.

¹⁰ Véase: *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, apartado 2.8.

TABLA 3.2. COEFICIENTE F_r

DURACIÓN	F_r
Obras donde los micropilotes tienen una función estructural de duración inferior o igual a seis (6) meses	1,45
Obras donde los micropilotes tienen una función estructural de duración superior a seis (6) meses	1,65

La figura 3.3 relaciona el rozamiento unitario límite por fuste $r_{f,lim}$, con una serie de parámetros geotécnicos representativos como el índice N del ensayo SPT en terrenos granulares, la resistencia a compresión simple en los terrenos cohesivos q_u , o la presión límite del terreno en el ensayo presiométrico P_{lim} . Aunque en abscisas se usa una escala doble, ha de entenderse como una facilidad adicional para la obtención del rozamiento unitario límite por fuste $r_{f,lim}$, pero nunca como correlación entre las variables indicadas en dichos ejes paralelos.

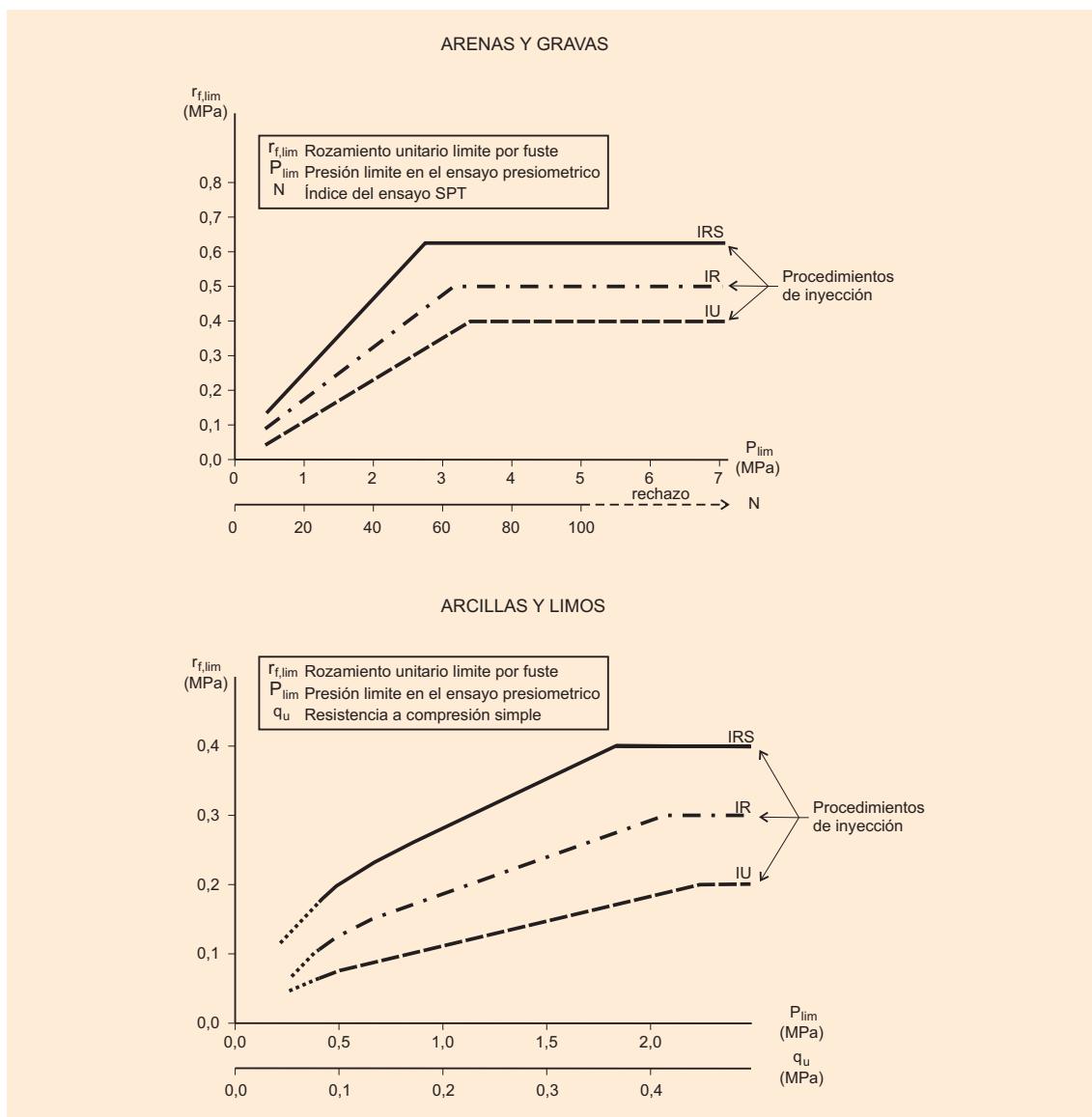


FIGURA 3.3. ROZAMIENTO UNITARIO LÍMITE POR FUSTE

Asimismo, cada figura incluye tres curvas correspondientes a otros tantos tipos de micropilotes, en función del tipo de inyección aplicada (IU, IR ó IRS). Debe tenerse en cuenta que si no se obtienen los límites inferiores que se establecen para las presiones de inyección, en el epígrafe 4.4.2 de esta Guía, dichas curvas no resultarán de aplicación.

Para la parte del fuste que se encuentre a una profundidad, medida verticalmente desde la superficie del terreno, menor de cinco metros ($z < 5 \text{ m}$), debe adoptarse en todo caso, e independientemente del procedimiento de inyección utilizado, el valor $r_{f,\lim}$ correspondiente al de una inyección del tipo IU.

En ausencia de datos más específicos sobre el particular, en el apéndice A-6.3 se incluye una correlación entre los valores del índice N del ensayo SPT según UNE 103800 y la resistencia por punta q_c , del ensayo de penetración estática con el cono CPT según UNE 103804, en función del tamaño medio de las partículas D_{50} , lo que permite la utilización de la figura 3.3 cuando se disponga de este tipo de datos.

3.3.3. RESISTENCIA POR PUNTA

3.3.3.1. Resistencia de cálculo por punta en suelos

En el caso de apoyo de los micropilotos en suelos, y dada la pequeña sección transversal de los mismos, resulta habitual no considerar la colaboración por punta del terreno.

No obstante lo anterior y cuando, de acuerdo con lo especificado en 3.3.1.1, pueda considerarse la resistencia por punta $R_{p,d}$, habrá de adoptarse como valor máximo de la misma el quince por ciento (15%) de la resistencia de cálculo por fuste frente a esfuerzos de compresión $R_{fc,d}$, es decir:

$$R_{p,d} \leq 0,15 R_{fc,d}$$

donde:

$R_{p,d}$: Resistencia de cálculo por punta.

$R_{fc,d}$: Resistencia de cálculo por fuste frente a esfuerzos de compresión.

3.3.3.2. Resistencia del empotramiento en roca

El aprovechamiento del rozamiento por fuste a lo largo de los suelos o rocas alteradas, por encima de la profundidad del empotramiento en roca, requiere para poder desarrollarse una deformación que, en general, no es compatible con la propia condición de empotramiento en roca.

Cuando, de acuerdo con lo especificado en 3.3.1.2, pueda considerarse que el micropilote está empotrado en roca, la resistencia de cálculo en el empotramiento se obtendrá mediante la expresión:

$$R_{e,d} = A_{Le} \cdot f_{e,d} + A_{Pe} \cdot q_{pe,d}$$

donde:

$R_{e,d}$: Resistencia de cálculo en el empotramiento en roca.

A_{Le} : Área lateral del micropilote en el empotramiento en roca.

$f_{e,d}$: Resistencia unitaria por fuste de cálculo en el empotramiento en roca.

A_{Pe} : Área de la sección recta de la punta en el empotramiento en roca.

$q_{pe,d}$: Resistencia unitaria por punta de cálculo en el empotramiento en roca.

Los parámetros $f_{e,d}$ y $q_{pe,d}$ pueden tomarse de la tabla 3.3 para rocas cuyo grado de alteración sea igual o inferior a III según la escala ISRM (véase apéndice A-6.1).

**TABLA 3.3. RESISTENCIA UNITARIA DE CÁLCULO EN EL EMPOTRAMIENTO EN ROCA, POR FUSTE Y PUNTA
(GRADO ISRM ≤ III)**

TIPO DE ROCA	$f_{e,d}$ (MPa)	$q_{pe,d}$
Margas y margocalizas	0,15 - 0,40	$0,07 \cdot q_u$
Pizarras y otros esquistos	0,20 - 0,30	$0,07 \cdot q_u$
Areniscas	0,30 - 0,45	$0,07 \cdot q_u$
Calizas y dolomías	0,40 - 0,50	$0,10 \cdot q_u$
Granitos y basaltos	0,40 - 0,60	$0,10 \cdot q_u$

q_u : Resistencia a compresión simple de la roca, determinada preferiblemente según UNE 22950-1, o en su defecto mediante correlación con otros ensayos. Deberá determinarse este parámetro en la zona de influencia de la punta, definida conforme a lo especificado en el epígrafe 3.3.1.2.

3.4. COMPROBACIÓN FREnte AL ARRANQUE

3.4.1. RESISTENCIA DE CÁLCULO FREnte AL MODO DE FALLO DE ARRANQUE

El valor de la resistencia de cálculo frente al modo de fallo de arranque $R_{t,d}$, deberá ser mayor o igual que el esfuerzo axil (tracción) de cálculo transmitido por la estructura en la hipótesis más desfavorable $N_{t,Ed}$, es decir:

$$R_{t,d} \geq N_{t,Ed}$$

donde:

$R_{t,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de arranque (esfuerzo axil de tracción).

$N_{t,Ed}$: Esfuerzo axil de cálculo (tracción), obtenido a partir de acciones mayoradas.

Las comprobaciones que se efectúan en este apartado no comprenden el posible fallo por aplicación de esfuerzos de tracción, en que se produzcan superficies de rotura distintas de la del contacto micropilote-terreno (es decir, cuando tenga lugar el arranque simultáneo del micropilote y el cono de tierras circundante, bien desde la punta, o desde cualquier altura intermedia), que deben analizarse con la metodología del fallo de estabilidad global, según se especifica en el epígrafe 3.1.2.

La resistencia de cálculo frente al modo de fallo de arranque $R_{t,d}$, en micropilotes sometidos a esfuerzos axiles de tracción, se obtiene como suma de la resistencia por fuste frente a esfuerzos de tracción y la componente del peso propio del micropilote en la dirección de su eje, minorado tal y como se indica a continuación:

$$R_{t,d} = R_{ft,d} + \frac{w_e}{F_{we}}$$

donde:

$R_{t,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de arranque.

w_e : Componente del peso propio del micropilote en la dirección de su eje.

F_{we} : Coeficiente de minoración. Salvo justificación expresa en contra, deberá adoptarse un valor de uno coma dos ($F_{we} = 1,2$).

$R_{ft,d}$: Resistencia de cálculo por fuste frente a esfuerzos de tracción.

$$R_{ft,d} = A_L \cdot r_{ft,d}$$

donde:

$r_{ft,d}$: Rozamiento unitario de cálculo por fuste frente a esfuerzos de tracción

A_L : Área lateral del micropilote. Debe determinarse a partir del valor del diámetro nominal¹¹.

3.4.2. RESISTENCIA DE CÁLCULO POR FUSTE FRENTE A ESFUERZOS DE TRACCIÓN

3.4.2.1. Sistemas de cálculo

La resistencia de cálculo por fuste frente a esfuerzos de tracción $R_{ft,d}$ se puede deducir bien mediante ensayos de carga, o a partir del valor del rozamiento unitario por fuste de cálculo frente a esfuerzos de tracción, deducido por métodos teóricos o correlaciones empíricas.

Siempre que sea posible, el dimensionamiento se basará en resultados de pruebas de carga realizadas sobre micropilotes del mismo tipo y dimensiones y en el mismo terreno que los que se vayan a ejecutar.

Para la adopción del valor de cálculo correspondiente al rozamiento unitario por fuste frente a esfuerzos de tracción $r_{ft,d}$, se seguirá el siguiente orden de prelación:

- En primer lugar, y con carácter preferente, a partir de ensayos de carga «in situ», según los criterios especificados en el epígrafe 3.4.2.2.
- En ausencia de los referidos ensayos, se adoptará el valor obtenido según lo especificado en el epígrafe 3.4.2.3.

En caso de que el micropilote atraviese cavidades o huecos, deberá considerarse nula la resistencia por fuste en el tramo en cuestión. También se considerará nula la resistencia por fuste en los tramos en que por cualquier circunstancia, se deje una tubería de revestimiento de forma permanente (camisa perdida).

3.4.2.2. Pruebas de carga

Tal y como se indica en 3.3.2.2, la realización de pruebas de carga resulta preferible a cualquier otro sistema, para la determinación de parámetros de cálculo en los micropilotes, obteniéndose su máxima utilidad cuando se ensayan aquellos cuyo comportamiento se quiere conocer.

Los ensayos de carga vertical de tracción, hasta provocar el arrancamiento, presentan el inconveniente de tener que proporcionar una reacción suficientemente elevada, lo que normalmente se consigue con elementos de compresión construidos en el entorno, por lo general otros micropilotes dispuestos con este propósito.

En el apéndice 2 se incluye tanto la metodología recomendada para la obtención de la resistencia por fuste a partir de los resultados de pruebas de carga, como una serie de aspectos relativos a su realización.

¹¹ Diámetro del micropilote considerado a efectos de cálculo, que será menor o igual que el de perforación (véase epígrafe 4.2.1).

Por otra parte, la posibilidad de utilización de datos provenientes de pruebas de carga de compresión, para la determinación de valores de resistencia de micropilotes a tracción, debe evaluarse de manera específica para cada situación particular.

3.4.2.3. Métodos teóricos y correlaciones empíricas

El rozamiento unitario por fuste de cálculo frente a esfuerzos de tracción podrá determinarse mediante la expresión:

$$r_{ft,d} = \eta \cdot r_{fc,d}$$

donde:

$r_{ft,d}$: Rozamiento unitario de cálculo por fuste frente a esfuerzos de tracción.

η : Coeficiente que tiene en cuenta la alternancia de cargas sobre el micropilote:

- Micropilotes sometidos alternativamente a cargas de compresión y tracción: $\eta = 0,60$.
- Micropilotes sometidos únicamente a esfuerzos de tracción: $\eta = 0,75$.

$r_{fc,d}$: Rozamiento unitario de cálculo por fuste frente a esfuerzos de compresión. Se adoptará el que se considere más representativo de entre los valores siguientes:

- El obtenido por el método teórico (véase epígrafe 3.3.2.3).
- El obtenido por correlaciones empíricas (véase epígrafe 3.3.2.4).

3.5. COMPROBACIÓN FRENTE A SOLICITACIONES TRANSVERSALES

El valor de la resistencia de cálculo de un micropilote vertical frente a carga horizontal $R_{h,d}$, deberá ser mayor o igual que el esfuerzo horizontal de cálculo que actúa sobre el micropilote:

$$R_{h,d} \geq H_{Ed}$$

donde:

$R_{h,d}$: Resistencia de cálculo frente a carga horizontal.

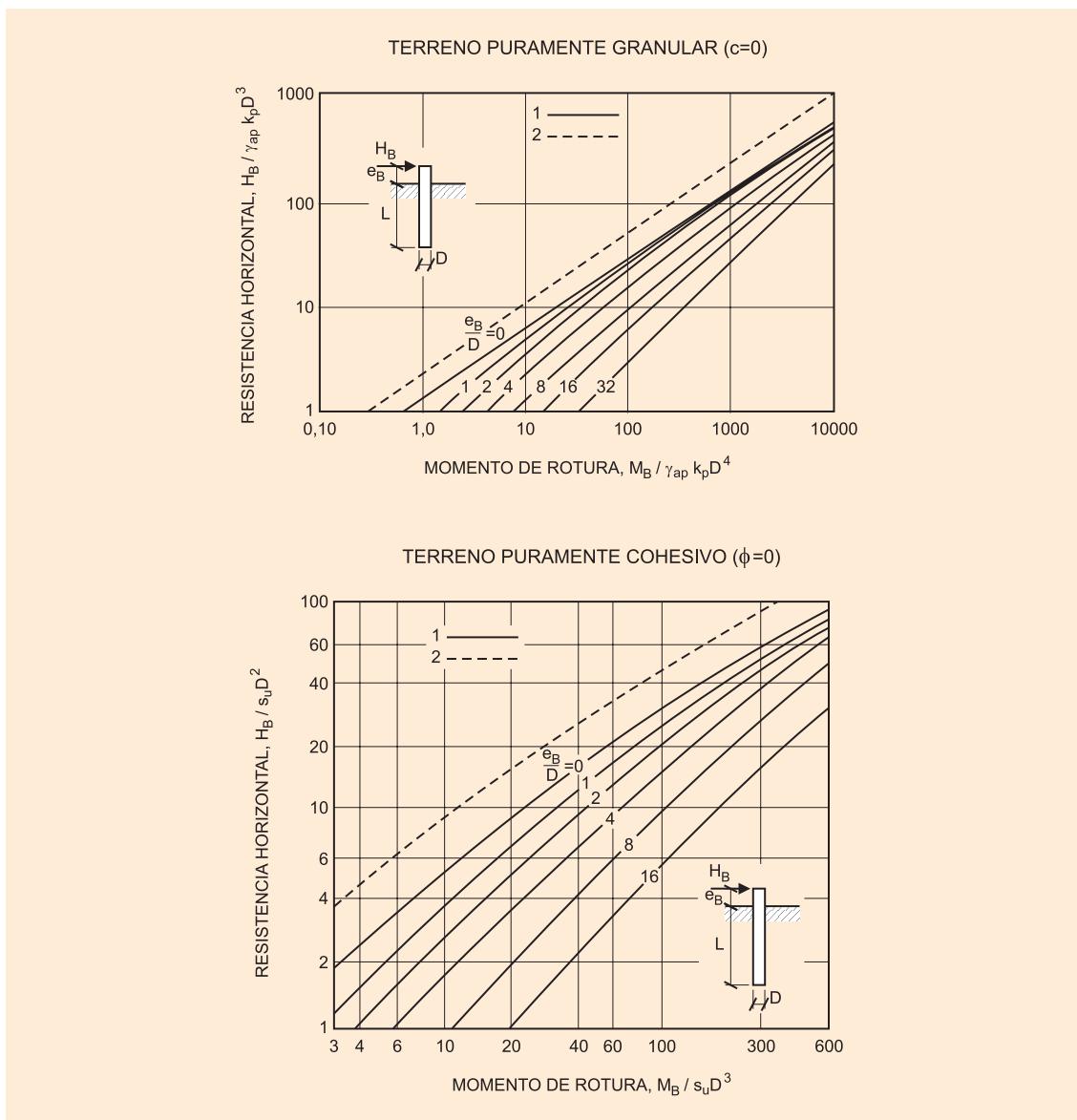
H_{Ed} : Carga horizontal de cálculo.

Para la determinación de la resistencia de cálculo frente a carga horizontal, resulta muy recomendable efectuar una prueba de carga lateral, conforme a lo especificado en el apartado 5.4 y en el apéndice 2 de esta Guía.

En su defecto, cuando se conozcan o se puedan estimar valores del módulo de reacción del terreno (véase apéndice A-6.5) se recomienda realizar una estimación teórica según la metodología incluida en el apéndice A-3.1.

Se puede obtener una primera aproximación de la resistencia de cálculo frente a una carga horizontal a partir del peso específico y los parámetros resistentes del terreno, usando los denominados ábacos de Broms para pilotes flexibles¹², recogidos en la figura 3.4. El valor obtenido tendrá, únicamente, la consideración de magnitud de referencia.

¹² A estos efectos, se entiende por pilotes flexibles, aquellos en los que la longitud enterrada del pilote L, es claramente mayor que su longitud elástica T, lo que se verifica con carácter general en los micropilotes (véase: *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, apartado 5.13).



1. Carga actuando a la distancia e_B indicada.
2. Hipótesis de movimiento rígido horizontal.

FIGURA 3.4. ÁBACOS DE BROMS PARA PILOTES FLEXIBLES

Hay que tener en cuenta que estos ábacos cubren únicamente dos situaciones particulares:

- La correspondiente a un terreno puramente granular ($c = 0$), que puede emplearse cuando se estime que la cohesión no contribuye de manera significativa en el resultado.
- La correspondiente a un terreno puramente cohesivo ($\phi = 0$), que puede emplearse, fundamentalmente, para el análisis de situaciones de corto plazo en terrenos arcillosos saturados.

Para el empleo de los ábacos deben utilizarse los siguientes parámetros:

D: Diámetro nominal del micropilote.

M_B : Momento que provoca la rotura del micropilote. Se tomará:

$M_B = M_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a flexión, que se determinará conforme a lo especificado en A-4.1.

γ_{ap} : Peso específico aparente¹³ del suelo.

s_u : Resistencia al corte sin drenaje del terreno.

k_p : Coeficiente de empuje pasivo. Para terrenos puramente granulares debe tomarse:

$$k_p = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

donde:

ϕ : Ángulo de rozamiento interno del terreno expresado en grados sexagesimales.

Una vez consultados los ábacos, se obtendrá la resistencia de cálculo frente a carga horizontal, como cociente entre la resistencia horizontal deducida de dichos ábacos H_B , y un coeficiente de minoración F_H . Finalmente se deberá comprobar que la solicitudación horizontal de cálculo H_{Ed} , es inferior a la resistencia de cálculo $R_{h,d}$, es decir:

$$H_{Ed} \leq R_{h,d} = \frac{H_B}{F_H}$$

donde:

H_{Ed} : Carga horizontal de cálculo.

$R_{h,d}$: Resistencia de cálculo frente a carga horizontal.

H_B : Resistencia horizontal obtenida de los ábacos de Broms.

F_H : Coeficiente de minoración de la resistencia horizontal. Salvo justificación expresa en contra, deberá adoptarse un valor de dos ($F_H = 2$).

3.6. FALLO ESTRUCTURAL DE LOS MICROPILOTES

3.6.1. RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL MICROPILOTE A COMPRESIÓN

Se debe comprobar:

$$N_{c,Rd} \geq N_{c,Ed}$$

donde:

$N_{c,Rd}$: Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de compresión, o máxima capacidad que se le puede asignar como elemento estructural frente a este tipo de esfuerzos.

$N_{c,Ed}$: Esfuerzo axial de cálculo (compresión), obtenido a partir de acciones mayoradas.

La resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de compresión se puede determinar en general, mediante la siguiente expresión:

$$N_{c,Rd} = (0,85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} + A_a f_{yd}) \cdot \frac{R}{1,20 F_e}$$

¹³ Peso específico aparente: peso por unidad de volumen del suelo en su estado natural, con el agua que contenga.

donde:

A_c : Sección neta de lechada o mortero, descontando armaduras. Para calcularla se debe utilizar el diámetro nominal del micropilote.

f_{cd} : Resistencia de cálculo del mortero o lechada de cemento a compresión:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} : Resistencia característica del mortero o lechada de cemento a compresión simple, a los veintiocho días (28 d) de edad.

γ_c : Coeficiente parcial de seguridad para el mortero o lechada¹⁴. Se tomará un valor de uno coma cincuenta ($\gamma_c = 1,50$).

A_s : Sección total de las barras corrugadas de acero.

f_{sd} : Resistencia de cálculo del acero de las armaduras corrugadas. Deberá considerarse menor o igual que cuatrocientos megapascales:

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \leq 400 \text{ MPa}$$

f_{sk} : Límite elástico del acero de las armaduras corrugadas, que puede obtenerse de la tabla 2.2.

γ_s : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de las armaduras corrugadas¹⁵. Se tomará un valor de uno coma quince ($\gamma_s = 1,15$).

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular. Deberá considerarse menor o igual que cuatrocientos megapascales:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a} \leq 400 \text{ MPa}$$

f_y : Límite elástico del acero de la armadura tubular, que puede obtenerse de la tabla 2.1.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular¹⁶. Se tomará un valor de uno coma diez ($\gamma_a = 1,10$).

A_a : Sección de cálculo de la armadura tubular de acero:

$$A_a = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2] \cdot F_{u,c}$$

donde:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión, que puede obtenerse de la tabla 2.4.

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

$F_{u,c}$: Coeficiente de minoración del área de la armadura tubular en función del tipo de unión (compresión). Salvo justificación expresa se deberán adoptar los valores de la tabla 3.4.

¹⁴ Véase: *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras RPX-95*, capítulo 6.

¹⁵ Véase: *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras RPX-95*, capítulo 6.

¹⁶ Véase: *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras RPX-95*, capítulo 6.

TABLA 3.4. COEFICIENTE $F_{u,c}$

TIPO DE UNIÓN	$F_{u,c}$
Mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección	1,0
De rosca machihembrada con sección ensanchada	
De rosca machihembrada, sin sección ensanchada y con contacto a tope en ambos extremos	
Otras uniones diseñadas específicamente para no sufrir pérdidas de resistencia	
Resto de casos	0,5

F_e : Coeficiente de influencia del tipo de ejecución, que tiene en cuenta la naturaleza del terreno y el sistema de perforación empleado, que debe obtenerse de la tabla 3.5.

TABLA 3.5. COEFICIENTE F_e

TIPO DE TERRENO Y DE PERFORACIÓN	F_e
Terreno con nivel freático por encima de la punta del micropilote y perforación sin revestir, sin empleo de lodos	1,50
Terreno con nivel freático permanentemente bajo la punta del micropilote y perforación sin revestir, sin empleo de lodos	1,30
Cualquier tipo de terreno perforado con lodos	1,15
Cualquier tipo de terreno perforado al amparo de revestimiento recuperable	1,05
Micropilote con tubería de revestimiento dejada «in situ» de forma permanente (camisa perdida)	1,00

R: Factor empírico de pandeo o coeficiente de reducción de la capacidad estructural del micropilote por efecto del pandeo, cuyo valor se tomará como se indica a continuación.

Deberá considerarse el efecto del pandeo, aplicando un factor de reducción menor o igual que la unidad ($R \leq 1$), cuando:

- El micropilote esté rodeado por arenas con compacidades flojas a medias o suelos cohesivos con consistencias blandas a medias (véase apéndice 6).
- En caso de que existan zonas del micropilote denominadas *libres* (sin coacción lateral), por existir huecos en el terreno, sobresalir el micropilote de la superficie del mismo, o estar rodeado por terrenos *inestables*.

En los restantes casos se adoptará un valor del factor empírico de pandeo igual a la unidad ($R = 1$).

A efectos de esta Guía, para la aplicación del coeficiente de reducción de capacidad estructural por efecto del pandeo R, se considerarán como terrenos *inestables* los siguientes:

- a) Suelos no cohesivos con coeficiente de uniformidad¹⁷ inferior a dos ($C_u = D_{60}/D_{10} < 2$) que se encuentren bajo nivel freático.

¹⁷ Coeficiente de uniformidad: Relación de diámetros de partículas, o aberturas de tamices, por los que pasa el sesenta y el diez por ciento (60 y 10 %) de la muestra, en peso.

- b) Suelos no cohesivos de compacidad floja, con índice de densidad¹⁸ inferior o igual a treinta y cinco centésimas ($I_D \leq 0,35$).
- c) Suelos muy blandos, con resistencia al corte sin drenaje¹⁹ inferior a quince kilopascales ($s_u < 15 \text{ kPa}$).

El factor R se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$R = 1,07 - 0,027 C_R \leq 1$$

donde:

C_R : Coeficiente adimensional cuyo valor²⁰ se tomará de la tabla 3.6.

TABLA 3.6. COEFICIENTE C_R

TIPO DE COACCIÓN LATERAL	C_R
Fangos y turbas con $15 \text{ kPa} \leq s_u (\text{kPa}) \leq 25$	18 - 12
Arcillas y limos blandos con $15 \text{ kPa} \leq s_u (\text{kPa}) \leq 25$	12 - 8
Suelos no cohesivos de compacidad ²¹ media ($0,35 < I_D < 0,65$) que cumplan alguno de los siguientes requisitos: <ul style="list-style-type: none"> — Encontrarse permanentemente por encima del nivel freático — Presentar un coeficiente de uniformidad mayor o igual que dos ($D_{60}/D_{10} \geq 2$) 	8 - 7
Suelos cohesivos de consistencia media ($25 \text{ kPa} \leq s_u (\text{kPa}) \leq 50$)	
Libre (sin terreno o rodeado de terreno <i>inestable</i> ²²)	H/D_R

Siendo:

D_R : Diámetro del micropilote en la zona de pandeo. Cuando en la zona libre (sin terreno o rodeado de terreno *inestable*) se haya colocado tubería de revestimiento perdida, D_R será el diámetro de dicha tubería; si no fuera así se tomará el diámetro exterior de la armadura tubular ($D_R = d_e$).

H : Longitud de la zona libre (sin terreno o rodeado de terreno *inestable*).

Cuando se disponga de datos sobre las propiedades elásticas del terreno, el pandeo se podrá analizar también con los métodos incluidos en el apéndice 3.

3.6.2. RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL MICROPILOTE A TRACCIÓN

Se debe comprobar:

$$N_{t,Rd} \geq N_{t,Ed}$$

¹⁸ Véase apéndice A-6.2.

¹⁹ Véase: *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, apartados 3.4 y 3.5. La resistencia al corte sin drenaje puede determinarse preferiblemente mediante ensayos de campo (molinete), o en su defecto de laboratorio (fundamentalmente el de resistencia a compresión simple UNE 103400, triaxiales UNE 103402, o de corte directo UNE 103401).

²⁰ Véase, Johnson, S. M. y Kavanagh, T. G. (1968): *The Design of Foundations for Buildings*, McGraw-Hill.

²¹ Además de por el índice de densidad, puede determinarse la consistencia de las arenas de modo aproximado, a través del ensayo de penetración estándar SPT, según UNE 103800, conforme a lo indicado en el apéndice A-6.2.

²² Véanse criterios para la consideración del terreno como inestable en este mismo epígrafe.

donde:

$N_{t,Rd}$: Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de tracción, o máxima capacidad que se le puede asignar como elemento estructural frente a este tipo de esfuerzos.

$N_{t,Ed}$: Esfuerzo axil de cálculo (tracción), obtenido a partir de acciones mayoradas.

El valor de la resistencia estructural del micropilote a tracción, se puede obtener de la siguiente expresión:

$$N_{t,Rd} = (A_s f_{sd} + A_a f_{yd}) \cdot \frac{1}{1,10}$$

donde:

A_s : Sección total de las barras corrugadas de acero.

f_{sd} : Resistencia de cálculo del acero de las barras corrugadas:

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

f_{sk} : Límite elástico del acero de las barras corrugadas, que puede obtenerse de la tabla 2.2.

γ_s : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de las barras corrugadas²³. Se tomará un valor de uno coma quince ($\gamma_s = 1,15$).

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a}$$

f_y : Límite elástico del acero de la armadura tubular, que puede obtenerse de la tabla 2.1.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular²⁴. Se tomará un valor de uno coma diez ($\gamma_a = 1,10$).

A_a : Sección de cálculo de la armadura tubular de acero:

$$A_a = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2] \cdot F_{u,t}$$

donde:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión, que puede obtenerse de la tabla 2.4.

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

$F_{u,t}$: Coeficiente de minoración del área de la armadura tubular en función del tipo de unión (tracción). Salvo justificación expresa en contra se deberán adoptar los valores de la tabla 3.7.

²³ Véase: *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras RPX-95*, capítulo 6.

²⁴ Véase: *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras RPX-95*, capítulo 6.

TABLA 3.7. COEFICIENTE $F_{u,t}$

TIPO DE UNIÓN	$F_{u,t}$
Mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección	
De rosca machihembrada con sección ensanchada	1,0
Otras uniones diseñadas específicamente para no sufrir pérdidas de resistencia	
Resto de casos	0,5

3.6.3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL A FLEXIÓN Y CORTANTE

Para calcular la resistencia estructural del micropilote a flexión, a cortante o a esfuerzos combinados, se supondrá que únicamente colabora la armadura tubular del micropilote y se aplicarán los métodos de cálculo de estructuras metálicas. En el apéndice 4 se incluyen las fórmulas de aplicación para los casos más usuales.

Especial atención merece la resistencia estructural de la unión de las armaduras, pues ésta pudiera ser inferior a la de la propia armadura tubular.

Para estimar el momento fletor máximo en el micropilote, originado por una carga horizontal H_o ó un momento M_o en cabeza, puede asimilarse el micropilote a una ménsula equivalente de análogas características mecánicas²⁵, sometida sólo a los esfuerzos exteriores y en la que la acción del suelo se transforma en un empotramiento ficticio situado a una profundidad L_{ef} :

$$L_{ef} = 1,2 \cdot f \cdot L_e$$

siendo:

L_{ef} : Profundidad de empotramiento ficticio.

L_e : Longitud elástica del micropilote:

$$L_e = \left(\frac{3 \cdot E_a \cdot I_a}{E_L} \right)^{1/4}$$

E_a : Módulo de elasticidad del acero.

I_a : Momento de inercia de la sección de acero.

E_L : Módulo de elasticidad del terreno a la profundidad L , siendo L la longitud del micropilote.

f: Coeficiente que depende de la relación entre el valor del módulo de elasticidad del terreno en superficie y a la profundidad L . Su valor puede tomarse de la tabla 3.8.

TABLA 3.8. COEFICIENTE f

E_0/E_L	f
0	1,70
0,5	1,25
1	1,00

²⁵ Véase, Jiménez Salas, J. A. y otros: *Geotecnia y cimientos III*, capítulo 3.

E_0 : Módulo de elasticidad del terreno en superficie.

El momento máximo en la zona del empotramiento ficticio puede reducirse, multiplicando el obtenido de la manera recién indicada por un coeficiente m_e , cuyo valor depende de la relación entre las longitudes libre (que sobresale de la superficie del terreno, en su caso) y elástica, que se puede obtener de la tabla 3.9.

TABLA 3.9. COEFICIENTE m_e

L_f/L_e	m_e
0	0,45
1	0,60
2	0,70
≥ 7	0,85

El efecto de grupo tiene como consecuencia un aumento del valor de la profundidad del empotramiento ficticio L_{ef} , que para los espaciamientos más habituales, comprendidos entre tres y cuatro diámetros ($S = 3D-4D$), debe afectarse por un coeficiente α_g que puede tomarse de la tabla 3.10.

TABLA 3.10. COEFICIENTE α_g

DIMENSIONES DEL GRUPO	α_g
2×1	1,10
2×2	1,25
4×4	1,40
$> 4 \times 4$	1,50

3.7. CÁLCULO DE ASIENTOS DE LOS MICROPILOTES

3.7.1. CONSIDERACIONES GENERALES

El asiento de los micropilotes sometidos a esfuerzos de compresión deberá determinarse preferiblemente a través de pruebas de carga, según se especifica en 3.3.2.2.

Cuando no se disponga de dichos ensayos puede calcularse de modo aproximado, según se especifica en este apartado, dependiendo de que el micropilote esté empotrado en roca, o situado en terreno granular o cohesivo.

A los solos efectos de este tipo de cálculos, se considerará terreno granular aquel cuyo cernido por el tamiz 0,080 UNE sea inferior al quince por ciento (# 0,080 mm < 15%) y terreno cohesivo aquel cuyo cernido por el tamiz 0,080 UNE sea superior al treinta y cinco por ciento (# 0,080 mm > 35%). En los casos comprendidos entre los límites anteriores y, sobre todo, en suelos saturados, será conveniente efectuar ambas hipótesis de comportamiento, y adoptar finalmente la más pesimista respecto a la seguridad.

En el cálculo de asientos de cimentaciones nuevas o recalces, en que los micropilotes atraviesan suelos granulares y cohesivos, el trabajo principal corresponde a los niveles menos deformables.

bles, que son los primeros en entrar en carga de modo significativo. Por tanto, en el cálculo se recomienda tener en cuenta únicamente los suelos cohesivos de consistencia²⁶ muy firme a dura ($q_u > 0,35 \text{ MPa}$) y los granulares de compacidad media a densa y muy densa ($N > 20$).

Cuando ninguno de los dos tipos de terreno sea claramente más deformable que el otro, en ausencia de modelos numéricos más precisos, podrá calcularse un asiento considerando que todo el terreno atravesado fuese granular y otro considerando que todo el terreno atravesado fuese cohesivo. El asiento total se estimará como media ponderada de dichos asientos, según la longitud relativa en cada tipo de terreno.

3.7.2. MICROPILOTE CON EMPOTRAMIENTO EN ROCA

Cuando se produzca, según lo especificado en 3.3.1.2, la situación de empotramiento en roca, el asiento se corresponderá aproximadamente con el acortamiento elástico del micropilote:

$$s_e = \frac{N_{c,Ek} \cdot L_E}{A_p \cdot E_p}$$

donde:

s_e : Acortamiento elástico del micropilote

$N_{c,Ek}$: Esfuerzo axil característico, considerando las acciones sin mayorar (véase apartado 3.1).

L_E : Longitud del micropilote que se acorta elásticamente. Es igual a la longitud total del micropilote L , menos la longitud de la parte empotrada en roca²⁷ de grado III o inferior según ISRM, L_{emp} , es decir:

$$L_E = L - L_{emp}$$

$A_p \cdot E_p$: Rígidez de la sección transversal del micropilote. Equivale a la suma de las rígideces de la lechada o mortero y de la armadura. Es decir:

$$A_p \cdot E_p = A_c \cdot E_c + (A_{Pr} + A_s) \cdot E_a$$

donde:

E_c : Módulo de elasticidad de la lechada o mortero.

A_c : Sección neta de lechada o mortero, descontando la armadura.

E_a : Módulo de elasticidad del acero.

A_s : Sección total de las barras corrugadas de acero.

A_{Pr} : Sección reducida de la armadura tubular de acero, calculada teniendo en cuenta la reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión.

$$A_{Pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2]$$

siendo:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión. Deberá tomarse de la tabla 2.4.

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

²⁶ Véanse apéndices A-6.2 y A-6.4.

²⁷ Nótese que la longitud de la parte empotrada en roca de grado III o inferior debe ser mayor o igual que seis diámetros nominales ($L_{emp} \geq 6D$) para poder aplicar la condición de empotramiento en roca (véase epígrafe 3.3.1.2).

3.7.3. MICROPILOTE EN TERRENO GRANULAR

En terrenos granulares se puede emplear la siguiente expresión:

$$s_N = \left(\frac{9 N_{c,Ek}}{R_{c,d}} - 2 \right) \cdot \frac{D}{90}$$

donde:

s_N : Asiento del micropilote sometido al esfuerzo $N_{c,Ek}$, en terreno granular.

$N_{c,Ek}$: Esfuerzo axil característico, considerando las acciones sin mayorar (véase apartado 3.1).

$R_{c,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento, calculada conforme a lo especificado en el apartado 3.3 de esta Guía.

D: Diámetro nominal del micropilote.

Cuando se reunieran los requisitos especificados en 3.3.1.1 para poder considerar la resistencia por punta, al asiento calculado con la expresión inmediatamente anterior, deberá agregarse el acortamiento elástico del micropilote s_e , calculado con la expresión²⁸ incluida en el epígrafe 3.7.2, y en su caso, el debido a la presencia de capas blandas profundas²⁹ s_b , situadas por debajo de la punta del micropilote. Es decir:

$$s_{TOT} = s_N + s_e + s_b$$

3.7.4. MICROPILOTE EN TERRENO COHESIVO

En terreno cohesivo se puede emplear la siguiente expresión:

$$s_N = \frac{0,6 N_{c,Ek}}{L q_c}$$

donde:

s_N : Asiento del micropilote sometido al esfuerzo $N_{c,Ek}$, en terreno cohesivo.

$N_{c,Ek}$: Esfuerzo axil característico, considerando las acciones sin mayorar (véase apartado 3.1).

L: Longitud del micropilote.

q_c : Resistencia unitaria del terreno a la penetración estática (resistencia unitaria por punta al avance del cono). Se determinará preferiblemente a partir del ensayo de penetración con el cono CPT, según UNE 103804, en defecto del cual se puede correlacionar con la resistencia al corte sin drenaje³⁰.

Cuando se reunieran los requisitos especificados en 3.3.1.1 para poder considerar la resistencia por punta, al asiento calculado con la expresión inmediatamente anterior deberá agregarse el acortamiento elástico del micropilote s_e , calculado con la expresión³¹ incluida en el epígrafe 3.7.2 y,

²⁸ Entiéndase en este caso, que la referencia a la longitud de empotramiento en roca con grado III o inferior L_{emp} , efectuada en 3.7.2, debe hacerse a longitud de empotramiento en suelo granular con índice N del ensayo SPT —corregido por el efecto de la sobrecarga de tierras y normalizado a la energía estándar del sesenta por ciento (60%)— superior a treinta ($N > 30$).

²⁹ Este cálculo puede abordarse de conformidad con lo especificado en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, apartado 4.8 y epígrafe 5.6.2.2.a.

³⁰ Véase: *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, epígrafe 3.4.1.2.

³¹ Entiéndase en este caso, que la referencia a la longitud de empotramiento en roca con grado III o inferior L_{emp} , efectuada en 3.7.2, debe hacerse a longitud de empotramiento en suelo cohesivo con resistencia a compresión simple superior a cien kilopascales ($q_u > 100$ kPa).

en su caso, el debido a la presencia de capas blandas profundas³² s_b , situadas por debajo de la punta del micropilote. Es decir:

$$S_{TOT} = S_N + S_e + S_b$$

3.7.5. CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA EL CÁLCULO DE ASIENTOS

Además de lo especificado en los epígrafes precedentes, deben efectuarse algunas consideraciones adicionales cuando se trate de obras de recalce, o debo considerarse el denominado efecto de grupo (véase 3.8.2).

En general, en los recalces deberá perforarse el taladro del micropilote al amparo de revestimiento, tratando de utilizar aire en lugar de agua como fluido de perforación y disponiendo los apeos necesarios para la estructura a recalzar.

En lo que al cálculo de asientos se refiere, además de proceder a su evaluación con la formulación propuesta, se deberá tener en cuenta el asiento que la propia ejecución de los micropilotos puede inducir en la estructura a recalzar, debido al empleo de agua en la perforación (que deberá tratar de evitarse), colapso de estructuras terreas poco consistentes, etc.

Dicho asiento puede estimarse, en ausencia de otros datos más precisos, en un porcentaje del espesor de terreno afectado, que en el caso de suelos con potencial de colapso alto (rellenos antrópicos no consolidados, capas limosas, depósitos eólicos, etc.) puede llegar incluso al cinco por ciento (5%) si se utiliza agua en la perforación, o al uno o dos por ciento (1-2%) si se emplea aire.

3.8. GRUPOS DE MICROPILOTOS

Los apartados anteriores hacen referencia por lo general a micropilotos aislados, sin embargo, raramente se encuentran cimentaciones que se apoyen sobre un solo micropilote. Un elemento de cimentación se apoya generalmente sobre dos o tres micropilotos, como mínimo, para tener en cuenta eventuales excentricidades de carga.

Se llama grupo de micropilotos a un conjunto de micropilotos verticales, al que se pueden añadir, en ciertos casos, algunos micropilotos inclinados, unidos en cabeza por un mismo encepado.

El estado de los conocimientos y de la literatura técnica sobre grupos de micropilotos resulta, por el momento, menos completo que la correspondiente a grupos de pilotes, motivo por el cual, suele resultar habitual la consideración del problema desde planteamientos muy similares en ambos casos.

En esta Guía se formulan una serie de cuestiones básicas relativas al comportamiento de los grupos de micropilotos bajo carga vertical, o al asiento de los mismos.

Una primera aproximación a algunos casos diferentes de los anteriores se desarrolla, para grupos de pilotes, en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*³³ que, en ausencia de información más específica, el proyectista podría utilizar con carácter preliminar.

3.8.1. COMPORTAMIENTO BAJO CARGA VERTICAL

Para analizar el comportamiento del grupo de micropilotos en comparación con el micropilote aislado, se puede definir el coeficiente de eficacia del grupo bajo carga vertical C_e , como:

³² Este cálculo puede abordarse de conformidad con lo especificado en la *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, epígrafe 5.6.2.2.a y apartado 4.8.

³³ Véase: *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, capítulo 5.

$$C_e = \frac{R_{cg,d}}{n R_{c,d}}$$

donde:

C_e : Coeficiente de eficacia del grupo de micropilotes bajo carga vertical.

$R_{cg,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento, del grupo de micropilotes.

n: Número de micropilotes que forman el grupo.

$R_{c,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento, del micropilote aislado.

En el comportamiento de los grupos de micropilotes pueden influir gran variedad de factores, como el número de micropilotes que forman el grupo, su espaciamiento, las características del terreno, el tipo de micropilote, la secuencia de ejecución, etc.

A continuación se refieren las principales conclusiones obtenidas en ensayos sobre grupos de micropilotes del proyecto *Forever*³⁴, que ha incluido la campaña de experimentación sistemática más amplia realizada recientemente sobre el particular. En el citado proyecto se realizaron ensayos para estudiar el comportamiento de los grupos de micropilotes sometidos a carga vertical en arenas finas de granulometría bastante uniforme³⁵.

Como conclusión sobre la resistencia de los grupos de micropilotes, se obtiene que no resulta posible cuantificar con precisión el efecto de grupo aportado por un determinado parámetro, como podrían sugerir ciertos estudios teóricos o reglas de cálculo.

El estado actual de las investigaciones sobre grupos de micropilotes no presenta grandes diferencias en este sentido, con la relativa a grupos de pilotes, no obstante lo cual, es claro que resulta más fácil favorecer el efecto de confinamiento en grupos de micropilotes que de pilotes de gran diámetro.

Puede afirmarse que los resultados experimentales que muestran un efecto positivo ($C_e > 1$) para grupos compuestos por un número grande de micropilotes, se deben, en gran medida, al confinamiento del suelo entre los mismos. La mejora del comportamiento frente a carga vertical del grupo, puede explicarse por una densificación del macizo de arena entre los micropilotes. En el caso de los micropilotes ensayados, el aumento del número de micropilotes se traducía también en un aumento de la proporción de micropilotes centrales en el grupo, que se benefician más del efecto de confinamiento del suelo que los periféricos.

El efecto de grupo parece ser óptimo para valores del espaciamiento o entre-eje entre micropilotes, comprendidos entre dos y medio y cuatro veces su diámetro ($2,5 \leq S/D \leq 4$). Para valores inferiores, el confinamiento puede llegar a provocar una rotura en bloque del conjunto suelo-micropilotes, disminuyendo en consecuencia la resistencia global. Para valores superiores, el confinamiento se reduce y la resistencia del grupo tiende a la de los micropilotes aislados ($C_e = 1$).

³⁴ Institut pour la Recherche et L'Experimentation en Genie Civil (IREX) (2004): *Syntèse des résultats et recommandations du Proyect national sur les micropileux, FOREVER*.

³⁵ Las características principales de las arenas en cuestión, finas y bastante uniformes, son:

– Parámetros de estado:

Peso específico seco	$14,40 < \gamma_d \text{ (kPa)} < 14,82$
Índice de densidad	$0,53 < I_D < 0,62$
Contenido de humedad	$7,9 < w (\%) < 10,8$

– Granulometría:

Tamaño medio	$D_{50} \approx 0,15 \text{ mm}$
Coeficiente de uniformidad	$C_u \approx 1,8$

– Parámetros resistentes del terreno:

Resistencia unitaria a la penetración estática (por punta)	$0,9 < q_c \text{ (MPa)} < 3,0$
Módulo presiométrico	$2,2 < E_M \text{ (MPa)} < 6,3$
Presión límite en el ensayo presiométrico	$0,25 < P_{lim} \text{ (MPa)} < 0,56$

En los ensayos de grupos compuestos por un pequeño número de micropilotes, que no aseguran un confinamiento suficiente del suelo entre ellos, se produce una disminución de la resistencia del grupo respecto a la de los micropilotes aislados ($C_e < 1$).

No obstante lo anterior, conviene señalar que los coeficientes de eficacia referidos son globales (fuste y punta), con lo que enmascaran, en el caso de ensayos sobre pilotes cortos, el efecto de grupo positivo sobre el rozamiento lateral, con el negativo sobre la resistencia por punta. Es por ello que, aunque se hayan obtenido valores del coeficiente menores que la unidad ($C_e < 1$) para grupos reducidos, en los micropilotes con relaciones L/D altas y efecto de punta despreciable, se pueda no considerar el efecto de grupo ($C_e = 1$).

El confinamiento se puede mejorar con ciertos métodos de puesta en obra, a igualdad en el resto de factores. Así, en arenas de compacidad floja los micropilotes son susceptibles de desarrollar un buen rozamiento lateral por efecto del confinamiento.

En general, se observa que la capacidad resistente de un grupo aumenta, si los micropilotes centrales se ejecutan en último lugar. Este efecto de aumento de resistencia podría obtenerse en micropilotes tipo IR o IRS siguiendo secuencias de ejecución en varias fases, como se muestra en la figura 3.5.

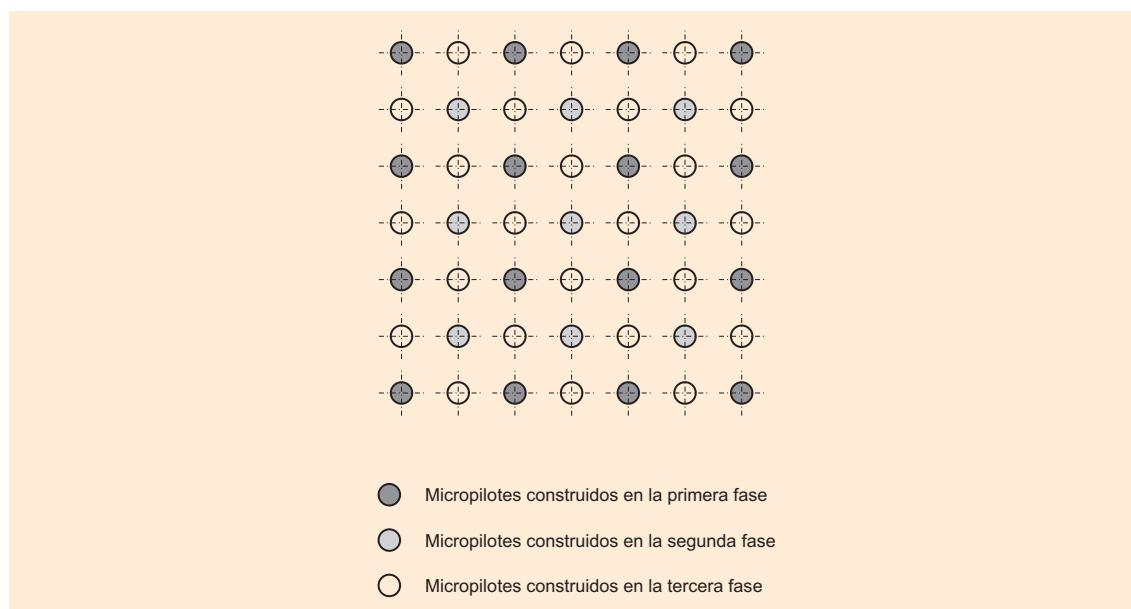


FIGURA 3.5. EJEMPLO DE SECUENCIA DE PUESTA EN OBRA PARA MICROPILOTES TIPO IR Ó IRS

3.8.2. ASIENTOS DE LOS GRUPOS DE MICROPILOTES

Para el cálculo de los asientos de los grupos de micropilotes se han de distinguir dos efectos de diferente naturaleza:

- Los efectos debidos a la puesta en obra de los micropilotes, que modifican las propiedades del suelo en masa y de las interfaces micropilotes-terreno, tanto en rigidez como en carga límite (rozamiento límite, presión última).
- El efecto de las interacciones mecánicas entre los micropilotes (superposición de desplazamientos).

Los métodos de cálculo de asientos de grupos de micropilotes pueden ser semejantes a los de pilotes³⁶ en condiciones similares, teniendo en cuenta la mejora del terreno por efecto de la inyección, cuando pueda estimarse.

³⁶ Véase: *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, capítulo 5.

3.9. UNIÓN A LAS CIMENTACIONES O ENCEPADOS

La capacidad resistente de cálculo de la conexión micropilote-estructura, con las características resistentes de los materiales minoradas, habrá de ser superior a los esfuerzos de cálculo, obtenidos a partir de acciones mayoradas:

$$R_{u,d} \geq E_d$$

donde:

$R_{u,d}$: Resistencia de cálculo de la conexión micropilote-estructura, que habrá de considerar la minoración de las características resistentes de los materiales.

E_d : Esfuerzo de cálculo, obtenido a partir de acciones mayoradas.

En el proyecto se debe definir el sistema elegido para transferir la carga entre la armadura del micropilote y la estructura. Debe quedar claramente establecida cual es la trayectoria de transmisión de las cargas desde la estructura cimentada a los micropilotes y calcular la conexión de acuerdo con dicha trayectoria.

El detalle y dimensionamiento de la conexión forma parte del proyecto estructural y queda fuera del alcance de esta Guía. En cualquier caso, se estará a lo especificado en la instrucción *EHE*, el *Eurocódigo 4*, y el *Manual de aplicación de las Recomendaciones RPM-RPX/95*.

Se distinguen tres casos de unión a las cimentaciones o encepados que se desarrollan en los apartados 3.9.1 a 3.9.3:

- Conexión a una cimentación de nueva construcción.
- Conexión directa a una cimentación preexistente.
- Conexión a un nuevo encepado que se conecta a su vez a la cimentación preexistente.

En el apéndice 5 se muestran algunos ejemplos de conexiones entre micropilote y cimiento, que no constituyen, en ningún caso, una relación exhaustiva.

3.9.1. CONEXIÓN A UNA CIMENTACIÓN DE NUEVA CONSTRUCCIÓN

En el caso de conexiones a cimentaciones de nueva construcción se pueden distinguir, en general, dos tipologías:

- a) Conexiones en las que la cabeza del micropilote termina en la parte inferior del encepado (véanse ejemplos en figuras A-5.1 a A-5.3 del apéndice 5).

En este caso, la transmisión de esfuerzos se hace principalmente por bielas de compresión en el encepado, para cuyo cálculo y armado debe seguirse lo indicado en la *EHE*.

- b) Conexiones en las que la armadura tubular del micropilote se prolonga a lo largo del canto del encepado (véanse ejemplos en figuras A-5.4 a A-5.6 del apéndice 5).

En este caso en la trayectoria que siguen las cargas interviene también la transmisión de esfuerzos en la interfaz existente entre el acero de la armadura tubular y el hormigón del encepado, que se conseguirá, en general, disponiendo elementos conectadores. Solamente se podrá considerar la transmisión simplemente por tensión rasante de adherencia en la superficie de la armadura tubular, en ausencia de tracciones perpendiculares a la superficie de contacto.

La definición de bielas para el cálculo del encepado en este caso, resulta más compleja que en el caso a).

3.9.2. CONEXIÓN DIRECTA A UNA CIMENTACIÓN PREEXISTENTE

Este caso se refiere a cuando la cimentación existente es atravesada por una perforación que es prolongación del micropilote. En este tipo de uniones la lechada o mortero a emplear en contacto con la cimentación existente puede requerir una formulación especial para asegurar la adherencia con las paredes de la perforación.

La transmisión de las solicitudes entre el micropilote y la cimentación preexistente se realiza a través de las siguientes superficies:

- El contacto entre la lechada o mortero y el cimiento preexistente, cuya resistencia de cálculo se obtendrá multiplicando la superficie de contacto por el valor de tensión rasante última de cálculo (véase 3.9.2.1).
- El contacto entre la armadura del micropilote y los posibles conectadores dispuestos y la lechada o mortero que las rodean, cuya capacidad resistente se puede valorar conforme a lo indicado en 3.9.2.2.

Se deberá determinar la capacidad de transmisión de solicitudes en ambas superficies y el valor menor de las dos constituirá la capacidad resistente de la conexión micropilote-estructura.

3.9.2.1. Tensión rasante última de cálculo con el cimiento preexistente

La tensión rasante de cálculo entre la lechada o mortero y el cimiento preexistente $\tau_{Rc,d}$, está condicionada por el tipo de material que constituye el mismo, por su calidad y por el estado en que se encuentre, siendo muy difícil establecer a priori valores para la misma. En el apéndice A-5.2 se incluyen valores orientativos obtenidos de la bibliografía.

3.9.2.2. Tensión rasante última de cálculo con la armadura tubular

Para la transmisión de esfuerzos entre la armadura tubular del micropilote y la lechada o mortero que lo rodea, es recomendable la disposición de conectadores.

No obstante, por las características de la cimentación a recalzar y por condicionantes de la ejecución de casos concretos, en ocasiones puede ser difícil la disposición de conectadores y es necesario valorar la transmisión directa por adherencia entre la armadura tubular y la lechada o mortero.

En el *Eurocódigo 4*, para el cálculo de pilares y elementos comprimidos, constituidos por perfiles de acero completamente embebidos en hormigón, se indica para la tensión rasante de cálculo un valor de tres décimas de megapascal ($\tau_{Ra,d} = 0,30 \text{ MPa}$). Este valor es de aplicación en secciones con recubrimiento mínimo de cuarenta milímetros (40 mm) y elementos con armadura longitudinal y transversal según los criterios del propio Eurocódigo.

En el caso de que los recubrimientos sean mayores, pueden considerarse valores más altos de $\tau_{Ra,d}$ multiplicando por un coeficiente β_c dado por la fórmula:

$$\beta_c = 1 + 0,02 r \left(1 - \frac{40}{r} \right) \leq 2,5$$

donde:

r: Recubrimiento de la armadura tubular, expresado en milímetros.

Para adoptar estos valores de tensión rasante en el cálculo de la resistencia de la conexión micropilote-encepado, hay que tener en cuenta que son válidos para elementos comprimidos y que, por tanto, es necesario asegurar la ausencia de tracciones perpendiculares a la superficie de contacto.

3.9.3. CONEXIÓN A UN NUEVO ENCEPADO CONECTADO A SU VEZ A UNA CIMENTACIÓN PREEXISTENTE

En algunos recalces de cimentaciones, los micropilotes se conectan a un nuevo encepado de hormigón armado y es este último el que se conecta a su vez a la cimentación preexistente. El proyecto de este tipo de uniones se efectuará de conformidad con lo especificado en la *EHE*³⁷.

Se recomienda tratar la superficie con la que se va a conectar el nuevo encepado para que resulte un contacto rugoso, de forma que se retire parte del mortero y quede visto el árido grueso. No se recomienda el tratamiento de la junta mediante picado con medios mecánicos, que puede producir microfisuración del hormigón con el consiguiente debilitamiento de la adherencia de la junta. Si fuera posible, se dejará esta superficie con cierta inclinación para que el antiguo cimiento se acodale contra el nuevo al descender.

Los dos cimientos deberán conectarse con pasadores metálicos. La carga de apriete de los pasadores vendrá condicionada por la calidad estructural del cimiento antiguo y deberá determinarse, en cada caso, en el proyecto.

3.10. CONSIDERACIONES DE CÁLCULO EN APLICACIONES ESPECIALES

En los apartados anteriores se han abordado cuestiones relativas al cálculo de micropilotes que, por lo general, suponen la utilización de los mismos como elementos de cimentación.

En este apartado se presentan algunas cuestiones básicas sobre otras aplicaciones:

- Estabilización de taludes o laderas.
- Paraguas de sostentimiento en túneles.
- Otras aplicaciones (mejora del terreno, etc.).

3.10.1. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES O LADERAS

La estabilización de taludes o laderas puede recomendarse, en determinadas circunstancias, a estructuras constituidas total o parcialmente por micropilotes. Normalmente serán cuestiones tales como las dimensiones de la masa de terreno movilizada, la facilidad de acceso de la maquinaria, la posibilidad de empleo combinado de diferentes medidas o la urgencia de la actuación, entre otras, las que llevarán a decantarse por una determinada solución.

La casuística que se presenta en este tipo de aplicaciones puede resultar sumamente compleja, pues múltiples suelen ser las variables interviniéntes, debiendo estudiar el proyecto de manera específica cada caso concreto.

No obstante lo anterior, a continuación se formulan a título meramente orientativo, una serie de cuestiones básicas y sugerencias, que pretenden introducir al lector en determinados aspectos, que suelen resultar de aplicación a buena parte de los casos más frecuentes, y que en ningún caso podrán sustituir al cálculo y diseño específico de cada solución particular.

Cuando se empleen alineaciones de micropilotes para la estabilización de laderas, en casos como el de la figura 3.6, en general, se debe disponer un mínimo de dos alineaciones con al menos dos inclinaciones distintas. En el extremo superior de los micropilotes, se debe disponer siempre un encepado o viga de atado de hormigón armado.

Para el cálculo de los esfuerzos sobre los micropilotes y de la propia estabilidad de la ladera deberán emplearse teorías de pasadores, elementos finitos, modelos que suponen que los micropilotes y el terreno del entorno forman un muro equivalente, etc., que se encuentran fuera del alcance de esta Guía, y que habrán de abordarse en todo caso.

³⁷ Véase: *EHE*, artículo 47.

No obstante lo anterior, en consecuencia con lo expuesto en esta Guía, el proyectista podría utilizar, en su caso, en combinación con el o los métodos y modelos de cálculo previstos, cuestiones específicas desarrolladas en la misma, tales como la adopción de un modelo de interacción suelo-estructura a través de curvas (P , y) como las expuestas en el apéndice A-3.1 o el apéndice A-6.5, o la determinación de la resistencia estructural de los micropilotes frente a los distintos tipos de esfuerzos y su interacción, según lo especificado en el apartado 3.6, entre otros aspectos.

Independientemente de los esfuerzos calculados, la armadura tubular tendrá una sección transversal superior a diez centímetros cuadrados (10 cm^2). En muchos casos es conveniente llegar, e incluso superar, los veinte centímetros cuadrados (20 cm^2).

La longitud de micropilote sobre la superficie de rotura L_{sup} , viene fijada por la geometría de la ladera, no obstante debe procurarse que ésta no supere valores de unos seis o siete metros ($L_{\text{sup}} \leq 6-7 \text{ m}$), si bien, el proyectista podrá justificar la adecuación de longitudes mayores, en su caso. La longitud bajo la superficie de rotura L_{inf} , será aproximadamente la misma que la superior ($L_{\text{inf}} \approx L_{\text{sup}}$) y es recomendable que nunca sea inferior a cinco metros ($L_{\text{inf}} \geq 5 \text{ m}$). En esta zona inferior, los micropilotes deben dotarse de válvulas para inyectar (micropilotes de los tipos IR ó IRS).

Los micropilotes podrán disponerse con inclinaciones comprendidas entre la vertical y veinte o treinta grados ($\alpha \approx 20-30^\circ$) aproximadamente, resultando habituales las configuraciones que comprenden dos o tres inclinaciones, a veces dos de ellas del mismo valor absoluto y signo contrario que se repiten según una secuencia prefijada en planta.

Las separaciones usuales en planta, entre ejes de micropilotes situados en una misma viga de atado o encepado, son las que se indican a continuación (véase figura 3.6).

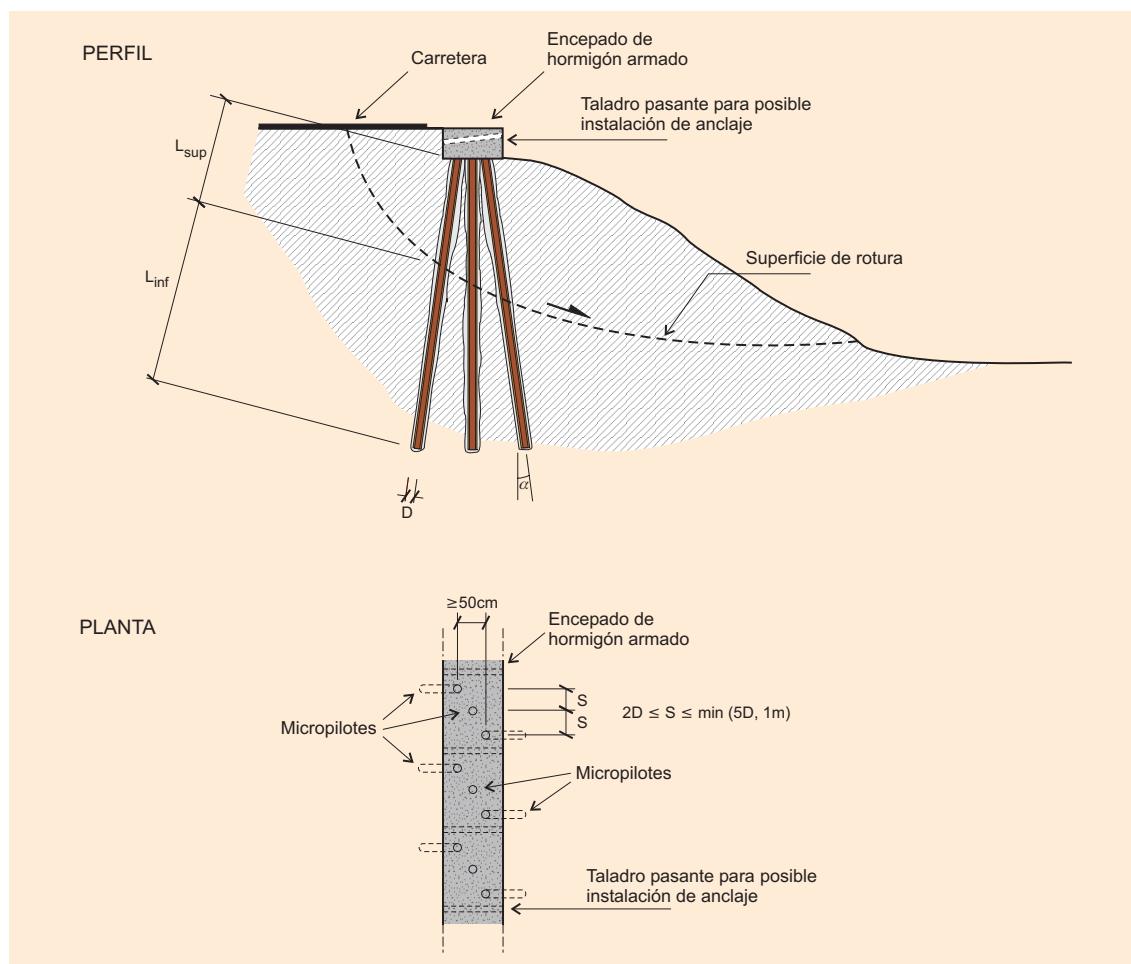


FIGURA 3.6. EJEMPLO DE ESTABILIZACIÓN DE UNA LADERA CON UNA PANTALLA DE MICROPILOTES

- Longitudinalmente a la viga de atado, suelen estar comprendidas entre dos y cinco veces el diámetro de los micropilotes (2D a 5D), sin que dicho valor sea superior a un metro (1 m).
- Ortogonalmente a la dirección de la viga de atado, y entre las alineaciones más distantes comprendidas dentro de la misma, la separación debe ser superior a cincuenta centímetros (50 cm).

Independientemente de que de los cálculos de estabilidad global se deduzca o no su necesidad inicial, se recomienda disponer, en la viga de atado, tubos pasantes en dirección transversal con espaciamientos regulares en planta, para la posible instalación de anclajes al terreno en caso de que en algún momento fueran necesarios. Es una regla de buena práctica recomendable en cualquier circunstancia.

En ocasiones, los trabajos de estabilización de laderas se acometen mediante soluciones complejas que pueden comprender micropilotes juntamente con otras unidades de obra, tales como

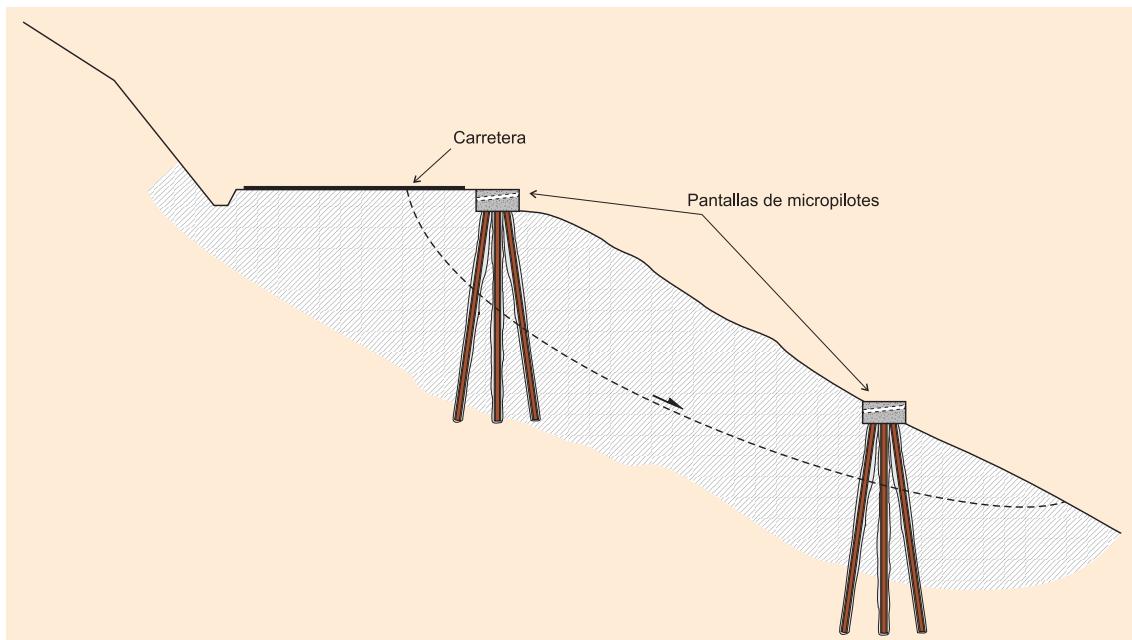


FIGURA 3.7. EJEMPLO DE ESTABILIZACIÓN DE UNA LADERA CON DOS PANTALLAS DE MICROPILOTES

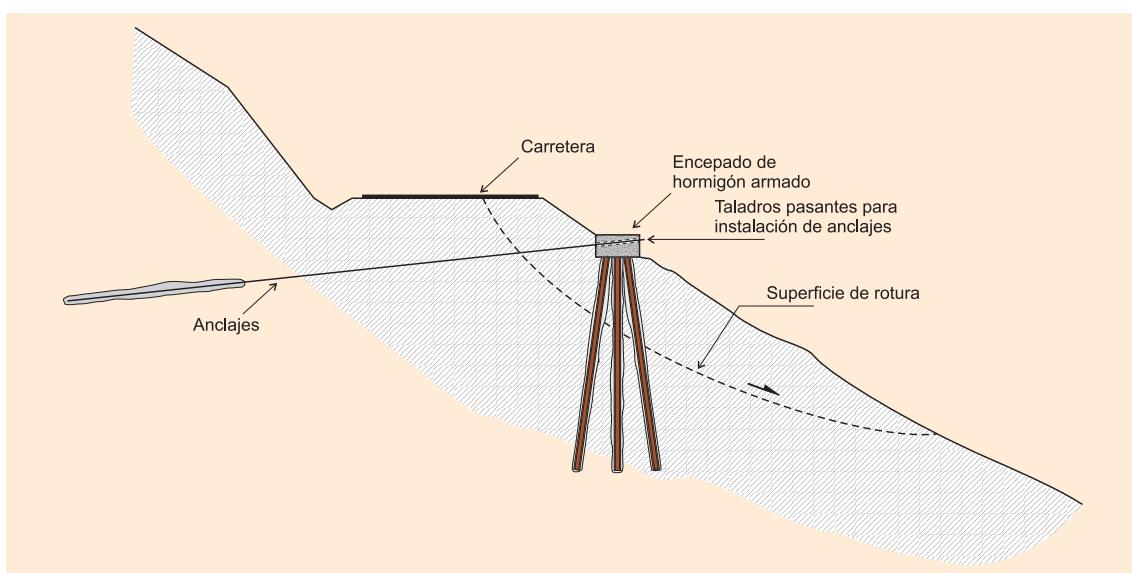


FIGURA 3.8. EJEMPLO DE ESTABILIZACIÓN DE UNA LADERA CON UNA PANTALLA DE MICROPILOTES ANCLADA

muros, anclajes al terreno, obras de drenaje subterráneo, etc., cuya definición excede el contenido de esta Guía.

En la figura 3.7 se muestra un ejemplo de estabilización de una ladera con dos pantallas de micropilotes. En la figura 3.8 se muestra una pantalla de micropilotes con anclajes al terreno.

3.10.2. PARAGUAS DE SOSTENIMIENTO EN TÚNELES

En determinadas circunstancias, se emplean en la ejecución de túneles los denominados paraguas de micropilotes, que consisten en una yuxtaposición de estos elementos hasta obtener superficies aproximadamente troncocónicas –cilíndricas en ocasiones– de semiángulo pequeño³⁸ y eje prácticamente paralelo al del túnel.

Suelen utilizarse como presostenimiento al avance al atravesar zonas débiles, tales como lugares con cobertura escasa, milonitos de falla, etc., o que presenten cualesquiera otras circunstancias que aconsejen una mejora de la capacidad resistente de la sección, con carácter previo a su excavación.

Pueden emplearse, bien en lugares concretos, o bien con carácter general en determinados tramos del túnel, o incluso en toda su longitud; también resultan muy habituales en emboquillas, donde suele disponerse un zuncho perimetral (o viga de atado) de hormigón armado que une sus cabezas.

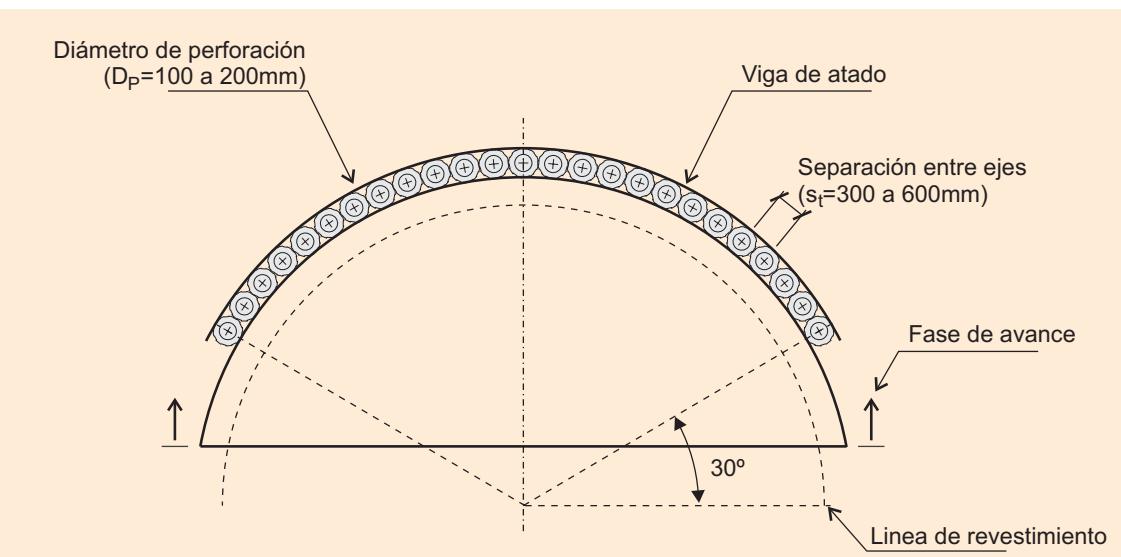
Los paraguas se ejecutan en un solo tramo (en cuyo caso pueden ser troncocónicos o cilíndricos) o en varios (troncocónicos). Cuando el paraguas conste de varios tramos, resultan de especial importancia las uniones entre armaduras tubulares, que deberán evitarse siempre que la longitud de los micropilotes así lo permita. No deberán utilizarse las uniones de rosca de tipo machihembrado sin aumento de sección de la armadura tubular, ni producirse en un mismo plano más de un quince o veinte por ciento (15-20%) de las uniones, que a su vez deberán distribuirse homogéneamente por toda la sección transversal.

Si bien las técnicas específicas sobre el proyecto y la ejecución de túneles no constituyen el objeto de esta Guía, se efectúan a continuación algunas consideraciones generales relativas a esta aplicación:

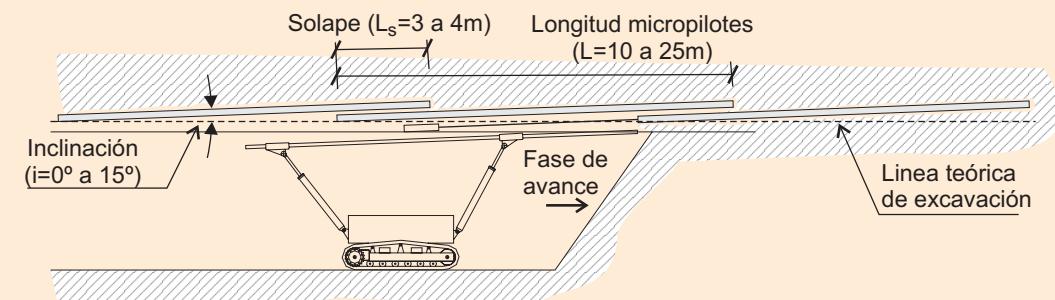
- En las excavaciones en túnel bajo paraguas de micropilotes podrán utilizarse disposiciones como la indicada en la figura 3.9. La longitud de los micropilotes, en general, no será superior a los veinticinco metros ($L \leq 25$ m), con inclinaciones respecto a la horizontal inferiores o iguales a quince grados ($i \leq 15^\circ$). El solape entre los micropilotes de dos avances sucesivos será función de la longitud de avance, de las características del terreno y de la configuración geométrica del emplazamiento, si bien en todo caso deberá ser igual o superior a tres metros ($L_s \geq 3$ m).
- La separación entre micropilotes en una misma sección transversal deberá ser inferior a sesenta centímetros entre ejes contiguos ($s_t < 60$ cm).
- La separación entre micropilotes en una misma sección transversal y la armadura tubular a disponer, se puede calcular en ausencia de datos más específicos, a los efectos de un prediseño, considerando los micropilotes como vigas sometidas al peso de las tierras que soportan (véanse figuras 3.9 y 3.10) y aplicándoles los principios de la resistencia de materiales, con las siguientes observaciones:
 - Para una situación como la de la figura 3.10, la longitud de cálculo de las vigas L_d , es un valor ficticio que resulta de la agregación de tres magnitudes:

$$L_d = L_a + L_f + 1,2 \cdot L_e$$

³⁸ El semiángulo cónico normalmente suele ser inferior o igual a quince grados ($\alpha_c \leq 15^\circ$).



ESQUEMA FRONTAL DEL PARAGUAS DE MICROPILOTES



EXCAVACIÓN BAJO LOS PARAGUAS DE MICROPILOTES

Nota: Las cotas se incluyen a modo de ejemplo

FIGURA 3.9. EJEMPLO DE EJECUCIÓN DE UN PARAGUAS DE MICROPILOTES

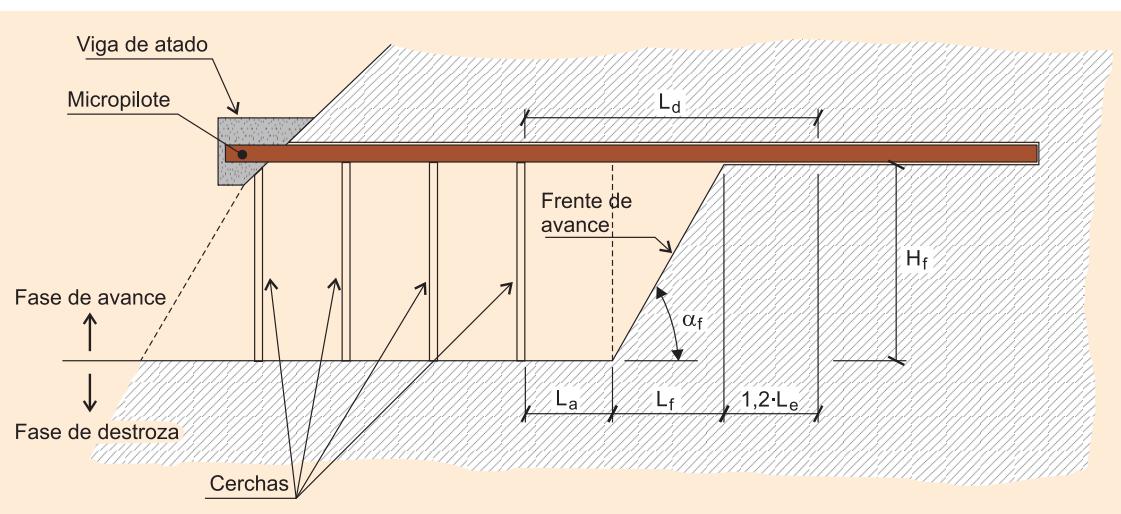


FIGURA 3.10. EJEMPLO DE AVANCE EN UN PARAGUAS DE MICROPILOTES

donde:

L_d : Longitud de cálculo de cada micropilote, considerado como viga.

L_a : Longitud del avance de excavación, que se corresponderá, en general, con la separación entre las cerchas de sostenimiento del túnel, en su caso.

L_f : Longitud del frente de excavación, en planta. Debe determinarse con la expresión:

$$L_f = H_f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_f$$

donde:

L_f : Longitud del frente de excavación, en planta.

H_f : Altura del frente de excavación.

α_f : Ángulo de inclinación del frente de excavación con respecto a la rasante.

L_e : Longitud elástica del micropilote considerándolo empotrado en el terreno. Puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$L_e = \left(\frac{3 E_p I_p}{E} \right)^{1/4}$$

donde:

E : Módulo de elasticidad del terreno.

$E_p I_p$: Rígidez a flexión del micropilote. En este caso equivale a la suma de las rigideces a flexión de la lechada o mortero y de la armadura, es decir:

$$E_p I_p = E_c I_c + E_a I_a$$

siendo:

E_c : Módulo de elasticidad de la lechada o mortero.

I_c : Momento de inercia de la sección de lechada o mortero.

E_a : Módulo de elasticidad del acero.

I_a : Momento de inercia de la sección de acero.

- La carga del terreno que gravita sobre cada micropilote puede determinarse, a modo de primera aproximación, mediante la siguiente expresión:

$$q = \gamma_{ap} \cdot h \cdot S$$

donde:

q : Carga de terreno en la zona de influencia de cada micropilote.

γ_{ap} : Peso específico aparente³⁹ del terreno.

h : Altura del terreno que se considera que gravita (a efectos de cálculo) sobre el sostenimiento a corto plazo⁴⁰.

S : Separación entre ejes de micropilotos contiguos, en planta.

³⁹ Véase definición en el apartado 3.5.

⁴⁰ En el caso de empleo del paraguas como presostentamiento al avance en el interior de un túnel, en ausencia de información más contrastada, puede considerarse de forma aproximada que varía entre la mitad y el diámetro del túnel D_T , es decir:

$$0,5 D_T \leq h \leq D_T$$

En el caso de emboquilles las solicitudes sobre el paraguas dependerán de:

- Configuración geométrica y geomorfológica de la ladera.
- Resto de actuaciones de estabilización adoptadas (unita, bulones, mallas, etc.).

No obstante, en el caso de emboquilles, se estima que deberá considerarse, al menos, la carga que gravita sobre el propio paraguas.

- Para este cálculo, resulta habitual la consideración de una situación intermedia entre la viga biarticulada y la biempotrada, por lo que los esfuerzos de cálculo se pueden estimar, de forma aproximada:

$$M_{Ed} = \frac{q_d \cdot L_d^2}{10}$$

$$V_{Ed} = \frac{q_d \cdot L_d}{2}$$

donde:

M_{Ed} : Momento flector de cálculo.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante de cálculo.

q_d : Valor de cálculo de la carga de terreno (mayorada, véase apartado 3.1).

Los valores así obtenidos deberán compararse con las correspondientes resistencias estructurales definidas en el epígrafe 3.6.

3.10.3. OTRAS APLICACIONES

Se puede conseguir un efecto análogo al de una mejora del terreno mediante la disposición de una red de micropilotes próximos entre sí, preferiblemente inclinados y entrelazados. Este tipo de redes se ha usado fundamentalmente en recalces y constituye un sistema de cimentación relativamente complejo.

Mediante esta aplicación se pretende la consecución de un aumento de la capacidad de soporte global de una masa de terreno y la disminución en la evolución de los asientos, de las estructuras cimentadas sobre el mismo.

En micropilotes de los tipos IR ó IRS de eje aproximadamente vertical que se encuentren próximos entre sí, se puede conseguir además una mejora del terreno por el propio procedimiento de ejecución, ya que la inyección puede consolidar o mejorar las características resistentes medias del terreno situado entre los micropilotes.

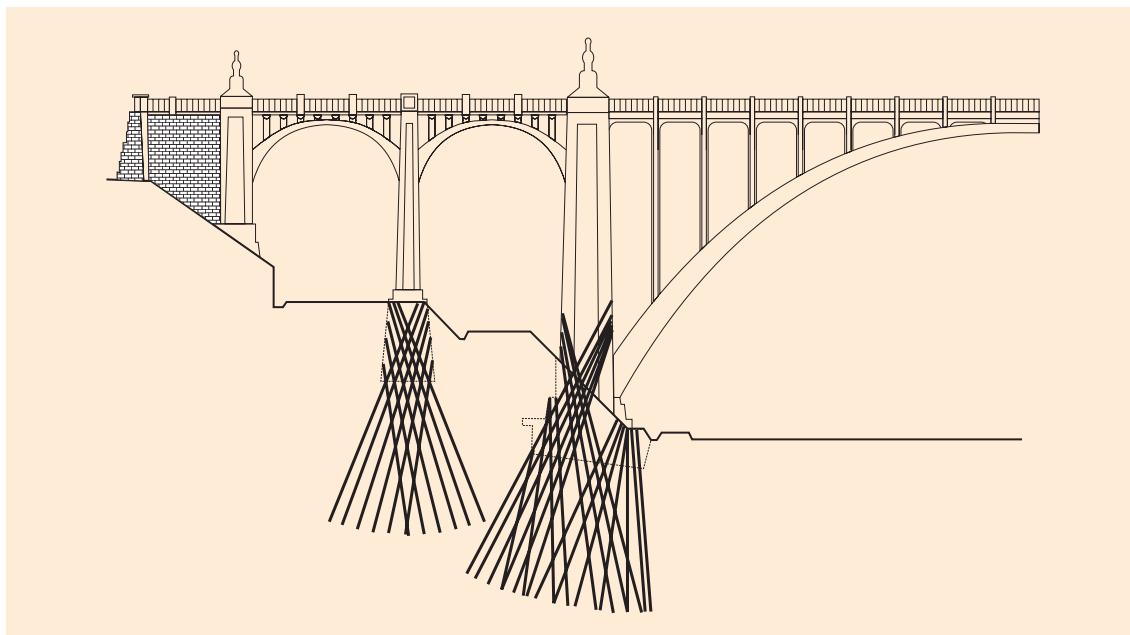


FIGURA 3.11. EJEMPLO DE RECALCE CON MICROPILOTES INCLINADOS Y ENTRELAZADOS

Otra aplicación singular es la disposición de pantallas de micropilotes, bien aisladamente o, con mayor frecuencia, en combinación con otras técnicas, para evitar el asiento de estructuras preexistentes cercanas durante la perforación de túneles. Este tipo de pantallas se esquematiza en la figura 3.12.

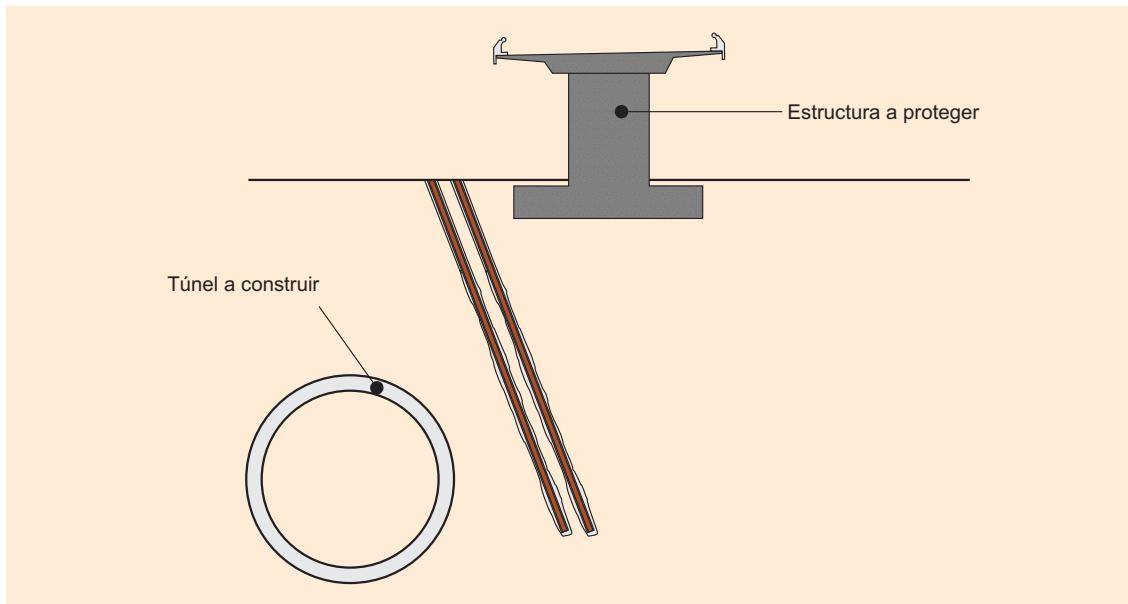


FIGURA 3.12. EJEMPLO DE PANTALLA DE MICROPILOTES PARA REDUCCIÓN DE ASIENTOS EN ESTRUCTURAS CERCANAS

EJECUCIÓN DE LOS MICROPILOTES

4.1. OPERACIONES BÁSICAS

La ejecución de un micropilote comprende normalmente la realización de las siguientes operaciones básicas, que se esquematizan en la figura 4.1 en forma de fases sucesivas:

- Perforación del taladro del micropilote (fases 1, 2 y 3).
- Colocación de la armadura (fase 4).
- Inyección del micropilote (fase 5).
- Conexión con la estructura (fase 6) o con el resto de los micropilotes, mediante un encepado.

Para poder realizar estas operaciones se deberá disponer una plataforma de trabajo que cuente con la superficie necesaria para ubicar tanto el material como los equipos. El gálibo debe ser adecuado a dichas necesidades.

Se estará, en todo caso, a lo dispuesto en la normativa vigente en materia medioambiental, de seguridad y salud, y de almacenamiento y transporte de productos de construcción.

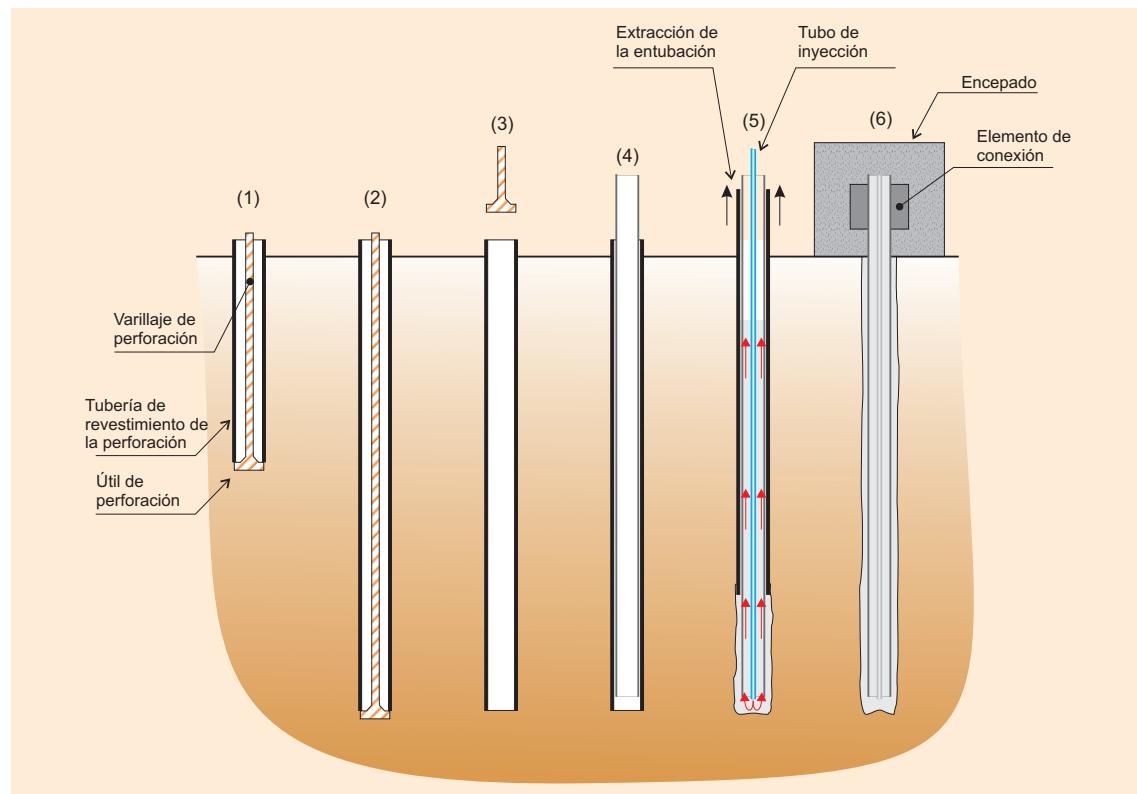


FIGURA 4.1. SECUENCIA TÍPICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN MICROPILOTE

4.2. PERFORACIÓN DEL TALADRO DEL MICROPILOTE

4.2.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Las perforaciones se efectuarán respetando las posiciones, diámetros, longitudes e inclinaciones, indicadas en los planos del proyecto.

El diámetro del taladro debe garantizar el recubrimiento mínimo de la armadura tubular a lo largo de todo el micropilote.

Los diámetros más habituales de perforación D_p , con revestimiento provisional, en relación con el diámetro de la tubería de revestimiento¹ D, y con los exteriores de armaduras tubulares d_e , que resultan más habituales en la práctica, son los que se indican en la tabla 4.1.

TABLA 4.1. DIÁMETROS MÁS HABITUALES DE PERFORACIÓN D_p ,
MICROPILOTE D Y ARMADURA TUBULAR d_e (mm)

D_p	D	d_e (*)
120	114,3	60,3 - 73,0
140	133,0	60,3 - 73,0 - 88,9
160	152,4	73,0 - 88,9 - 101,6
185	177,8	88,9 - 101,6 - 114,3 - 127,0
200	193,7	101,6 - 114,3 - 127,0 - 139,0
225	219,1	114,3 - 127,0 - 139,0 - 168,3

(*) El valor mayor de cada una de las filas de diámetros exteriores de armadura tubular d_e , será válido únicamente en uniones roscadas.

Salvo justificación expresa en otro sentido, el equipo de perforación deberá realizar los taladros con las siguientes **tolerancias**:

- La **posición** del eje de la boca de la perforación no deberá estar desplazado más de cincuenta milímetros (50 mm) respecto de su posición teórica, a comprobar incluso con cinta métrica. Esta verificación (comprobación del replanteo) se efectuará en todos y cada uno de los taladros.
- Respecto al **diámetro nominal** del micropilote D, previsto en el proyecto, su posible reducción, fundamentalmente debida al desgaste de los útiles de perforación, deberá ser inferior o igual a dos milímetros ($\Delta D \leq 2$ mm), a comprobar midiendo dichos útiles con calibre. Se verificará cada vez que se cambie el útil de perforación o cuando se observe un desgaste apreciable y en todo caso, en al menos un cinco por ciento (5%) de los micropilotes que se ejecuten.
- La **longitud** de la perforación no debe diferir en más de veinte centímetros ($\Delta L \leq 20$ cm) de la indicada en el proyecto, a comprobar midiendo, incluso con cinta métrica, la longitud total de los útiles de perforación empleados. Esta verificación se efectuará en al menos un veinte por ciento (20%) de los taladros, con un mínimo de tres (3) unidades por tajo.
- Respecto a la **inclinación** del taladro, no se deberá desviar más de dos grados sexagesimales ($\Delta i \leq 2^\circ$) respecto de la teórica, comprobándose con clinómetro o escuadra con doble graduación en milímetros. Se efectuará en al menos un cinco por ciento (5%) de los taladros, con un mínimo de tres (3) unidades por tajo.

¹ En esta Guía puede considerarse, a efectos prácticos, igual al diámetro nominal del micropilote.

4.2.2. MAQUINARIA DE PERFORACIÓN

Para la perforación se utilizarán máquinas de rotación o roto-percusión, de dimensiones adecuadas al gálibo disponible en cada tajo.

Si bien la descripción específica de la maquinaria no constituye el objeto de esta Guía, se muestran, en la figura 4.2, las partes principales de los equipos de perforación más habituales.

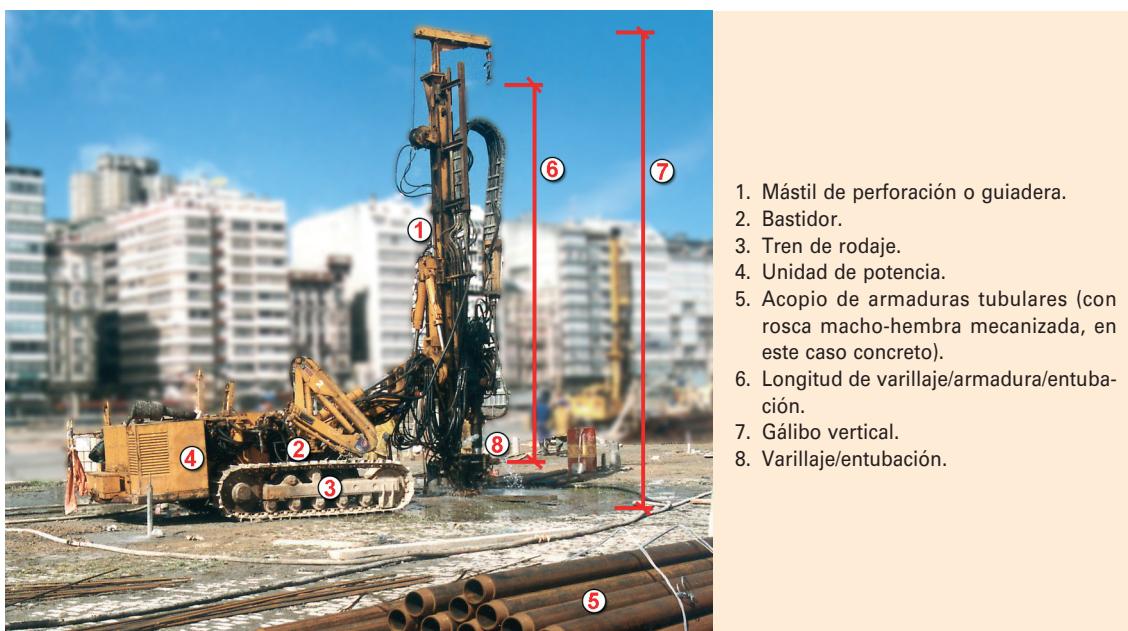


FIGURA 4.2. EQUIPO DE PERFORACIÓN DE MICROPILOTOS

4.2.3. SISTEMAS DE PERFORACIÓN

Se deberá escoger un sistema de perforación que afecte lo menos que sea posible al terreno y a las estructuras a recalzar, en su caso.

Según cuál sea la consistencia del terreno y su posible riesgo de colapso frente al agua, se determinará si la perforación se debe efectuar al amparo de entubación metálica, recuperable o no, o simplemente de los fluidos más adecuados en cada circunstancia. Si los trabajos forman parte de obras de recalce, o en el caso de suelos susceptibles al agua, resulta fundamental el empleo de aire en lugar de agua.

Los fluidos de perforación no serán nocivos ni para los materiales constituyentes de la inyección, ni para la armadura del micropilote, debiendo cumplir en todo caso la normativa vigente en materia medioambiental y de seguridad y salud.

En el caso de terrenos blandos, cársticos, colapsables, etc., será necesario el empleo de entubaciones provisionales. Normalmente se usará la entubación perdida en zonas de huecos o cavernas.

Los sistemas de perforación a utilizar serán:

- Perforación a **rotación**: consiste en provocar la rotura del terreno, o los materiales a perforar (en el caso de cimentaciones preexistentes), por la fricción generada en la rotación del útil de perforación.

Resulta especialmente recomendable para atravesar cimentaciones antiguas al provocar, en general, menores vibraciones que la rotoperCUSIÓN. En general se efectúa con la batería usual de sondeos, con barrenas helicoidales o tricono.

-
- Perforación a **rotopercusión**: consiste en provocar la trituración de los materiales a perforar, por fricción y percusión de manera conjunta. Se emplean para ello, martillos de fondo o en cabeza.

La maquinaria de perforación, debe contar con sistemas de recuperación de polvo cuando se trabaje en seco y especialmente cuando se haga en roca.

El proceso de perforación deberá efectuarse de forma que cualquier variación significativa de las características del terreno, respecto a lo previsto en el proyecto, sea detectada inmediatamente, debiendo reflejarse en el correspondiente parte de trabajo.

Habrá de tenerse en cuenta, en todo caso, que el sistema de perforación realmente empleado tiene incidencia en el cálculo de la resistencia estructural del micropilote a compresión (véase epígrafe 3.6.1) a través del coeficiente de influencia del tipo de ejecución F_e , por lo que, cualquier variación en la elección del sistema de perforación, respecto de lo previsto en el proyecto, deberá implicar la plena asunción de los nuevos valores de cálculo resultantes (véase tabla 3.5).

4.2.4. PRINCIPALES PRECAUCIONES A ADOPTAR EN LA PERFORACIÓN

Las perforaciones deberán ejecutarse de conformidad con lo especificado en el proyecto, y en todo caso, según lo indicado en el protocolo de ejecución.

Se deberán prever con antelación las técnicas necesarias para contrarrestar la presión del agua y los posibles desmoronamientos de los taladros, tanto durante la propia perforación como durante la colocación de la armadura y la realización de la inyección.

En concreto, se adoptarán precauciones especiales al atravesar niveles artesianos para evitar la salida de agua con arrastres de terreno. Se podrán emplear varios sistemas: inyección de la zona hasta conseguir taponar la afluencia de agua, y reperforación posterior; entubación perdida desde la superficie hasta la cota inferior de artesianismo; elevación de la plataforma de trabajo para contrarrestar la presión; sistema de cierre en la boca de taladro, etc.

Ejecución de recalces

Cuando los micropilotes se utilicen como recalce de estructuras preexistentes se deberá proceder, como mínimo durante la fase de perforación, al control de los movimientos de la propia estructura a recalzar y de aquellas otras, próximas a la zona de trabajo, que pudieran verse afectadas.

Salvo especificación expresa en contra, el proyecto deberá incluir un plan de auscultación que contemple dichos aspectos, así como aquellos otros que se consideren de interés. El plan deberá contemplar la medición de asientos o levantamientos por un periodo de tiempo mínimo² a definir en el mismo.

El proyecto deberá incluir una estimación de los movimientos esperables en las estructuras alejadas debidos a la ejecución de los micropilotes. El control de movimientos se realizará mediante nivelación de precisión, con referencias en puntos prefijados de las estructuras y bases fuera de la zona susceptible de afección.

En el proyecto, y en todo caso en el protocolo de ejecución, deberán definirse los apuntalamientos, apeos o cualquier otra medida provisional necesaria tanto en las propias estructuras a recalzar, como en aquellas otras más próximas que pudieran verse afectadas.

En el proyecto, y en todo caso en el protocolo de ejecución, deberá definirse el sistema de perforación (preferiblemente con aire), la secuencia constructiva a seguir en la ejecución de los micropilotes, especificando de modo expreso el orden de ejecución y los tiempos de espera a observar.

² Inicialmente, en casos normales, puede pensarse en períodos de observación del orden de seis (6) meses, desde la finalización de los trabajos de recalce, si bien este aspecto debe determinarse de modo específico en cada circunstancia, y variarse, en su caso, en función de la evolución del comportamiento de la cimentación.

En general, no se perforarán dos micropilotes adyacentes de forma consecutiva; así, en zapatas corridas o vigas de arriostramiento, se dejarán al menos dos micropilotes intermedios mientras ello sea posible y en zapatas aisladas deberá transcurrir un mínimo de veinticuatro horas (24 h) entre la ejecución de cada dos micropilotes consecutivos en el mismo cimiento.

4.3. COLOCACIÓN DE LA ARMADURA

Después de finalizar la perforación del taladro deberá procederse, a la mayor brevedad posible, a la colocación de la armadura.

La recepción de las armaduras en obra, se efectuará conforme a lo especificado en el capítulo 5 de esta Guía.

Previamente a la colocación de la armadura tubular se comprobará que toda la longitud del taladro se encuentra libre de obstáculos y limpia de incrustantes o de cualquier posible material o cuerpo extraño. Asimismo se comprobará el estado de las uniones de las armaduras tubulares.

La colocación de la armadura se efectuará sin alterar la posición de ninguno de sus elementos (centradores, manguitos, etc.).

Se empleará el número de centradores necesario para garantizar la correcta colocación de la armadura y asegurar el recubrimiento mínimo frente a la corrosión, disponiéndose de modo tal, que no impidan el correcto proceso de inyección del micropilote y sean solidarios a la armadura tubular. Salvo justificación expresa en otro sentido, se colocarán al menos cada tres metros (3 m) de longitud de la armadura. En cualquier caso, e independientemente de la longitud del micropilote, el número mínimo de secciones transversales en que se instalen centradores será de dos (2).

En caso de utilizarse, además de la armadura tubular, barras de acero corrugadas, será necesario disponer elementos que las centren o mantengan en la posición adecuada.

Se recomienda que la armadura tubular quede a una distancia mínima de diez centímetros (10 cm) del fondo del taladro.

4.4. INYECCIÓN DEL MICROPILOTE

4.4.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Después de efectuar la perforación del taladro y la colocación de la armadura, deberá procederse, a la mayor brevedad posible, a la inyección del micropilote.

La inyección del micropilote, con lechada o mortero de cemento, tiene los siguientes objetivos fundamentales:

- Constituir el fuste y la punta del micropilote propiamente dichos, materializando tanto el contacto con las paredes de la perforación como el relleno interior de la armadura tubular.
- Proteger a la armadura de la corrosión.

Respecto a los materiales a emplear y sus dosificaciones se estará a lo especificado en el apartado 2.2 de esta Guía.

Los parámetros de inyección (presión, caudal, etc.) deben definirse en el proyecto, y en todo caso en el protocolo de ejecución, y reflejarse en los correspondientes partes de trabajo.

El tiempo transcurrido entre la perforación, instalación de la armadura e inyección habrá de ser el menor posible, debiéndose establecer de forma expresa en el proyecto y en todo caso en el protocolo de ejecución, según las características del terreno y de las obras a realizar. Se recomienda que en ningún caso este tiempo sea superior a veinticuatro horas (24 h).

Tal y como se especifica en el capítulo 1, en esta Guía se aborda la clasificación de los micropilotes, atendiendo precisamente al tipo de inyección empleado. En el epígrafe 4.4.2 se describen estos someramente.

4.4.2. TIPOS DE INYECCIONES

A los efectos de esta Guía, se diferencian tres clases de micropilotes, atendiendo al tipo de inyección empleado (IU, IR, IRS) y cuatro tipos de inyecciones, al considerar de manera independiente la denominada *previa*, que puede utilizarse con cualquiera de dichas clases.

Respecto de la posible idoneidad a priori de cada uno de los tipos de micropilote, se estará a lo especificado en el apartado 1.3 de esta Guía. No obstante, el proyecto deberá definir el tipo de inyección a utilizar en cada caso concreto.

A continuación se describen, de forma breve, cada uno de los tipos de inyección referidos:

- a) **Inyección previa:** cuando las pérdidas de inyección se prevean elevadas, entiéndense normalmente como tales cuando sean superiores a dos veces y media o tres veces el volumen teórico³ de inyección ($m \approx 2,5-3$), se realizará una inyección previa con lechada o mortero de cemento, que será necesario reperforar para proseguir con la ejecución del micropilote.
- b) **Inyección única global (IU):** efectuada en una sola fase, rellena el hueco comprendido entre el taladro de la perforación y la armadura tubular, así como el interior de ésta. La inyección se debe realizar desde la punta a la cabeza del micropilote, pudiéndose efectuar de alguna de las siguientes maneras:
 - Mediante inyección a través de un tubo, generalmente de plástico, colocado en el fondo del taladro, produciéndose el ascenso de la lechada tanto por el exterior como por el interior de la armadura tubular. En este caso, y debido al pequeño diámetro de los tubos de plástico empleados, sólo se puede inyectar lechada.
 - Inyectando directamente la lechada o mortero por el interior de la armadura tubular para que rellene tanto el hueco entre ésta y el terreno (ascendiendo por la corona exterior), como el interior de la armadura tubular.

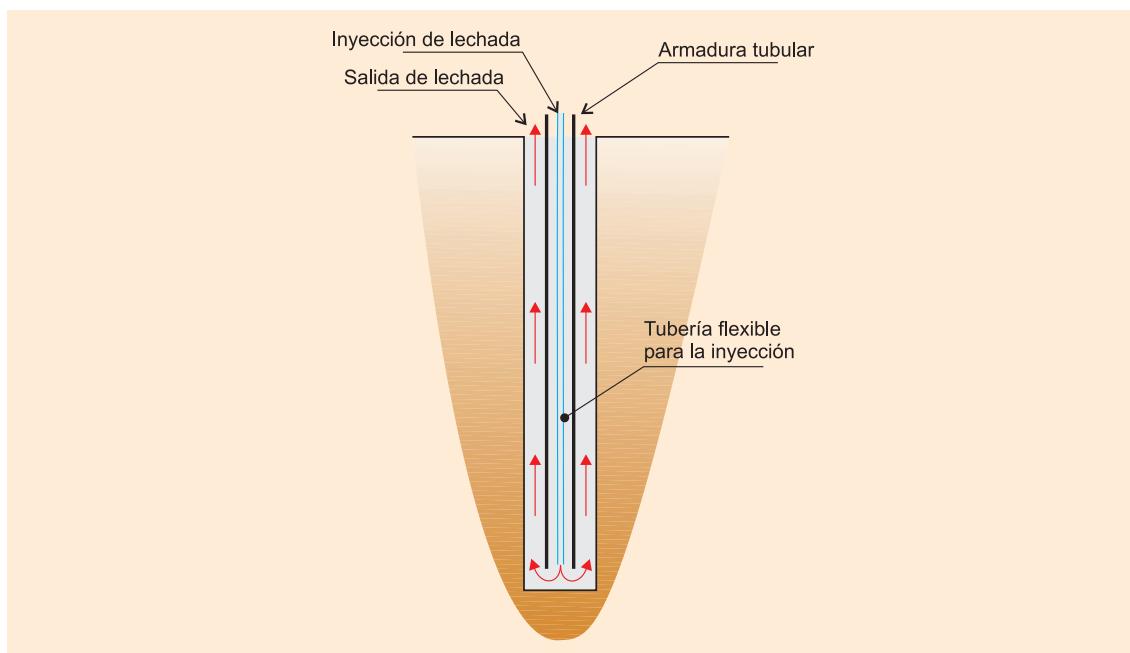


FIGURA 4.3. MICROPILOTE TIPO IU

³ Véase epígrafe 4.4.4.

En algunos casos, si transcurrido cierto tiempo (sin alcanzar el fraguado) se observa que disminuye el nivel de la lechada, por penetración de ésta en el terreno, puede ser necesario volver a inyectar.

En los micropilotes tipo IU la presión de inyección normalmente será superior a la mitad de la presión límite del terreno e inferior a dicha presión límite:

$$0,5 P_{\text{lím}} \leq p_i \leq P_{\text{lím}}$$

La presión límite del terreno $P_{\text{lím}}$ será la obtenida preferiblemente en el ensayo presiométrico, o en su defecto por correlación con otros ensayos o parámetros del suelo (véase apéndice A-6.5).

La presión de inyección se podrá medir a la salida de la bomba, siempre que la boca del taladro no se encuentre a una distancia superior a cincuenta metros (50 m) en planta, ni a un desnivel mayor de un metro (1 m). En caso contrario, se medirá en boca de taladro.

En la mayoría de los casos, suele resultar un criterio práctico suficiente, fijar la presión de inyección entre medio y un megapascal ($0,5 \leq p_i \leq 1 \text{ MPa}$), salvo cuando dichos valores superen la presión límite del terreno, lo que podría suceder en suelos granulares de compacidad floja a media, cohesivos de consistencia blanda y media a firme, o rocas muy fracturadas (véase tabla A-6.6).

En aquellos casos en que, bien por no permitirlo el terreno según los criterios recién especificados, o bien por cualquier otra circunstancia, la presión de inyección no hubiera alcanzado el valor mínimo de medio megapascal ($p_i \leq 0,5 \text{ MPa}$) durante todo el proceso de inyección, los ábacos para el cálculo del rozamiento unitario límite por fuste (véase figura 3.3) no resultarían de aplicación, recomendándose preferentemente en estos casos, la realización de pruebas de carga.

- c) **Inyección repetitiva (IR):** En estos micropilotes el relleno e inyección se realiza en dos fases:
- En primer lugar, y una vez introducida la armadura, se realiza un relleno del taladro con lechada en la forma ya descrita para los micropilotes del tipo IU.
 - Posteriormente se realiza la reinyección, de alguno de los siguientes modos:

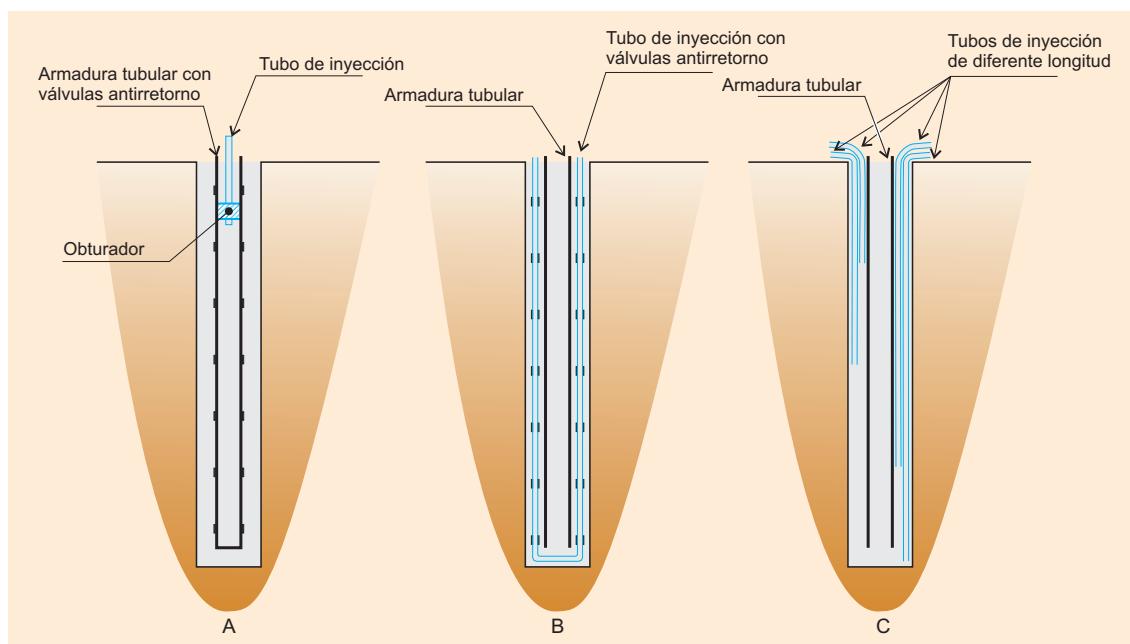


FIGURA 4.4. MICROPILOTE TIPO IR

- A través de la propia tubería que sirve de armadura y que está provista de válvulas antirretorno de efecto simultáneo en la zona a reinyectar (caso A de la figura 4.4).
- Mediante un tubo o circuito con válvulas antirretorno de efecto simultáneo, colocado en el espacio entre el terreno y la armadura y que debe limpiarse para permitir una inyección posterior (caso B de la figura 4.4).
- Mediante conductos (en general, de plástico) de distinta longitud que lleguen a diferentes cotas del micropilote, colocados por el exterior de la armadura, a través de los cuales se inyecta la lechada (caso C de la figura 4.4).

Al final de la última fase de inyección, la presión en la boca del taladro deberá cumplir los mismos criterios que se han especificado para las inyecciones del tipo IU, no siendo de aplicación los ábacos de la figura 3.3, cuando la presión de inyección no alcance el valor mínimo requerido para poder considerarlos, en las inyecciones del tipo IU.

Acabado el proceso se realizará una inyección final de relleno de la armadura tubular.

- d) **Inyección repetitiva (IRS):** Realizada mediante inyección a presión de la perforación, desde el interior de la armadura tubular, con doble obturador, a través de manguitos instalados en dicha armadura. La distancia entre cada dos manguitos consecutivos deberá ser como máximo de un metro (1 m).

Previamente, la corona anular entre la tubería de armadura y la pared del taladro debe llenarse con una lechada (inyección de sellado) que sirva de cierre, e impida a la inyección a presión escapar hacia la superficie.

Se puede inyectar más de dos veces a través de aquellos manguitos que se desee en función, normalmente, de la admisión de lechada obtenida.

La presión de inyección será normalmente algo superior a la presión límite del terreno, que deberá obtenerse del ensayo presiométrico o, en su defecto, por correlación con otros ensayos o parámetros del suelo (véase apéndice A-6.5):

$$p_i \geq P_{lim}$$

Además de lo anterior, la presión de inyección deberá ser, en general, mayor que un megapascal ($p_i \geq 1 \text{ MPa}$).

Acabado el proceso se realizará una inyección final de relleno de la armadura tubular.

4.4.3. MAQUINARIA DE INYECCIÓN

El equipo para la ejecución de la inyección estará constituido al menos por una mezcladora, un agitador y una bomba de inyección.

- La **mezcladora** deberá ser de alta turbulencia, de forma que se garantice la calidad y homogeneidad de la mezcla obtenida.
- El **agitador** sirve como deposito de acumulación entre la mezcladora y la bomba de inyección, para garantizar la continuidad de inyección. Mediante unas aspas que giran lentamente se homogeneiza la lechada o mortero durante su permanencia en el deposito, evitando así la formación de burbujas de aire. Deberá disponer de un sistema para controlar la admisión en cada fase o taladro.
- La **bomba de inyección**, hidráulica o neumática, es la encargada de impulsar la mezcla durante la inyección, proporcionando los caudales y presiones especificados en el proyecto. Irá provista de un manómetro para medir la presión.

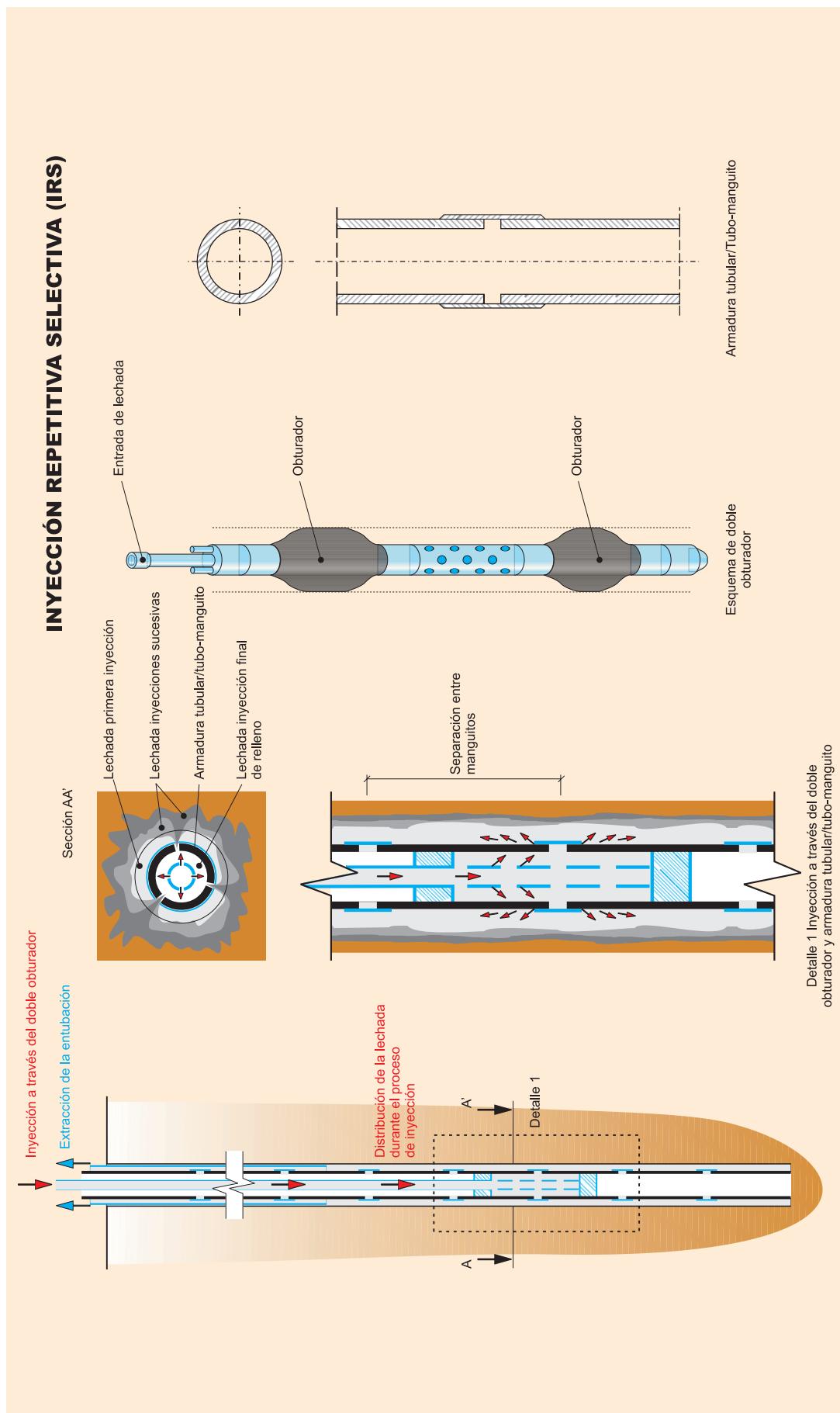


FIGURA 4.5. MICROPILOTE TIPO IRS

4.4.4. VOLUMEN MÁXIMO DE INYECCIÓN

El volumen máximo de inyección es la cantidad máxima de lechada o mortero que es previsible que sea necesario inyectar para la ejecución de un micropilote. Es función de las características del terreno y del tipo de inyección.

El volumen máximo de inyección V_{\max} , es igual al volumen teórico del micropilote V_t , más el volumen adicional V_a , de lechada o mortero que se introduce al inyectar, bien por infiltración en el terreno, por irregularidades geométricas, etc. La relación entre los parámetros V_{\max} y V_t puede expresarse a través del coeficiente adimensional m , es decir:

$$V_{\max} = V_t + V_a = m \cdot V_t$$

donde:

V_{\max} : Volumen máximo de inyección.

V_t : Volumen teórico de inyección (obtenido al considerar el diámetro nominal del micropilote, D).

V_a : Volumen adicional de inyección.

m : Parámetro adimensional que relaciona los volúmenes máximo y teórico de inyección.

Los valores del parámetro m que pueden esperarse normalmente, en función del tipo de inyección, son los que se indican en la tabla 4.2. Dentro de los intervalos aproximados que se incluyen en dicha tabla, los valores más altos se corresponderán con rocas muy fracturadas, suelos con elevada porosidad, suelos muy deformables, etc.

TABLA 4.2. COEFICIENTE m

TIPO DE INYECCIÓN	m
Previa, IU	1,25 - 1,50
IR	1,50 - 2,00
IRS	1,50 - 3,00

4.5. EJECUCIÓN DE MICROPILOTES DE EJE NO VERTICAL

4.5.1. MICROPILOTES INCLINADOS

Por diferentes motivos resulta habitual la ejecución de micropilotos de eje no vertical. En este epígrafe se abordarán cuestiones específicas sobre su ejecución, distinguiendo para ello según la boca del taladro se encuentre a mayor cota que la punta del micropilote (caso más habitual: micropilotos inclinados) o no se produzca esta circunstancia (micropilotos horizontales o en contrapendiente).

Normalmente la inclinación de los micropilotos con respecto a la vertical, no suele superar los veinte o treinta grados sexagesimales ($\alpha \leq 20-30^\circ$), por los siguientes motivos:

- Problemas asociados al proceso de perforación inclinada:
 - Mayor facilidad para que se produzca la inestabilidad de las paredes de la perforación, respecto del caso de eje vertical.
 - Aumento, por lo general, de la desviación de la perforación respecto a su eje teórico, conforme lo hace la inclinación de ésta.
 - Mayores dificultades para el emboquille de la perforación en el caso de recalces o reforzamiento de estructuras existentes y mayores necesidades de espacio libre debido a la inclinación del mástil de perforación.

- Flexión inducida por el peso del terreno sobre el micropilote.

A parte de las dificultades referidas, que en general aumentan conforme lo hace la inclinación de los micropilotos, estos se ejecutarán normalmente con técnicas análogas a los de eje vertical.

4.5.2. MICROPILOTOS HORIZONTALES O EN CONTRAPENDIENTE

Además de las dificultades inherentes a la perforación de taladros inclinados, referida en el epígrafe anterior, la inyección de micropilotos horizontales o en contrapendiente presenta la singularidad de que, debido a su disposición geométrica, es necesario adoptar una serie de medidas adicionales para asegurar el relleno completo del mismo.

En los micropilotos tipo IU, la forma en que se debe proceder consiste en efectuar un cierre en la boca (cabeza del micropilote) de la corona circular existente entre la armadura tubular y el terreno, que deberá equiparse con boquilla de inyección. Por dicha boquilla se comienza la inyección hasta que la misma, llegando al fondo del taladro (punta del micropilote, cuya cota es superior o igual a la de su cabeza) vierta por el interior de la armadura, efectuándose el cierre en la boquilla referida cuando las características de la mezcla que retorna sean similares a las de la mezcla que se inyecta.

En los micropilotos tipo IR e IRS, una vez realizada la inyección a través de los manguitos, el interior de la tubería de armadura debe de llenarse de mortero o lechada. Por ello, se introduce un pequeño latiguillo hasta el fondo de la armadura tubular (punta del micropilote), que sirve como purga y rebosadero a la inyección, que se ejecuta desde la boca.

4.6. CONEXIÓN DE LOS MICROPILOTOS CON LA ESTRUCTURA

Una vez efectuada la inyección del micropilote, se deberá proceder a la conexión de éste con la estructura, o con el resto de los micropilotos mediante un encepado o viga de atado.

En el caso de recalces en que la unión entre la estructura a recalzar y los micropilotos se realice de una forma directa, es decir que la propia cimentación existente haga las veces de encepado, se recomienda observar las siguientes cuestiones básicas:

- Antes de la ejecución del micropilote se debe perforar el cimiento preexistente mediante un taladro pasante.
- Posteriormente se debe ejecutar el micropilote.
- En la última fase se debe eliminar la lechada o mortero de la zona en que el micropilote atraviese el antiguo cimiento (mediante chorro de arena a presión preferiblemente), y rellenarse con lechada o mortero sin retracción para garantizar el contacto efectivo entre las diferentes superficies. Si se produjera decantación en esta última inyección, debería procederse a su relleno hasta compensar ésta.

Cuando se construyan nuevos encepados o elementos de unión, se debe limpiar de lechada o mortero la zona de armadura tubular que vaya a quedar en contacto con el hormigón armado, en los encepados o vigas de atado. Se deben colocar, asimismo, en el tramo limpio de la armadura tubular, los conectadores previstos en el proyecto, efectuándose las conexiones con sujeción a lo especificado en el mismo.

4.7. PROTOCOLO DE EJECUCIÓN Y PARTES DE TRABAJO

4.7.1. PROTOCOLO DE EJECUCIÓN

Independientemente de las cuestiones de diseño y cálculo que constituyen el capítulo 3 de esta Guía, se recomienda que el proyecto incluya una serie de aspectos básicos⁴ relativos a la ejecución

⁴ Se recomienda que el proyecto contenga al menos, una estimación preliminar de los conceptos que deben figurar en el protocolo de ejecución, los cuáles se listan en este mismo epígrafe.

de los micropilotes, a partir de los cuales (y a la vista de cada uno de los tajos) el Contratista deberá presentar para su aprobación, al Director de las Obras, un protocolo de ejecución indicando cómo se van a realizar los micropilotes.

Este protocolo, que deberá elaborarse en todo caso, habrá de incluir al menos los siguientes aspectos:

- Ubicación y numeración de los micropilotes, referida a planos.
- Sistema de perforación a utilizar en cada uno de los micropilotes, y sistema de sostenimiento temporal de la perforación en caso necesario.
- Diámetros de la perforación y nominal de cada micropilote.
- Inclinación prevista.
- Longitud de cada micropilote y criterios de empotramiento.
- Orden cronológico de ejecución y tiempos de espera necesarios, en su caso.
- Definición de la armadura a utilizar (indicando al menos, diámetros y características del acero), de las uniones, manguitos, centradores, conectadores y otros elementos, en su caso.
- Tiempo máximo que podrá transcurrir entre la finalización de la perforación, instalación de la armadura e inyección del micropilote.
- Características de la lechada o mortero: dosificación de la mezcla (incluyendo aditivos en su caso), resistencia a compresión simple al menos a siete y veintiocho días (7 y 28 d), densidad, viscosidad, estabilidad y tiempo de amasado.

Estos valores se fijarán mediante la realización de ensayos de laboratorio previos y constituirán la fórmula de trabajo de la mezcla de inyección. Se fijará un límite máximo para el tiempo que puede transcurrir desde la ejecución de la mezcla hasta la finalización de la fase de inyección.

En caso de que sea necesario para establecer el orden cronológico de ejecución de los micropilotes, se determinará también, mediante ensayos previos, la resistencia a compresión simple a uno y tres días (1 y 3 d) de edad, estimando, si fuera preciso, una curva de evolución de resistencia de la mezcla.

- Características de los equipos de fabricación de la lechada o mortero y sistema de dosificación a emplear.
- Definición del tipo de inyección (IU, IR, IRS), necesidad en su caso de inyección previa, número mínimo de reinyecciones y presión límite del terreno. En el caso de los tipos IR e IRS se indicarán, además, la distancia y situación de las válvulas o manguitos a instalar en la armadura tubular del micropilote y su ubicación aproximada.
- Procedimiento de inyección, que incluya volúmenes (teórico y máximo), caudales, presiones, tiempos de ejecución y criterios para dar por finalizada la fase de inyección.
- Características de los equipos de inyección y sistemas de control y registro de los parámetros de inyección: volúmenes, caudales y presiones de inyección.
- Definición de los ensayos de control a efectuar durante la fase de inyección.
- Descripción de los trabajos a llevar a cabo para la conexión con la estructura existente o encepado.
- Definición de apeos, apuntalamientos y cualquier otra medida provisional a adoptar en la estructura a recalzar y en las del entorno, en su caso.
- Ensayos de carga o pruebas «in situ» de otro tipo, que se hayan previsto.
- Cuando fuera preciso, plan de auscultación de movimientos de la estructura y de las del entorno, en su caso.

- Medidas a adoptar en caso de que durante la ejecución se produzcan imprevistos o se aprecien desviaciones importantes respecto a los parámetros previstos en proyecto, características del terreno, presión de inyección, movimientos excesivos en estructuras, etc.
- Cualquier otra circunstancia que, en función de las características concretas de la obra, deba tenerse en cuenta.

4.7.2. PARTES DE TRABAJO

Una vez concluida la ejecución de cada micropilote se realizará un parte de trabajo redactado a partir de lo realmente ejecutado en obra, que incluya al menos la siguiente información:

- Ubicación y numeración de cada micropilote, referida a planos.
- Comprobación del replanteo de cada taladro.
- Datos de la perforación: fecha y horas de inicio y conclusión, longitud, inclinación, tipo de avance (rotación o roto-percusión), tipo de sostenimiento (entubación perdida o recuperable, empleo de lodos, perforación estable, etc.), diámetros (en el terreno y en el cimiento antiguo en su caso), así como descripción cualitativa del terreno y de su dureza, afluencia de agua y cualquier otro dato que se considere relevante. Asimismo deberá hacerse mención expresa a la observación de las tolerancias geométricas referidas en el epígrafe 4.2.1.
- Datos de la armadura (tubular y de acero corrugado en su caso), uniones, manguitos, centradores y otros elementos, conforme a lo especificado en el protocolo de ejecución.
- Datos de la mezcla de inyección: fórmula de trabajo de la lechada o mortero utilizada; fecha y horas de la preparación de la mezcla y de comienzo y final de la inyección y de las reinyecciones en su caso; tiempo transcurrido entre la finalización de la perforación, instalación de la armadura e inyección; volúmenes inyectados, caudales, presiones, dosificación, tiempo de amasado, densidad y viscosidad⁵; identificación de las probetas tomadas para ensayos y resultados de los mismos.
- Secuencia constructiva realmente seguida, refiriendo fechas y horas de ejecución de cada uno de los micropilotos.
- Incidencias o imprevistos, de cualquier tipo, acaecidos durante la realización de los trabajos y medidas adoptadas ante los mismos.
- Personas responsables de cada comprobación u operación referida en este parte y equipos de perforación e inyección utilizados.
- Cualquier otro aspecto⁶ que, a la luz de lo especificado en el proyecto o en el protocolo de ejecución, se considere relevante.

⁵ Estos datos se deberán especificar por cada válvula o manguito, en los micropilotos tipo IRS.

⁶ Resulta particularmente interesante la inclusión de fotografías a color que reflejen aspectos de la ejecución de los micropilotos, debiendo identificarse en las mismas de cuál de ellos se trata en cada caso (se sugiere la utilización de la numeración referida a planos que debe adjuntarse en el propio parte de trabajo).

PROCEDIMIENTOS DE CONTROL

5.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Los procedimientos de control deberán establecerse de acuerdo con lo especificado en la normativa vigente al respecto, en particular en la *EHE*¹, *RC* y *PG-3*, así como en el pliego de prescripciones técnicas particulares del proyecto.

Deberán controlarse en cualquier caso, los siguientes aspectos:

- Materiales.
- Cada una de las fases de ejecución:
 - Perforación.
 - Colocación de la armadura.
 - Fabricación de la lechada o mortero.
 - Inyección.
 - Partes de trabajo.

En los casos en que así se determine, se efectuarán pruebas de carga según lo especificado en el apartado 5.4 de esta Guía.

5.2. CONTROL DE MATERIALES

5.2.1. ARMADURA TUBULAR

A los efectos del control del suministro de los productos de acero para armadura tubular, se denomina partida al material que cumpla simultáneamente las siguientes condiciones:

- Que corresponda al mismo tipo de perfil hueco.
- Que corresponda al mismo tipo y grado de acero.
- Que proceda de un mismo fabricante.
- Que haya sido suministrado de una vez.

No podrán utilizarse productos de acero como armadura tubular que no adjunten la documentación indicada a continuación:

- A la entrega de cada suministro se aportará un albarán con documentación anexa, conteniendo, entre otros, los siguientes datos:
 - Nombre y dirección de la empresa suministradora.
 - Fecha de suministro.
 - Identificación del vehículo que lo transporta.

¹ Véase: *EHE*, artículo 95.

-
- Número de partidas que componen el suministro, identificando, para cada partida, al fabricante y su contenido (peso, número de perfiles, tipo y grado de acero del material base de partida).
 - Además, cada partida deberá llegar acompañada de la siguiente documentación:
 - Certificado del fabricante, firmado por persona física, en el que se indiquen los valores de las diferentes características especificadas en la norma UNE EN 10210 ó UNE EN 10219, según corresponda.
 - Resultados de los ensayos que justifiquen que los productos de acero cumplen las características anteriormente citadas.

Una vez comprobada la documentación que debe acompañar al suministro, se debe proceder a comprobar el correcto marcado de los perfiles o paquetes de perfiles, que debe incluir la designación abreviada de la norma que corresponda, el tipo y grado de acero y el nombre o las siglas del fabricante.

Ejemplo: EN10210 – S275 JO + Marca del fabricante

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto incluirá los criterios para llevar a cabo el control de los acopios.

5.2.2. BARRAS DE ACERO CORRUGADAS

Para el control de las barras de acero corrugadas se estará a lo especificado en el artículo 240 del PG-3.

5.2.3. CEMENTO

Se estará a lo especificado en el artículo 202 del PG-3.

5.3. CONTROL DE EJECUCIÓN

5.3.1. CONTROL DE LA PERFORACIÓN Y COLOCACIÓN DE LA ARMADURA

Durante la ejecución de los micropilotes se comprobará que se cumplen los procedimientos y secuencias constructivas establecidas en el proyecto y en el protocolo de ejecución.

Al realizar la perforación se comprobará que el estado y características del terreno se corresponden con las previstas en el proyecto. En caso contrario se deberán analizar las potenciales repercusiones de dichas variaciones en la propia concepción del micropilote y en su proceso de ejecución.

En caso de que fuera necesario emplear sistemas de perforación diferentes de los previstos en el proyecto, deberá tenerse en cuenta su repercusión en la determinación del valor de la resistencia estructural, a través del coeficiente de influencia del tipo de ejecución (véanse epígrafes 3.6.1 y 4.2.3).

Se comprobará el replanteo de cada uno de los micropilotes, ejecutándose posteriormente la perforación con las tolerancias geométricas establecidas en el epígrafe 4.2.1.

Respecto a la colocación de la armadura se deberá verificar el cumplimiento de lo indicado en el apartado 4.3 de esta Guía.

5.3.2. CONTROL DE LA FABRICACIÓN DE LA LECHADA O MORTERO Y DEL PROCESO DE INYECCIÓN

Se efectuarán controles para verificar la idoneidad, tanto de la fabricación de la mezcla, como del proceso de inyección.

En el proyecto o en el protocolo de ejecución, se dividirá la obra en lotes de control y se fijará el número de muestras y ensayos a llevar a cabo por cada lote, atendiendo a las características de la obra, la función de los micropilotes, el carácter temporal o permanente de los mismos, etc., incluyendo como mínimo los siguientes:

- Se llevarán cabo con frecuencia diaria, al menos los siguientes controles:
 - Tiempo de amasado.
 - Relación agua/cemento (a/c).
 - Cantidad de aditivo utilizado.
 - Viscosidad con el cono Marsh.
 - Densidad aparente de la lechada con una balanza de lodos, inmediatamente antes de la inyección.
- Al menos dos veces por semana se efectuará una toma de muestras para realizar los siguientes ensayos:
 - De resistencia a compresión de la lechada o mortero, mediante la rotura de tres (3) probetas a veintiocho días (28 d) de edad².
 - De exudación y reducción de volumen.

Se comprobará que los valores de los parámetros controlados coinciden con los establecidos en el proyecto y en el protocolo de ejecución.

5.3.3. PARTES DE TRABAJO

Una vez se haya concluido la ejecución de cada micropilote, se completará un parte de trabajo con el contenido mínimo especificado en el epígrafe 4.7.2 de esta Guía.

Se verificará la existencia de un parte de trabajo por cada micropilote, comprobando su contenido, conforme a lo indicado en el párrafo precedente. Los partes de trabajo de ejecución estarán en todo momento a disposición del Director de las Obras, recomendándose su archivo junto con el resto de documentación técnica de las mismas.

5.4. PRUEBAS DE CARGA

Los principales tipos de prueba de carga que pueden llevarse a cabo, se clasifican en función del esfuerzo aplicado (compresión, tracción, o carga lateral) y del valor del mismo alcanzado en la prueba con relación a la capacidad última del micropilote, pudiendo llegar hasta su rotura. También pueden clasificarse según se utilicen para investigación de las propiedades resistentes del conjunto micropilote-terreno, o como verificación de la idoneidad de los micropilotes ya construidos.

El número y tipo de pruebas de carga a efectuar se definirá en el proyecto, en su defecto en el protocolo de ejecución, o en cualquier caso a criterio del Director de las Obras, en función de la importancia de los micropilotos, de su número y del nivel de conocimiento, homogeneidad y naturaleza del terreno.

² Resulta recomendable fabricar al menos dos (2) probetas más de cada lote para romper a tres y siete días (3 y 7 d), según convenga, y valorar los resultados de acuerdo con las correlaciones que se hayan establecido con los ensayos de laboratorio previos.

A título meramente orientativo, se puede estimar que el número de pruebas de carga de investigación debería de situarse en torno al uno por ciento (1%) de los micropilotes proyectados, y el número de pruebas de carga de idoneidad en el entorno del dos al cuatro por ciento (2-4%) de los micropilotes realmente ejecutados en obra, dependiendo de las características de la obra, número total de micropilotes, heterogeneidad del terreno, etc.

En el apéndice 2 se resumen una serie de procedimientos de ensayo que, sin haber sido concebidos específicamente para micropilotes, presentan una metodología compatible con los mismos y se han venido utilizando en la práctica. Asimismo se recoge un ejemplo del posible desarrollo de una prueba de carga.

APÉNDICES

CLASIFICACIÓN DE LOS MICROPILOTES SEGÚN LA NORMA¹ EN 14199

TABLA A-1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MICROPILOTES PERFORADOS

MÉTODO DE PERFORACIÓN	TIPO DE ARMADURA	MÉTODO DE INYECCIÓN	MATERIAL DE INYECCIÓN O RELLENO	Opciones
Perforación por rotación	Jaula de armadura (barras corrugadas)	Inyección por gravedad u hormigonado En una fase, con entubación provisional	Lechada, mortero u hormigón Lechada o mortero	Entubación —
		Inyección por gravedad u hormigonado	Lechada, mortero u hormigón	Entubación
		En una fase, a través de: – Entubación provisional – Armadura tubular – Tubo-manguito	Lechada	—
Perforación por rotopercusión	Perfil tubular u otro perfil estructural	En varias fases, a través de: – Tubo-manguito – Válvulas especiales – Tubos de postinyección	Lechada	Punta ensanchada
		Inyección durante la perforación	Lechada	Inyección en varias fases a través de la propia armadura
	Entubación permanente (con o sin jaula de armadura)	Inyección por gravedad u hormigonado	Lechada, mortero u hormigón	Punta ensanchada
Hélice continua	– Jaula de armadura – Elemento portante	Hormigonado a través del alma hueca de la barrena	Lechada, mortero u hormigón	—

¹ Traducción a partir del original en lengua inglesa de EN 14199 Execution of Special Geotechnical Works-Micropiles. Nótese que buena parte de los micropilotes definidos en dicha norma no constituyen el objeto de esta Guía (véase apartado 1.2).

TABLA A-1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MICRÓPILOTOS NO PERFORADOS

TIPOLOGÍA	MATERIAL/ENTUBACIÓN	SECCIÓN TRANSVERSAL/ARMADURA	Opciones/INYECCIÓN
Prefabricados	Hormigón armado	Maciza	Inyección del fuste
	Acer o fundición	Tubo con extremos abiertos	Inyección del fuste
		Tubo con un extremo cerrado	Inyección por gravedad u hormigonado Con o sin inyección del fuste
		Perfiles	Inyección del fuste
Hormigonados in situ		Jaula de armadura	Inyección por gravedad u hormigonado
			Inyección en una fase a través de la entubación
			Inyección por gravedad u hormigonado
	Entubación provisional	Perfil tubular u otro perfil estructural	Inyección en una fase a través de: – Entubación – Armadura tubular – Tubo-manguito
Entubación permanente			Inyección en varias fases a través de: – Tubo-manguito – Válvulas especiales – Tubos de postinyección
		Jaula de armadura	Hormigonado, con o sin ensanchamiento de la punta

ASPECTOS RELATIVOS A LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE CARGA «IN SITU»

A-2.1. INTRODUCCIÓN

Sin perjuicio de lo establecido en el apartado 5.4, para la determinación de la resistencia característica por fuste, bien frente a esfuerzos de compresión o de tracción, se recomienda realizar al menos tres (3) pruebas de carga de investigación por tipo de terreno.

En los micropilotes en suelos, en que no deba considerarse la contribución de la resistencia por punta, se pueden utilizar las pruebas de carga de hundimiento para determinar directamente la resistencia por fuste.

El valor de la resistencia característica por fuste frente a esfuerzos de **compresión** de un micropilote $R_{fc,k}$, podrá deducirse de los valores medidos en pruebas de carga estáticas hasta provocar el hundimiento, mediante la expresión:

$$R_{fc,k} = \min \left[\frac{R_{c,med}}{F_{med}}, \frac{R_{c,min}}{F_{min}} \right]$$

donde:

$R_{fc,k}$: Resistencia característica por fuste frente a esfuerzos de compresión.

$R_{c,med}$: Resistencia media frente a esfuerzos de compresión determinada en n_c pruebas de carga.

$R_{c,min}$: Resistencia mínima frente a esfuerzos de compresión determinada en n_c pruebas de carga.

F_{med} : Coeficiente aplicable al valor medio de los resultados obtenidos en n_c ensayos, que se obtiene de la tabla A-2.1.

F_{min} : Coeficiente aplicable al valor mínimo de los resultados obtenidos en n_c ensayos, que se obtiene de la tabla A-2.1.

n_c : Número de ensayos de carga efectuados en el mismo tipo de terreno con micropilotes análogos.

TABLA A-2.1. COEFICIENTES F_{med} , F_{min}

COEFICIENTE	NÚMERO DE ENSAYOS DE CARGA, n_c				
	1	2	3	4	≥ 5
F_{med}	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
F_{min}	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

La resistencia de cálculo por fuste del micropilote frente a esfuerzos de compresión $R_{fc,d}$, se obtendrá a partir de la resistencia característica, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R_{fc,d} = \frac{R_{fc,k}}{F_{fc}}$$

donde:

F_{fc} : Coeficiente de minoración de la resistencia característica por fuste (compresión). Salvo justificación expresa en contra, deberá adoptarse un valor de uno coma tres ($F_{fc} = 1,3$).

Análogamente, el valor de la resistencia característica por fuste de un micropilote frente a esfuerzos de **tracción** $R_{ft,k}$, podrá deducirse de los valores medidos en pruebas de carga estáticas de tracción hasta provocar el arrancamiento, mediante la expresión:

$$R_{ft,k} = \min \left[\frac{R_{t,med}}{F_{med}}, \frac{R_{t,min}}{F_{min}} \right]$$

donde:

$R_{ft,k}$: Resistencia característica por fuste frente a esfuerzos de tracción.

$R_{t,med}$: Resistencia media frente a esfuerzos de tracción determinada en n_c pruebas de carga.

$R_{t,min}$: Resistencia mínima frente a esfuerzos de tracción determinada en n_c pruebas de carga.

F_{med} : Coeficiente aplicable al valor medio de los resultados obtenidos en n_c ensayos, que se obtiene de la tabla A-2.1.

F_{min} : Coeficiente aplicable al valor mínimo de los resultados obtenidos en n_c ensayos, que se obtiene de la tabla A-2.1.

La resistencia de cálculo por fuste del micropilote frente a esfuerzos de tracción $R_{ft,d}$, se obtendrá a partir de la resistencia característica, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R_{ft,d} = \frac{R_{ft,k}}{F_{ft}}$$

donde:

F_{ft} : Coeficiente de minoración de la resistencia característica por fuste (tracción). Salvo justificación expresa en contra, deberá adoptarse un valor de uno coma seis ($F_{ft} = 1,6$).

A-2.2. PROCEDIMIENTOS DE CARGA

El proyecto debe definir, en cada caso, el procedimiento de prueba de carga que considere más adecuado.

En este apéndice se incluye un resumen de la operatoria de ensayo establecida por las normas estadounidenses que se ha creído interesante incluir a título **meramente informativo**. Las normas en cuestión se refieren específicamente a pilotes, si bien, a los efectos de esta Guía, pueden servir como esquemas básicos de actuación para micropilotes.

En ninguna de estas normas se incluye la interpretación de los resultados de ensayo, ni su posible aplicación al diseño de cimentaciones.

Los tipos de prueba de carga más usuales, para pilotes, se describen en las normas¹ ASTM que se indican a continuación:

¹ En el momento de redacción de esta Guía, se encuentran en fase de elaboración los siguientes proyectos de norma europea:

- prEN ISO 22477-1 Prueba de carga de pilotes-Carga estática axial de compresión.
- prEN ISO 22477-2 Prueba de carga de pilotes-Carga estática axial de tracción.
- prEN ISO 22477-3 Prueba de carga de pilotes-Carga estática transversal.
- prEN ISO 22477-4 Prueba de carga de pilotes-Carga dinámica axial de compresión.

- D1143 *Cargas axiales de compresión.*
- D3689 *Cargas axiales de tracción.*
- D3966 *Cargas laterales.*

Las tres normas presentan un desarrollo bastante similar:

- Descripción de los **equipos e instrumentos** necesarios para aplicar las cargas al pilote de prueba, así como su disposición y montaje, dependiendo del sistema de transmisión de cargas, de reacción al terreno (anclajes, pilotes adyacentes, plataformas lastradas), etc.
- Descripción de los **aparatos de medida** para el control de movimientos. Se detallan los dispositivos más usuales y su colocación más adecuada para no interferir con el proceso de prueba.
- **Procedimientos de carga:** descripción de los métodos normalizados y sus fases de carga y descarga. También figuran algunos ensayos opcionales que proporcionan información adicional sobre el comportamiento del pilote en circunstancias especiales (velocidad constante de asiento, ciclos repetitivos de carga y descarga, etc.).
- Procedimientos de **control de movimientos:** se describe el proceso de toma de datos para cada método de carga y las precauciones a adoptar para no alterar los resultados.
- Propuesta de contenidos del **informe** del ensayo de carga.
- Apéndice acerca de algunos factores (cambios en la presión intersticial, diferencia entre condiciones de prueba y condiciones reales, etc.) que podrían influir en la **interpretación y análisis de los resultados** de las pruebas.

A continuación se describen con mayor detalle los tipos de ensayo contemplados en las normas referidas.

A-2.2.1. ENSAYO DE CARGA AXIAL DE COMPRESIÓN

Procedimiento normal de carga. Se debe fijar la carga máxima de ensayo previamente a la realización de la prueba de carga, que se puede tomar, a modo de ejemplo como el doscientos por ciento (200%) de la solicitud nominal si trabaja aisladamente, o el ciento cincuenta por ciento (150%) de la misma, si lo hace en grupo.

La carga se aplica en escalones mediante incrementos del veinticinco por ciento (25%) de la de diseño. Cada escalón de carga se mantiene hasta que se produzca alguna de las siguientes circunstancias:

- Que transcurran dos horas (2 h) desde la aplicación del escalón de carga.
- Que la velocidad de asiento sea inferior o igual a veinticinco centésimas de milímetro por hora ($v_s \leq 0,25 \text{ mm/h}$).

Si para cuando se completen los escalones de carga no se ha producido el fallo por hundimiento, se retira la carga de la siguiente forma:

- Si transcurrida una hora (1 h) el asiento no supera las veinticinco centésimas de milímetro ($s_{TOT} \leq 0,25 \text{ mm}$), se quita toda la carga en cualquier momento dentro de las doce horas (12 h) siguientes.
- En caso contrario, se dejará que el pilote permanezca cargado durante veinticuatro horas (24 h) más, para después retirar la carga en cuatro (4) escalones del veinticinco por ciento (25%) de la carga total y una hora (1 h) de duración cada uno.

En caso de que se hubiera alcanzado el fallo del micropilote por hundimiento, se mantendría la carga actuante hasta que el asiento fuese igual al quince por ciento del diámetro nominal del micropilote ($s_{TOT} = 0,15 D$).

La norma establece una serie de procedimientos opcionales de carga:

- *Carga superior a la del procedimiento normal.* Una vez que se ha procedido a la descarga según el procedimiento normal, se vuelve a cargar el pilote hasta alcanzar idénticos valores de carga. Posteriormente se va aumentando la solicitud en escalones de veinte (20) minutos de duración y diez por ciento (10%) de la carga de diseño, hasta alcanzar el fallo por hundimiento, o la carga máxima requerida.
- *Procedimiento de intervalos de tiempo constantes.* Método análogo al procedimiento normal, aunque con escalones de carga y descarga de una hora (1 h) de duración.
- *Método de velocidad de asiento constante para pilotes aislados.* Se carga el pilote de forma creciente y continua, controlando la velocidad de asiento. Se mantiene el proceso hasta que se produzca el fallo por hundimiento.
- *Método rápido de carga para pilotes aislados.* Se aplican escalones de carga sucesivos de dos minutos y medio (2,5 min) de duración y del diez al quince por ciento (10 al 15%) de la carga de diseño. Se mantiene el proceso hasta llegar al hundimiento o a la máxima carga que puede proporcionar el equipo.
- *Método de los incrementos de asiento constantes para pilotes aislados.* Se aplican los incrementos de carga necesarios para producir incrementos de asiento de aproximadamente el uno por ciento del diámetro nominal del pilote ($\Delta s \approx 0,01 D$).
- *Carga cíclica.* Método bastante similar al procedimiento normal, en el que se produce la repetición de fases de carga y descarga.

A-2.2.2. ENSAYO DE CARGA AXIAL DE TRACCIÓN

Los procedimientos de aplicación son esencialmente análogos a los de compresión, si bien habrán de entenderse referidos a cargas de tracción lo especificado para las compresiones, a levantamientos lo relativo a asientos, y a fallo por arrancamiento lo tocante al hundimiento.

Por sus especiales características, el método de los incrementos constantes de asiento para pilotes aislados no resulta de aplicación para esfuerzos de tracción.

A-2.2.3. ENSAYO DE CARGA LATERAL

Procedimiento normal de carga. Método de ensayo en el que se llega a solicitudes de hasta el doscientos por ciento (200%) de la carga lateral nominal, siguiendo un patrón de carga que dura unas cuatro horas (4 h), en el que se debe prestar especial atención a la limitación de las cargas laterales, hasta alcanzar el valor que produzca unos movimientos preestablecidos.

La norma establece una serie de procedimientos opcionales de carga:

- *Carga superior a la del procedimiento normal.* Después de cargar y descargar el pilote siguiendo el procedimiento normal se vuelve a cargar hasta alcanzar de nuevo la misma solicitud, posteriormente se aplican escalones de carga adicionales del diez por ciento (10%) de la carga de diseño y quince minutos (15 min) de duración cada uno, hasta llegar a un valor máximo de la carga especificado previamente.
- *Carga cíclica.* Se proponen patrones cílicos de carga para los dos procedimientos recién referidos.
- *Carga inversa.* Este procedimiento de carga implica la solicitud del pilote mediante cargas laterales de empuje y tiro. El pilote se ensaya según alguno de los métodos ya descritos y posteriormente se invierte el sentido de la carga.
- *Carga recíproca.* Bastante similar al método anterior, si bien se invierte el sentido en cada escalón de carga.

A-2.2.4. CARGA COMBINADA

Cuando el micropilote o grupo estén sometidos a solicitudes combinadas (axiales y laterales) se aplicará en primer lugar la carga axial y una vez estabilizada, se procederá según alguno de los métodos ya descritos para cargas laterales, manteniendo la carga axial constante.

A-2.3. MONTAJE DE LAS PRUEBAS DE CARGA

Para la realización de estas pruebas de carga (axiales y laterales) se suelen utilizar sistemas de carga con gatos hidráulicos y dispositivos de reacción.

De los dispositivos de reacción, los más frecuentes son los micropilotes adyacentes de reacción, los anclajes (en posición vertical o inclinada) y las zapatas o losas que transmitan al terreno la reacción necesaria para las pruebas. En las figuras A-2.1 a A-2.3 se muestran algunos ejemplos de preparación de los ensayos.

A-2.4. INSTRUMENTACIÓN DE LAS PRUEBAS DE CARGA

La instrumentación para la toma de datos durante las pruebas de carga puede requerir los siguientes elementos:

- **Comparadores.** Los desplazamientos verticales y laterales se suelen medir mediante comparadores o extensómetros (mecánicos o eléctricos), con precisiones de hasta veinticinco micras ($25 \mu\text{m}$). Dichos dispositivos deben instalarse en vigas de referencia independientes situadas, como mínimo, a dos metros (2 m) de distancia del micropilote de prueba. Se tomará como valor del desplazamiento, preferiblemente la media aritmética de las lecturas de tres comparadores distintos.
- **Cable y espejo con escala.** Se puede determinar el movimiento de la cabeza del micropilote utilizando un espejo con escala montado sobre el mismo y un cable de referencia delante del espejo, que va anclado a una referencia independiente. Se leerá la medida ajustando la visual hasta que el cable esté alineado con su reflejo. Este método se puede usar para contrastar los datos del comparador, si bien presenta una menor precisión.
- **Equipos topográficos.** También se puede controlar el desplazamiento del micropilote mediante equipos topográficos. Al igual que en el caso del cable con espejo, este sistema permite contrastar los datos recogidos con los comparadores si bien resulta, en general, menos preciso.
- **Células de carga.** Las células de carga se pueden utilizar como método de contraste adicional para medir la carga aplicada. Resultan una herramienta útil para mantener, de forma precisa, una carga constante. Al disponer las células en el montaje de la prueba, se debe prestar especial atención a la alineación de la célula con los ejes del micropilote y del gato hidráulico.
- **Extensómetros.** La instalación de extensómetros² a distintas alturas en la armadura tubular, permite conocer los esfuerzos que soporta la misma. Se debe cuidar especialmente el proceso de instalación para evitar que los propios equipos o los cables de conexión sufran daños. Pueden resultar especialmente adecuados para este tipo de aplicaciones los de cuerda vibrante.
- **Extensómetros de varilla.** Compuestos por varillas de metal o fibra de vidrio que van ancladas a la lechada del micropilote y que, dispuestas a distintas alturas, proporcionan datos sobre los desplazamientos longitudinales en dichos puntos. Uno de los extremos

² El extensómetro es también conocido por su nomenclatura en lengua inglesa como *strain gauge*.

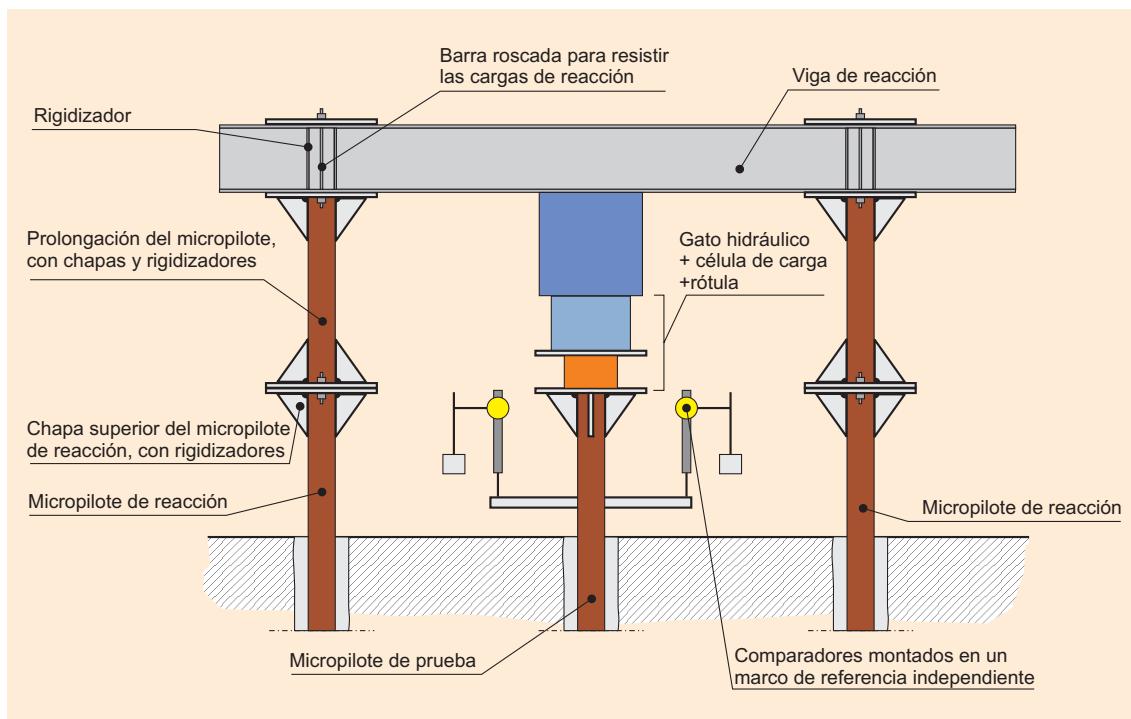


FIGURA A-2.1. POSIBLE DISPOSICIÓN PARA EL ENSAYO DE COMPRESIÓN

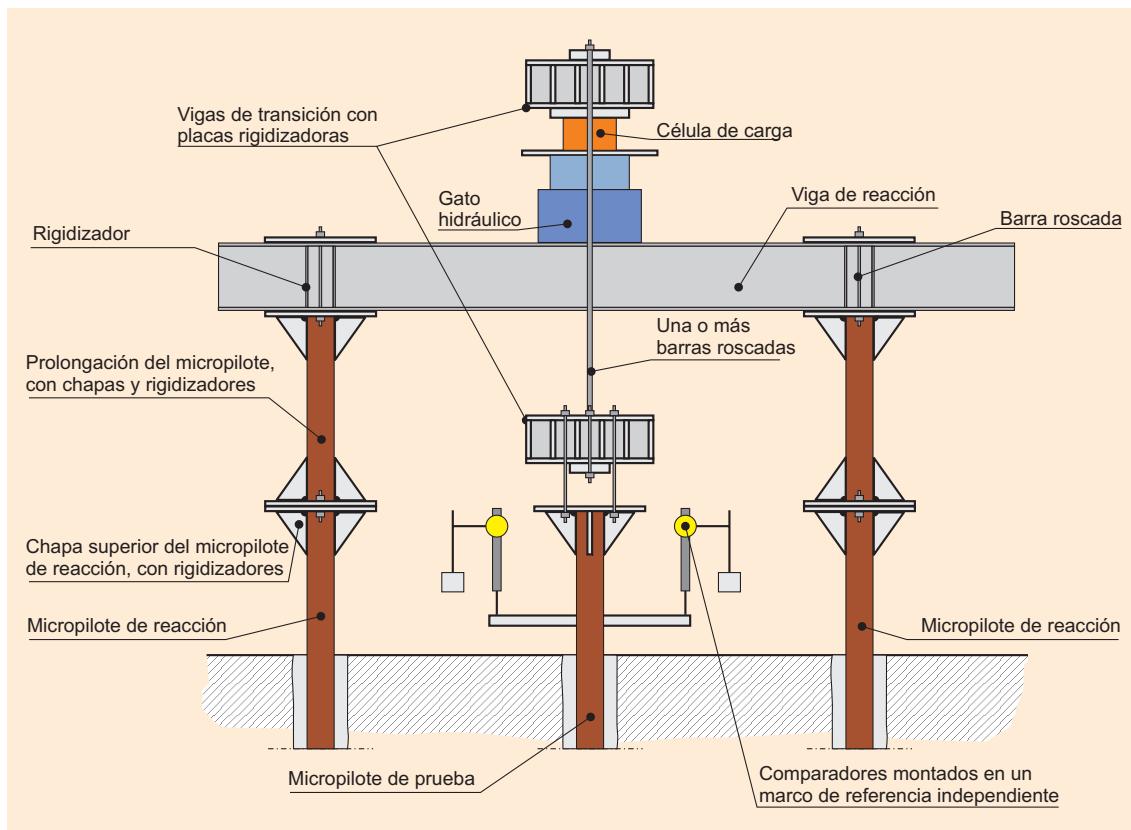


FIGURA A-2.2. POSIBLE DISPOSICIÓN PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN

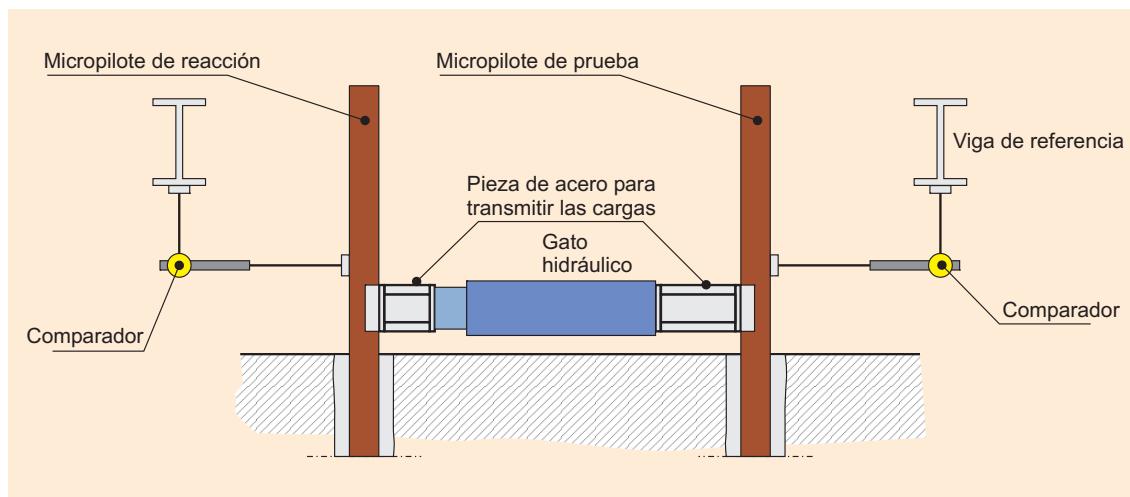


FIGURA A-2.3. POSIBLE DISPOSICIÓN PARA EL ENSAYO DE CARGA LATERAL

de la varilla queda incrustado en la lechada a la altura deseada y el resto se encuentra cubierto por una funda, para permitirle libertad de movimiento.

Se debe medir el desplazamiento del extremo superior de la varilla mediante comparadores o instrumentos electrónicos de medida. Han de adoptarse precauciones durante la instalación para no deteriorar las varillas y evitar que la funda se llene de lechada.

A-2.5. TOMA DE DATOS E INFORME DE LA PRUEBA DE CARGA

Se recomienda tomar, al menos, los siguientes datos:

- Carga de diseño del micropilote.
- Escalones de carga empleados en la prueba.
- Duración de cada escalón de carga.
- Lecturas de los elementos de instrumentación.

Normalmente se efectuará un informe que incluya las características y resultados de cada una de las pruebas de carga. Se recoge a continuación y a título meramente orientativo, una posible lista de contenidos de dicho informe:

- Breve **descripción** de los micropilotes, del emplazamiento (deberán incluirse planos o croquis y referirse a la numeración incluida en el parte de trabajo) y de las características del terreno.
- Datos más relevantes de la **ejecución** del micropilote. Podrán obtenerse de los partes de trabajo referidos en el epígrafe 4.7.2.
- **Personal** responsable de la prueba.
- **Equipos** utilizados, incluyendo documentación acerca de su calibrado.
- **Descripción de la prueba** de carga y criterios de aceptación o rechazo.
- **Resultados de la prueba**. Además de las propias lecturas, la presentación de datos puede efectuarse mediante gráficas que reflejen, al menos, la pareja de valores desplazamiento frente a carga y, siempre que sea posible, otros como: desplazamiento bajo carga mantenida frente a tiempo, duración y secuencia de los escalones de carga, etc.

- **Interpretación** de los resultados de la prueba.
- Cualquier otra circunstancia específica que se considere oportuno hacer constar.

A-2.6. EJEMPLO PRÁCTICO DE REALIZACIÓN DE UNA PRUEBA DE CARGA

Sin fijar a priori el procedimiento a adoptar en cada caso, a modo de ejemplo, se recoge el posible desarrollo de una prueba de carga axial de compresión:

1. Se somete al micropilote a una carga de prueba de valor vez y media (1,5) la carga nominal.
2. Se aplica esta carga en tres escalones, a uno y dos tercios (1/3, 2/3) y al cien por cien (100%) de la carga de prueba, equivalentes a la mitad (1/2), el cien por cien (100%) y vez y media (1,5) la nominal.
3. Despues de aplicar cada uno de estos tres escalones, se descarga completamente el micropilote.
4. Se mide, para cada una de las cargas aplicadas, el asiento del micropilote con la media de al menos dos extensómetros, hasta que se estabilice el movimiento. Se considera estabilizado el movimiento cuando en un intervalo de quince minutos (15 min) el asiento que se produce no alcanza el cinco por ciento (5%) del medido en la fase inmediatamente anterior.
5. Se considera satisfactorio el resultado de la prueba cuando se cumplen, simultáneamente, las dos condiciones siguientes:
 - Desplazamiento remanente: $S_{\text{rem}} < 0,30 S_{\text{nom}}$
 - Desplazamiento nominal: $0,55 S_{\text{máx}} < S_{\text{nom}} < 0,70 S_{\text{máx}}$

Siendo dichos valores los indicados en la figura A-2.4, que esquematiza la realización de la prueba:

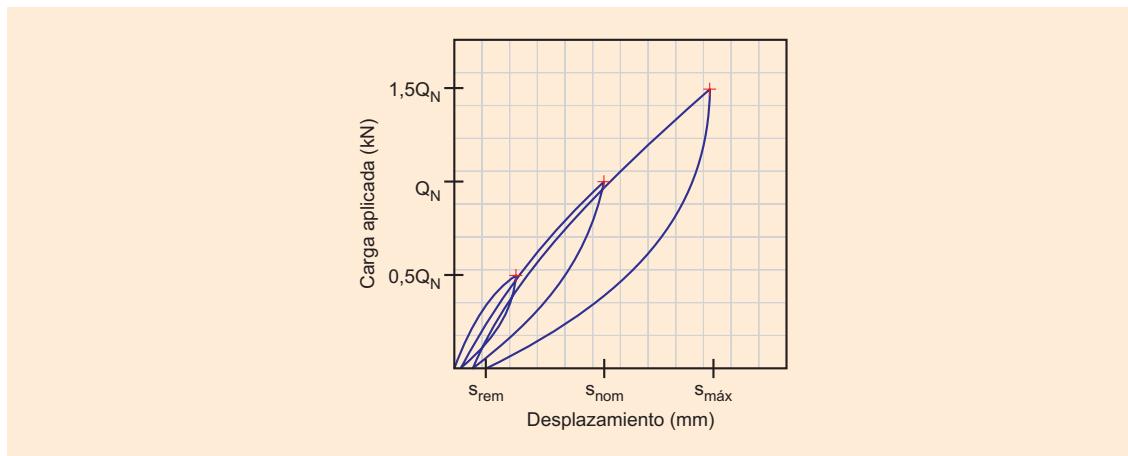


FIGURA A-2.4. EJEMPLO DE PRUEBA DE CARGA

DESARROLLOS TEÓRICOS COMPLEMENTARIOS

A-3.1. RESISTENCIA FREnte A SOLICITACIONES TRANSVERSALES

En este apartado se efectúa un análisis teórico de un micropilote sometido en cabeza a los esfuerzos transversales: momento M_o y cortante V_o , según se representan en la figura A-3.1.

El micropilote se deformará bajo estos esfuerzos hasta movilizar en el suelo la reacción $P(z, y)$ que equilibre, a una profundidad z , con un desplazamiento transversal de valor y , el momento flector $M(z)$ y el esfuerzo cortante $V(z)$.

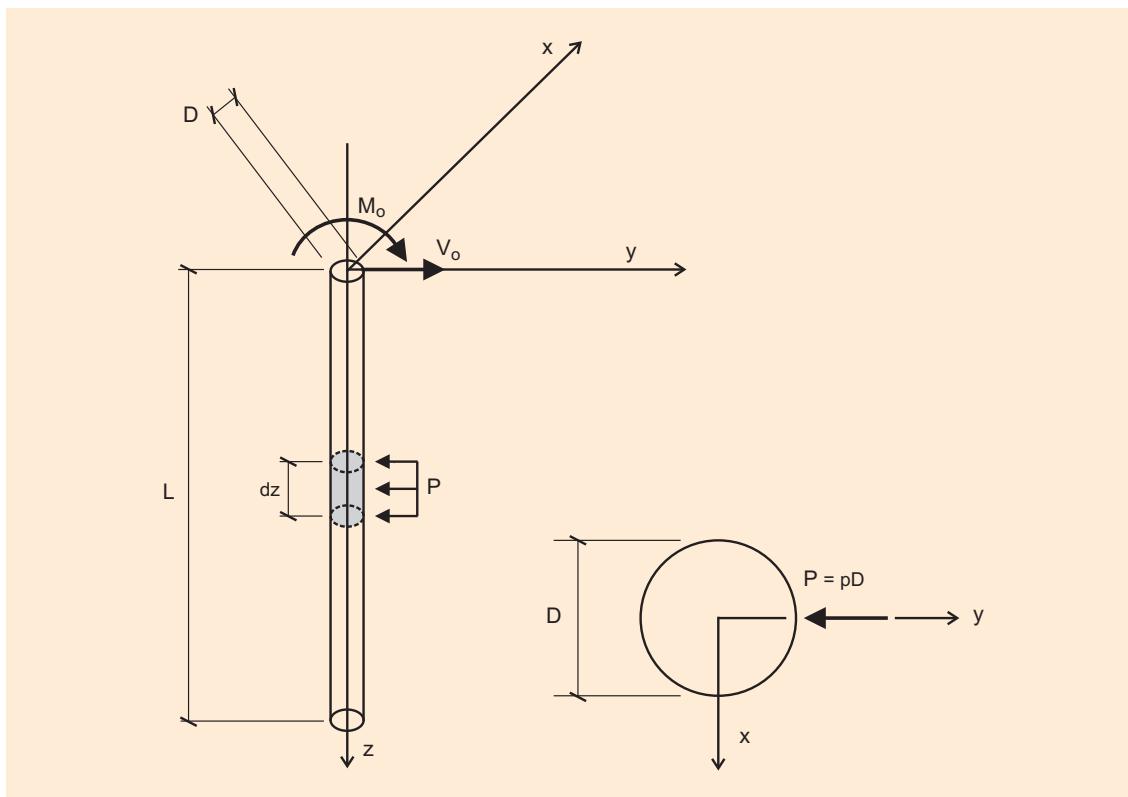


FIGURA A-3.1. ESFUERZOS EN CABEZA Y REACCIONES DEL TERRENO SOBRE EL MICROPILOTE

Para una profundidad z dada, la reacción horizontal del terreno sobre el micropilote por unidad de longitud P , es función del desplazamiento perpendicular a su eje. La curva de reacción del suelo $P(y)$ generalmente presenta una forma hiperbólica, tal y como se muestra en la figura A-3.2.

En principio, la curva de reacción del suelo puede simplificarse a dos tramos lineales, mediante una recta secante a la misma y una horizontal a partir de cierto valor del desplazamiento.

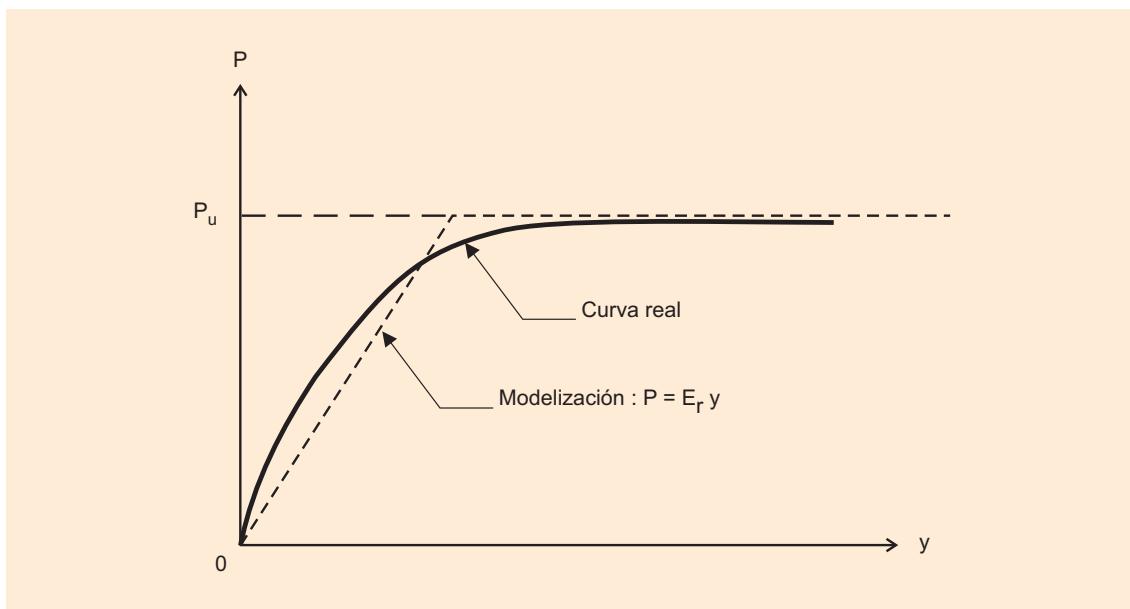


FIGURA A-3.2. CURVA DE REACCIÓN MICROPILOTE-SUELO

De este modo, la reacción del terreno sobre el micropilote se puede expresar como:

$$P = E_r \cdot y \quad \text{para} \quad y \leq \frac{P_u}{E_r}$$

$$P = P_u \quad \text{para} \quad y > \frac{P_u}{E_r}$$

donde:

P : Reacción horizontal del terreno sobre el micropilote por unidad de longitud.

y : Desplazamiento del micropilote medido perpendicularmente a su eje.

E_r : Módulo de reacción del terreno.

P_u : Presión de fluencia del terreno.

En el apéndice A-6.5 se incluyen datos y correlaciones orientativas relativas al módulo de reacción E_r y a la presión de fluencia del terreno P_u .

A-3.1.1. SUELO HOMOGÉNEO ELÁSTICO LINEAL

El comportamiento del micropilote depende de la rigidez relativa del conjunto micropilote-terreno. El planteamiento, a partir de ecuaciones de resistencia de materiales, es el siguiente:

$$E_{PlP} \cdot \frac{d^4y}{dz^4} = -P(z)$$

$$E_{PlP} \cdot \frac{d^3y}{dz^3} = V(z)$$

$$E_{PlP} \cdot \frac{d^2y}{dz^2} = M(z)$$

$$\frac{dy}{dz} = \theta(z)$$

donde:

$E_p I_p$: Rígidez a flexión del micropilote.

$P(z)$: Reacción del terreno sobre el micropilote por unidad de longitud, en función de la profundidad z .

$V(z)$: Esfuerzo cortante, en función de la profundidad z .

$M(z)$: Momento flector, en función de la profundidad z .

$\theta(z)$: Giro, en función de la profundidad z .

Si se considera el suelo homogéneo elástico lineal, entrando en la primera ecuación con la expresión de P como función lineal de y , se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d^4y}{dz^4} + \frac{E_r}{E_p I_p} y(z) = 0$$

Cuya solución general es:

$$y(z) = \left(A \cos \frac{z}{\ell_0} + B \operatorname{sen} \frac{z}{\ell_0} \right) e^{-(z/\ell_0)} + \left(C \cos \frac{z}{\ell_0} + D \operatorname{sen} \frac{z}{\ell_0} \right) e^{(z/\ell_0)}$$

donde:

$\ell_0 = (4 E_p I_p / E_r)^{1/4}$ Es la longitud de transferencia.

A, B, C, D Son constantes que se determinan en función de las condiciones de contorno en cabeza y punta.

Puesto que los micropilotes se caracterizan por su gran esbeltez, su comportamiento se puede asimilar al de una barra de longitud infinita, en la que las condiciones en punta no influyen en el comportamiento frente a esfuerzos laterales en cabeza.

Aplicando dichas condiciones en la punta [$y(z = \infty) = 0$] resulta $C = D = 0$, reduciéndose la expresión general a:

$$y(z) = \left(A \cos \frac{z}{\ell_0} + B \operatorname{sen} \frac{z}{\ell_0} \right) e^{-(z/\ell_0)}$$

A efectos prácticos, se puede considerar que el comportamiento del micropilote es equivalente al de una barra de longitud infinita si la longitud del micropilote es superior a tres veces la longitud de transferencia. Es decir, si:

$$L > 3\ell_0$$

Ello es así, ya que para $z = 3\ell_0$, el factor $e^{-(z/\ell_0)}$ vale $e^{-3} = 0,0498$; lo que implica que a dicha profundidad los desplazamientos y esfuerzos se reducen aproximadamente al cinco por ciento (5%) de los valores en cabeza, obteniéndose que la práctica totalidad de los esfuerzos se transfieren al suelo en una profundidad $z = 3\ell_0$.

Imponiendo las condiciones de momento M_o y cortante V_o en cabeza, se obtiene:

$$y(z) = \left[\frac{2 M_o}{E_r \ell_0^2} \left(\cos \frac{z}{\ell_0} - \sin \frac{z}{\ell_0} \right) + \frac{2 V_o}{E_r \ell_0} \left(\cos \frac{z}{\ell_0} \right) \right] e^{-(z/\ell_0)}$$

$$\theta(z) = \left[-\frac{4 M_o}{E_r \ell_0^3} \left(\cos \frac{z}{\ell_0} \right) - \frac{2 V_o}{E_r \ell_0^2} \left(\cos \frac{z}{\ell_0} + \sin \frac{z}{\ell_0} \right) \right] e^{-(z/\ell_0)}$$

$$M(z) = \left[M_o \left(\sin \frac{z}{\ell_0} + \cos \frac{z}{\ell_0} \right) + V_o \ell_0 \left(\sin \frac{z}{\ell_0} \right) \right] e^{-(z/\ell_0)}$$

$$V(z) = \left[-\frac{2 M_o}{\ell_0} \left(\sin \frac{z}{\ell_0} \right) + V_o \left(\cos \frac{z}{\ell_0} - \sin \frac{z}{\ell_0} \right) \right] e^{-(z/\ell_0)}$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene que el desplazamiento máximo resulta:

$$y_{\max} = y(z=0) = \frac{2}{E_r \ell_0} \left(\frac{M_o}{\ell_0} + V_o \right)$$

y el momento máximo se obtiene particularizando $M(z)$ para el valor:

$$z = \ell_0 \operatorname{arctg} \left(\frac{\ell_0 V_o}{2 M_o + \ell_0 V_o} \right)$$

El desarrollo expuesto supone un comportamiento elástico del terreno. Como regla general se procurará que las presiones en el mismo no superen el valor de cálculo de la presión de fluencia P_u , que es el límite elástico del suelo en el modelo de reacción lineal adoptado. Por tanto, debe comprobarse:

$$y_{\max} \leq \frac{P_u}{E_r}$$

No obstante, se puede aceptar que una parte del suelo estuviese plastificado, a condición de verificar que los desplazamientos y giros fueran admisibles.

También es necesario comprobar el comportamiento a flexión y cortante según se especifica en el epígrafe 3.6.3 y en el apéndice 4.

Caso particular de flexión nula en cabeza

A continuación se resuelve el caso particular en que el momento flector en cabeza sea nulo y solamente exista carga transversal ($M_o = 0$, $V_o = H_o$). En ese caso el desplazamiento máximo sería:

$$y_{\max} = \frac{2 H_o}{E_r \ell_0} \leq \frac{P_u}{E_r}$$

Con lo que la carga horizontal máxima, limitada por la presión de fluencia del suelo, resulta ser:

$$H_{máx,P} = \frac{P_u \ell_0}{2}$$

y la resistencia de cálculo frente a una carga horizontal en cabeza, limitada por la presión de fluencia del suelo:

$$R_{h,d} = \frac{H_{máx,P}}{F_p}$$

donde:

F_p : Coeficiente de minoración. Salvo justificación expresa en contra, deberá adoptarse un valor de uno coma veinticinco ($F_p = 1,25$).

En cuanto a la verificación de la resistencia estructural del micropilote, para el caso de que no haya flexión en cabeza, el máximo valor del momento flector $M_{máx}$, se obtiene para $z = (\pi\ell_0/4)$ y vale:

$$M_{máx} = H_o \ell_0 e^{-(\pi/4)} \operatorname{sen} \frac{\pi}{4} = 0,322 H_o \ell_0$$

donde:

$M_{máx}$: Momento flector máximo.

H_o : Carga horizontal en cabeza.

ℓ_0 : Longitud de transferencia.

Si se toma $M_{máx} = M_{c,Rd}$ = resistencia de cálculo a flexión de la sección del micropilote, determinada conforme a lo especificado en A-4.1, se tiene que la carga horizontal máxima aplicable en cabeza, limitada por la flexión en el micropilote, resulta:

$$H_{máx,M} = \frac{M_{c,Rd}}{0,322\ell_0}$$

Con lo que la comprobación a efectuar es:

$$\text{Si } M_o = 0, \quad H_{Ed} \leq R_{h,d} = \min \left\{ \frac{H_{máx,P}}{F_p}, H_{máx,M} \right\} = \min \left\{ \frac{P_u \ell_0}{2,5}, \frac{M_{c,Rd}}{0,322\ell_0} \right\}$$

donde:

M_o : Momento flector en cabeza.

H_{Ed} : Carga horizontal de cálculo.

$R_{h,d}$: Resistencia de cálculo frente a carga horizontal.

P_u : Presión de fluencia del terreno.

ℓ_0 : Longitud de transferencia.

$M_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo a flexión de la sección del micropilote. Se determinará conforme a lo especificado en A-4.1

A-3.1.2. TERRENO HETEROGÉNEO ELÁSTICO LINEAL

Para el análisis de micropilotes sometidos a solicitudes transversales en suelo heterogéneo elástico lineal, se podrán utilizar métodos de cálculo específicos en los que la reacción del terreno sobre el micropilote se represente mediante un sistema de muelles equivalentes, asignando a cada muelle una rigidez de valor:

$$K_i = E_{ri} \cdot \Delta\ell_i$$

donde:

K_i : Constante del muelle equivalente al terreno en el tramo i-ésimo.

$\Delta\ell_i$: Longitud tramo i-ésimo.

E_{ri} : Módulo de reacción del terreno¹ en el tramo i-ésimo.

A-3.1.3. EFECTO DE LA PROXIMIDAD DE UN TALUD

El efecto de la proximidad de un talud² en el comportamiento de un micropilote sometido a cargas laterales, depende fundamentalmente de dos parámetros:

- La distancia relativa a la arista del talud, d_t/D .
- El ángulo del talud con respecto a la horizontal, β .

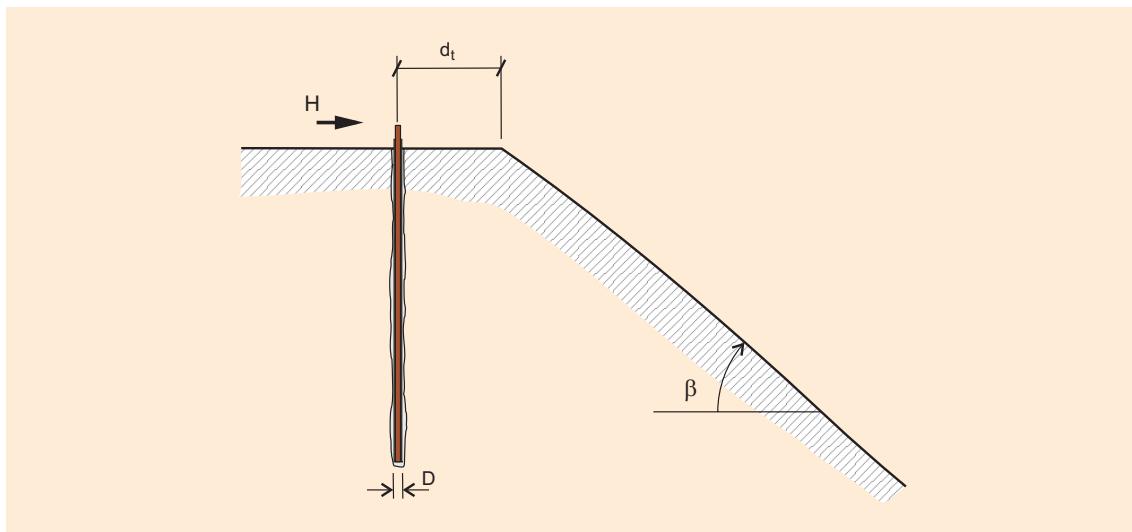


FIGURA A-3.3. EFECTO DE LA PROXIMIDAD DE UN TALUD: PARÁMETROS BÁSICOS

El efecto de la proximidad del talud sobre la reacción horizontal del suelo P , se puede considerar aplicando un coeficiente reductor ρ_t , a la reacción obtenida considerando un terreno horizontal semiindefinido, P_{ref} :

$$P\left(\frac{d_t}{D}\right) = \rho_t \left(\frac{d_t}{D}\right) \cdot P_{ref}$$

¹ Véase apéndice A-6.5.

² Véase S. Mezagh et al.: «Experimental Study of the Slope Effect on the P-y Reaction Curves of Laterally Loaded Piles», *Revue Française de Géotechnique*, n.º 82, primer trimestre de 1998.

donde:

$P(d_t/D)$: Reacción horizontal del terreno sobre el micropilote, teniendo en cuenta el efecto de la proximidad de un talud.

P_{ref} : Reacción horizontal del terreno sobre el micropilote considerando un terreno horizontal semiindefinido.

d_t : Distancia del eje del micropilote a la cabeza del talud.

D : Diámetro nominal del micropilote.

$\rho_t(d_t/D)$: Factor de reducción que tiene en cuenta la proximidad de un talud.

$$\text{para } d_t < d_{t,\lim}; \quad \rho_t\left(\frac{d_t}{D}\right) = \frac{17 - 15 \tan \beta}{100} \cdot \frac{d_t}{D} + \frac{1 - \tan \beta}{2}$$

$$\text{para } d_t \geq d_{t,\lim}; \quad \rho_t\left(\frac{d_t}{D}\right) = 1$$

Siendo $d_{t,\lim}$ la distancia límite a la cabeza del talud, a partir de la cual su efecto puede considerarse despreciable. Esta distancia se puede estimar con la expresión:

$$d_{t,\lim} = 4D (6 \tan \beta - 1)$$

Siendo β el ángulo que forma el talud con la horizontal.

A-3.2. COMPROBACIÓN DE LA INESTABILIDAD ESTRUCTURAL

En el apartado 3.6.1 el cálculo de la resistencia frente a esfuerzos de compresión en el micropilote incluye el efecto del pandeo a través de un factor empírico. Cuando se disponga de datos sobre las propiedades elásticas del terreno, el análisis de la estabilidad estructural del micropilote puede efectuarse mediante el siguiente método, tomado de la literatura técnica³.

Se debe tener en cuenta el efecto del pandeo si se verifica la expresión:

$$\frac{I_a}{A_{Pr}^2} \leq \frac{f_y^2}{4KDE_a}$$

donde:

I_a : Momento de inercia de la sección de acero.

A_{Pr} : Sección reducida de la armadura tubular de acero, calculada teniendo en cuenta la reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión:

$$A_{Pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2]$$

³ Véase, Jiménez Salas, J. A. y otros: *Geotecnia y Cimientos III*, capítulo 3.

siendo:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión. Deberá tomarse de la tabla 2.4.

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

f_yd : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular.

E_a : Módulo de elasticidad del acero.

KD: Su valor depende de la resistencia unitaria del terreno a la penetración estática q_c , y puede obtenerse de la tabla A-3.1.

TABLA A-3.1. FACTOR KD (MPa)

TIPO DE TERRENO	KD (MPa)
Suelos coherentes	0,29 q_c
Suelos arenosos secos o húmedos	0,40 q_c^2
Suelos arenosos sumergidos	0,28 q_c^2

q_c : Resistencia unitaria a la penetración estática en la parte superior del micropilote, hasta alcanzar una profundidad de unos quince diámetros (15 D), expresada en megapascales (MPa).

En los casos en que se concluya que es conveniente analizar el efecto del pandeo en los micropilotes, se podrá determinar la carga crítica de pandeo mediante la siguiente expresión:

$$N_c = \pi^2 \cdot \frac{E_a \cdot I_a}{(L_\ell + L_{ef})^2} \cdot A$$

donde:

N_c : Carga crítica de pandeo.

E_a : Módulo de elasticidad del acero.

I_a : Momento de inercia de la sección de acero.

A: Constante que depende del tipo de coacción en cabeza y que puede obtenerse de la tabla A-3.2.

TABLA A-3.2. CONSTANTE A

TIPO DE COACCIÓN EN CABEZA	A
Articulada	2,045
Libre	0,25
Empotrada	4,0
Sin giro y con desplazamiento	1,0

L_t : Longitud libre del micropilote que sobresale de la superficie del terreno, en su caso.

L_{ef} : Profundidad de empotramiento ficticio.

$$L_{ef} = 1,2 \cdot f \cdot L_e$$

siendo:

f: Coeficiente que depende de la relación entre el valor del módulo de elasticidad del terreno en superficie y a la profundidad L. Su valor puede tomarse de la tabla 3.8.

L_e : Longitud elástica del micropilote:

$$L_e = \left(\frac{3 \cdot E_a \cdot I_a}{E_L} \right)^{1/4}$$

E_a : Módulo de elasticidad del acero.

I_a : Momento de inercia de la sección de acero.

E_L : Módulo de elasticidad del terreno a la profundidad L, siendo L la longitud del micropilote.

A-3.3. MÉTODO DE LA IMPERFECCIÓN GEOMÉTRICA

En este apartado se incluye un análisis teórico del efecto del pandeo en un micropilote sometido a esfuerzos de compresión, utilizando un método de cálculo basado en la existencia de imperfecciones geométricas, propuesto en la literatura técnica⁴.

Para ello, se efectúan una serie de hipótesis y se lleva a cabo el desarrollo teórico que se expone a continuación:

- El micropilote se encuentra en el dominio de la elasticidad lineal, tanto por el comportamiento del suelo, como por el de los materiales que lo constituyen.
- La rigidez del apoyo lateral del micropilote en el terreno se representa por una curva de reacción del suelo (P, y) asimilada a dos tramos rectos, con $P = E_r \cdot y$ (véanse figura A-3.2 y apéndice A-6.5). Se debe tomar el valor del módulo de reacción E_r , correspondiente al suelo más desfavorable (menos rígido) atravesado por el micropilote. Sobre éste se aplicará un coeficiente de minoración de valor uno coma veinticinco ($F_w = 1,25$), que da lugar al valor de cálculo $E_{r,d}$, a utilizar en este procedimiento:

$$E_{r,d} = \frac{E_r}{F_w}$$

- La amplitud de la imperfección geométrica inicial se puede definir como:

$$\delta_d = \beta_d \ell_d$$

δ_d : Amplitud de la imperfección geométrica o defecto de forma inicial.

β_d : Amplitud relativa máxima de la imperfección geométrica. En ausencia de datos más específicos y a los efectos de esta Guía, se adopta un valor⁵ de un doscientos cincuenta y uno (1/250).

⁴ Institut pour la Recherche et l'Experimentation en Genie Civil, IREX (2004): *Synthèse des résultats et recommandations du Projet national sur les micropieux*, FOREVER.

⁵ Si se dispusiera de mayor información sobre el particular, deberá sustituirse dicho valor en la expresión [1] y proceder en consecuencia.

ℓ_d : Longitud de análisis de la imperfección geométrica.

Para simplificar el cálculo se supone que la imperfección de forma es de tipo sinusoidal. Así, la expresión de la forma inicial del eje del micropilote con imperfección geométrica sinusoidal, resulta:

$$y_0 = \delta_0 \operatorname{sen} \left(\frac{\pi x}{\ell} \right)$$

donde:

y_0 : Desplazamiento del eje del micropilote respecto a un eje ideal x , debido a una imperfección geométrica inicial.

$\delta_0 = \beta_d \cdot \ell$: Amplitud máxima de la imperfección geométrica.

ℓ : Semilongitud de onda de la imperfección geométrica, supuesta de forma sinusoidal.

x : Coordenada en la dirección del eje del micropilote.

- Se determinan los esfuerzos y tensiones máximas en el equilibrio, para ello, debe tenerse en cuenta que al aplicar la compresión se produce una deformada de valor y_1 , que se corresponde con una flexión del micropilote, en equilibrio con los esfuerzos exteriores, que incluyen la reacción del terreno:

$$y_1 = \delta_1 \operatorname{sen} \left(\frac{\pi x}{\ell} \right)$$

siendo:

δ_1 : Amplitud máxima de la deformada debida a la flexión.

La deformada del eje del micropilote es la suma de la deformada inicial debida a la imperfección geométrica y la debida a la flexión, es decir:

$$y = y_0 + y_1 = (\delta_0 + \delta_1) \operatorname{sen} \left(\frac{\pi x}{\ell} \right) = (\beta_d \ell + \delta_1) \operatorname{sen} \left(\frac{\pi x}{\ell} \right)$$

El momento exterior M_e sobre una rebanada del micropilote es la suma del debido al esfuerzo de compresión N , cuyo brazo es $y = y_0 + y_1$, más el debido a la reacción del terreno, que se supone proporcional a la deformada y_1 , con módulo de reacción $E_{r,d}$:

$$M_e(x) = N \cdot (\beta_d \ell + \delta_1) \operatorname{sen} \left(\frac{\pi x}{\ell} \right) - \frac{E_{r,d} \delta_1 \ell^2}{\pi^2} \operatorname{sen} \left(\frac{\pi x}{\ell} \right)$$

Mientras que el momento interior M_i debido a la flexión de la rebanada del micropilote es:

$$M_i(x) = \delta_1 \frac{\pi^2 E_a I_a}{\ell^2} \operatorname{sen} \left(\frac{\pi x}{\ell} \right)$$

La rigidez de la sección transversal $E_a I_a$ se evalúa con la armadura tubular de acero (sin considerar el mortero o lechada) teniendo en cuenta los efectos de la corrosión (sección reducida).

Planteando el equilibrio, $M_e = M_i$, se obtiene:

$$\delta_1 = \frac{N \beta_d \ell}{\frac{\pi^2 E_a I_a}{\ell^2} + \frac{E_{r,d} \ell^2}{\pi^2} - N}$$

El momento es máximo en la mitad de la semilongitud de onda y vale:

$$M_i \left(x = \frac{\ell}{2} \right) = \delta_1 \frac{\pi^2 E_a I_a}{\ell^2} = \frac{N \beta_d \ell \pi^4 E_a I_a}{\pi^4 E_a I_a + E_{r,d} \ell^4 - N \pi^2 \ell^2} \quad [1]$$

Se puede calcular el valor de la semilongitud de onda que, para un valor de N dado, hace máximo el valor del momento M_i , planteando para ello:

$$\frac{\partial M_i \left(x = \frac{\ell}{2} \right)}{\partial \ell} = 0$$

Se obtiene:

$$\ell_d^2 = \pi^2 \left(\frac{N + \sqrt{N^2 + 12 E_{r,d} E_a I_a}}{6 E_{r,d}} \right) \quad [2]$$

- Debe comprobarse que la tensión máxima en el acero es inferior a su resistencia de cálculo:

$$\sigma_{s,máx} \leq f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a} \quad [3]$$

donde:

$\sigma_{s,máx}$: Tensión máxima en el acero.

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular.

f_y : Límite elástico del acero de la armadura tubular.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular⁶. Se tomará un valor de uno coma diez ($\gamma_a = 1,10$).

- Debe comprobarse que el apoyo lateral del micropilote no supere la presión de fluencia del suelo P_u con un coeficiente de seguridad parcial de valor uno coma veinticinco (1,25). Es decir:

$$\gamma_1 \cdot E_{r,d} \leq \frac{P_u}{1,25} \quad [4]$$

Como síntesis del método expuesto, la carga crítica de pandeo N_c , considerando para el análisis una imperfección geométrica en la armadura tubular, será el máximo valor del esfuerzo axial para el que las tensiones máximas en el acero son admisibles y la reacción lateral del terreno sobre el

⁶ Véase, *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras RPX-95*, capítulo 6.

micropilote no supera la presión de fluencia del mismo. Para su determinación se aplicará el siguiente método iterativo:

- Son datos D , $E_{r,d}$, d_e , d_i , f_y , β_d , W (módulo resistente de la sección de la armadura tubular).
- Se parte de un valor inicial estimado de la carga axil N_i .
- Se calcula ℓ_d con la expresión [2].
- Se calcula el momento máximo $M_i(x = \ell_d/2)$ con la expresión [1].
- Se calcula la tensión máxima en el acero $\sigma_{s,\max}$:

$$\sigma_{s,\max} = \frac{N_i}{A_p} + \frac{M_i \left(x = \frac{\ell_d}{2} \right)}{W}$$

- Se compara con la resistencia de cálculo del acero, mediante la expresión [3]:
 - Si $\sigma_{s,\max} < f_{yd}$ se toma un nuevo valor de $N_{i+1} > N_i$ y se repite el cálculo hasta que la diferencia sea despreciable.
 - Si $\sigma_{s,\max} > f_{yd}$ se toma un nuevo valor de $N_{i+1} < N_i$ y se repite el cálculo.
- Por último se comprueba que la presión en el terreno es inferior a la de fluencia, mediante la expresión [4].

A-3.4. ÁBACOS DE SOUCHE

Los ábacos publicados por Souche⁷ permiten obtener la carga crítica de pandeo N_c , para micropilotes supuestos en un medio homogéneo, con reacción elástica lineal frente a los desplazamientos transversales, con una longitud libre en la parte superior y sin rozamiento lateral.

Se han publicado un total de ocho ábacos, para dos condiciones en punta (empotrado o articulado) y cuatro condiciones en cabeza (libre, desplazamiento lateral sin rotación, articulado y empotrado).

Para el empleo de los ábacos se precisan los parámetros adimensionales:

$$\frac{N_c L^2}{\pi^2 E_a I_a}, \quad \omega, \quad m = \frac{L}{\pi} \sqrt[4]{\frac{E_{r,d}}{E_a I_a}}$$

donde:

L : Longitud del micropilote.

$E_a I_a$: Rígidez de la sección transversal. Únicamente se considera la contribución de la armadura tubular de acero.

ω : Cociente entre la longitud libre en la parte superior del micropilote y su longitud.

$E_{r,d}$: Valor de cálculo del módulo de reacción del terreno. Debe determinarse conforme a lo especificado en A-3.3.

N_c : Carga crítica de pandeo.

⁷ Véase, Souche, P.: «Étude du flambement de pieux partiellement immergés dans un milieu offrant latéralement une réaction élastique pure», *Annales de l'ITBTP*, n.º 423, Serie «Soils et Foundations», 187, mars-avril 1984, pp. 38-60. Estos ábacos se encuentran recogidos asimismo en: Ministère de l'Urbanisme du Logement et des Transports. Direction des Routes (Francia) (1986), *Les micropieux*.

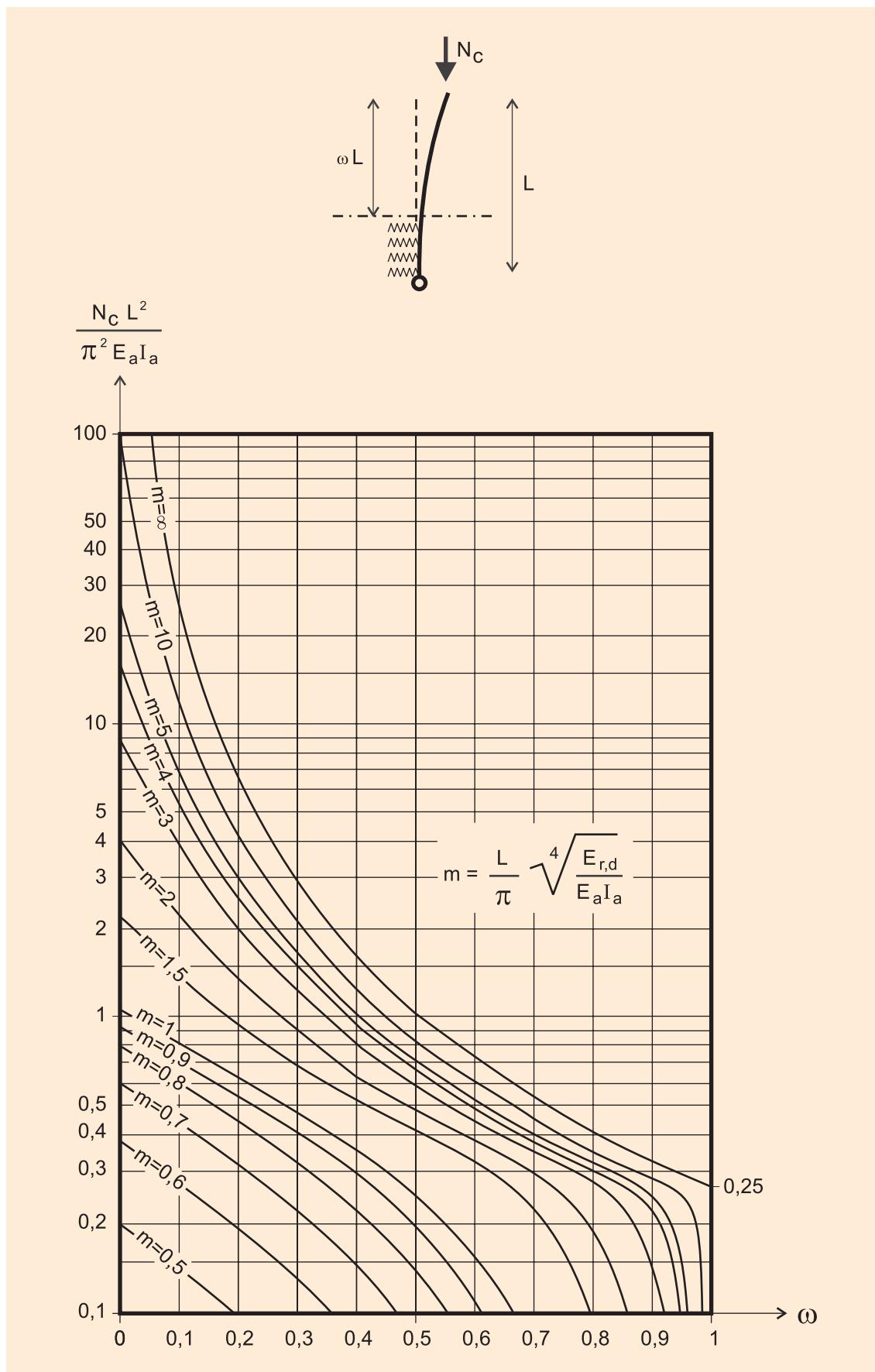


FIGURA A-3.4. ÁBACO PARA CABEZA LIBRE Y PUNTA ARTICULADA

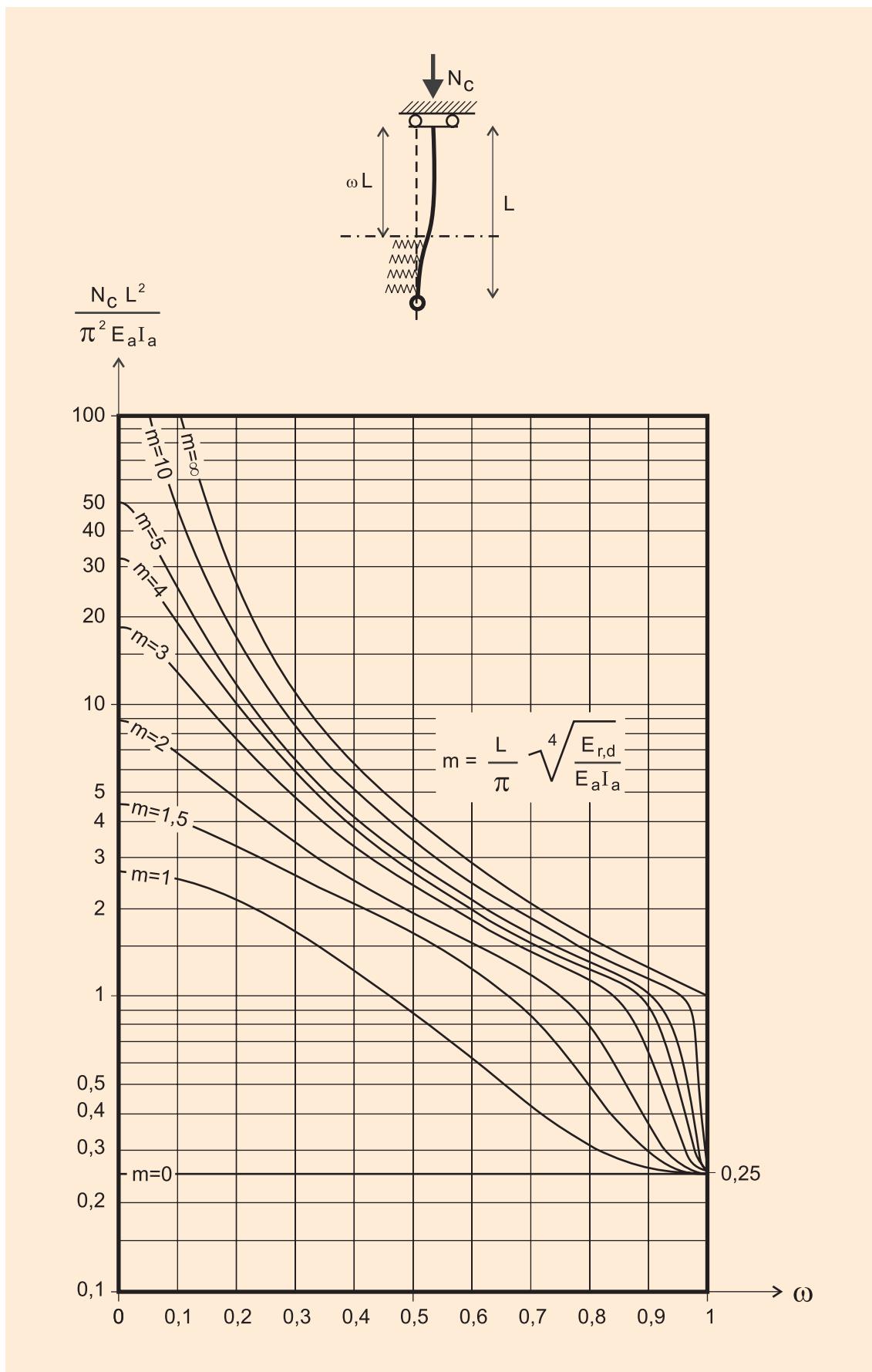


FIGURA A-3.5. ÁBAKO PARA CABEZA CON DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL SIN GIRO Y PUNTA ARTICULADA

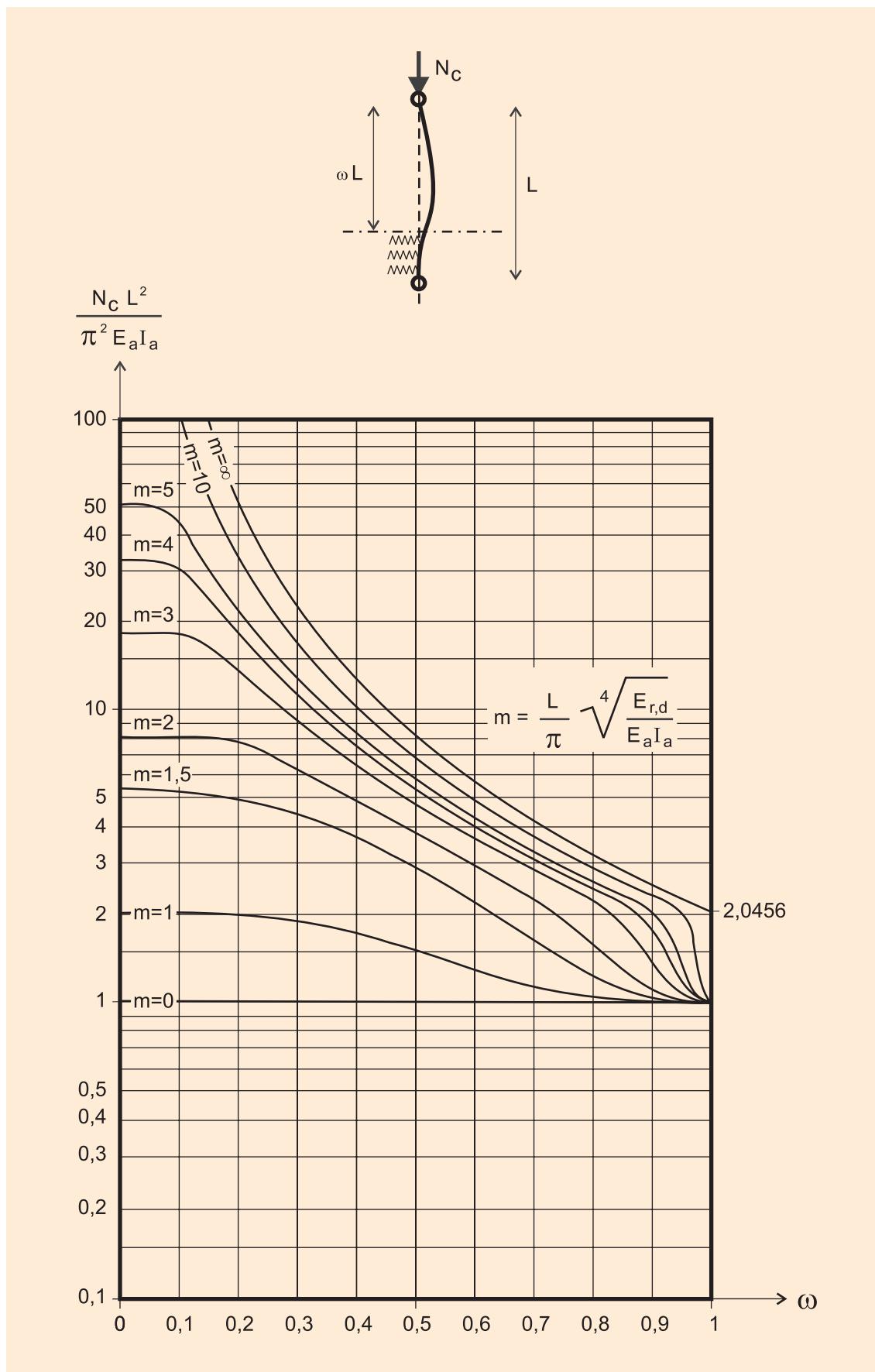


FIGURA A-3.6. ÁBACO PARA CABEZA Y PUNTA ARTICULADAS

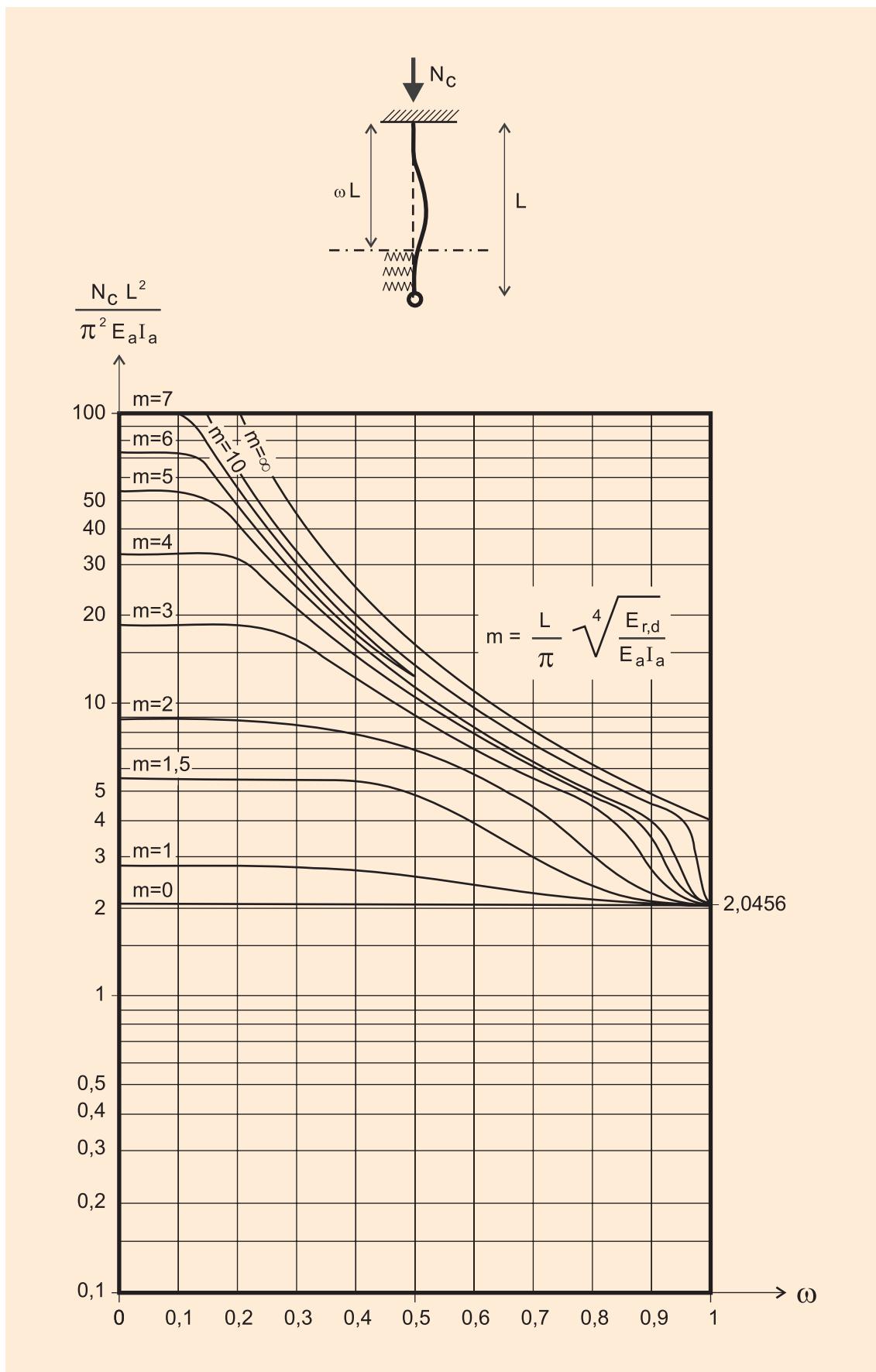


FIGURA A-3.7. ÁBACO PARA CABEZA EMPOTRADA Y PUNTA ARTICULADA

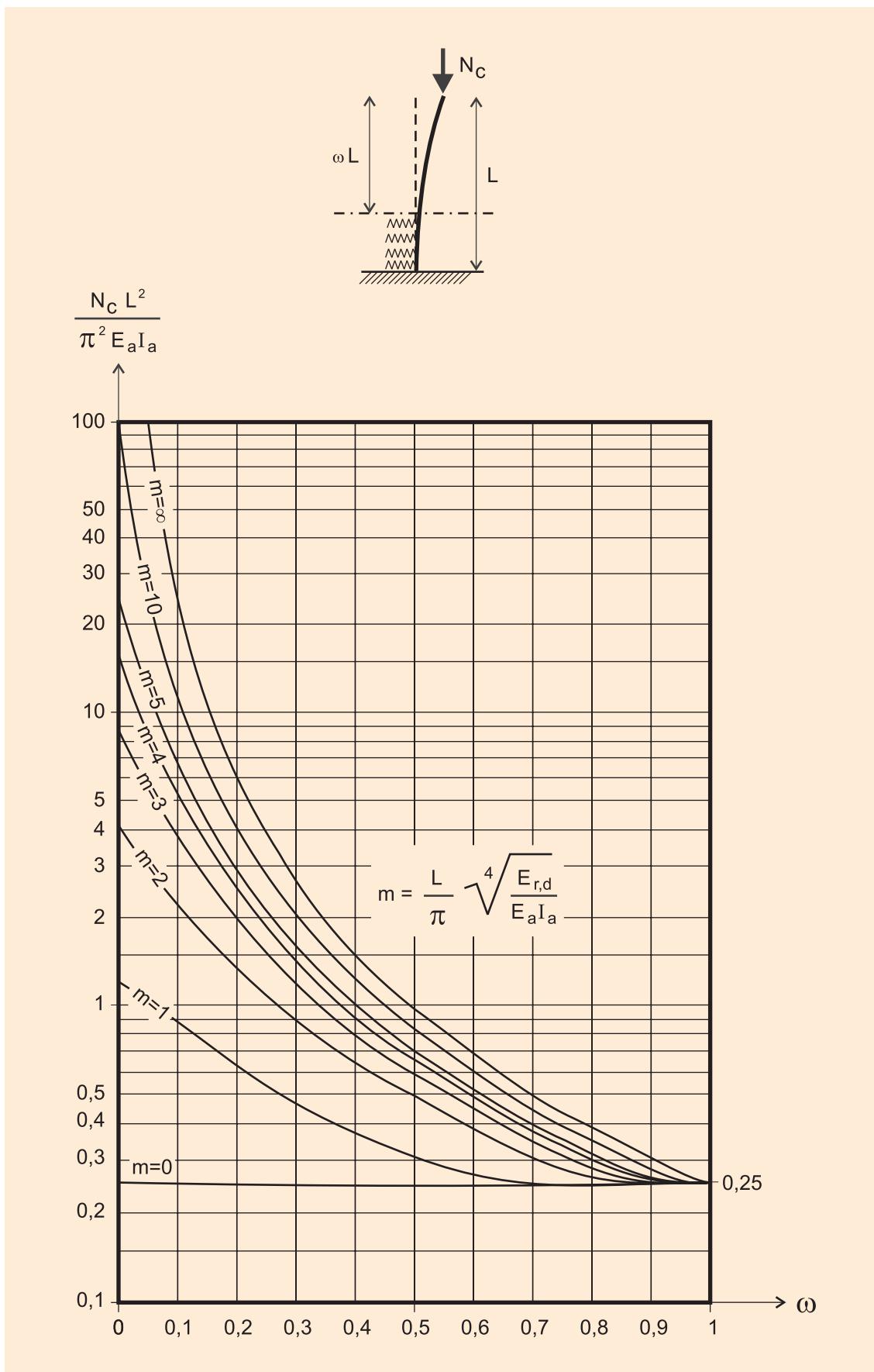


FIGURA A-3.8. ÁBACO PARA CABEZA LIBRE Y PUNTA EMPOTRADA

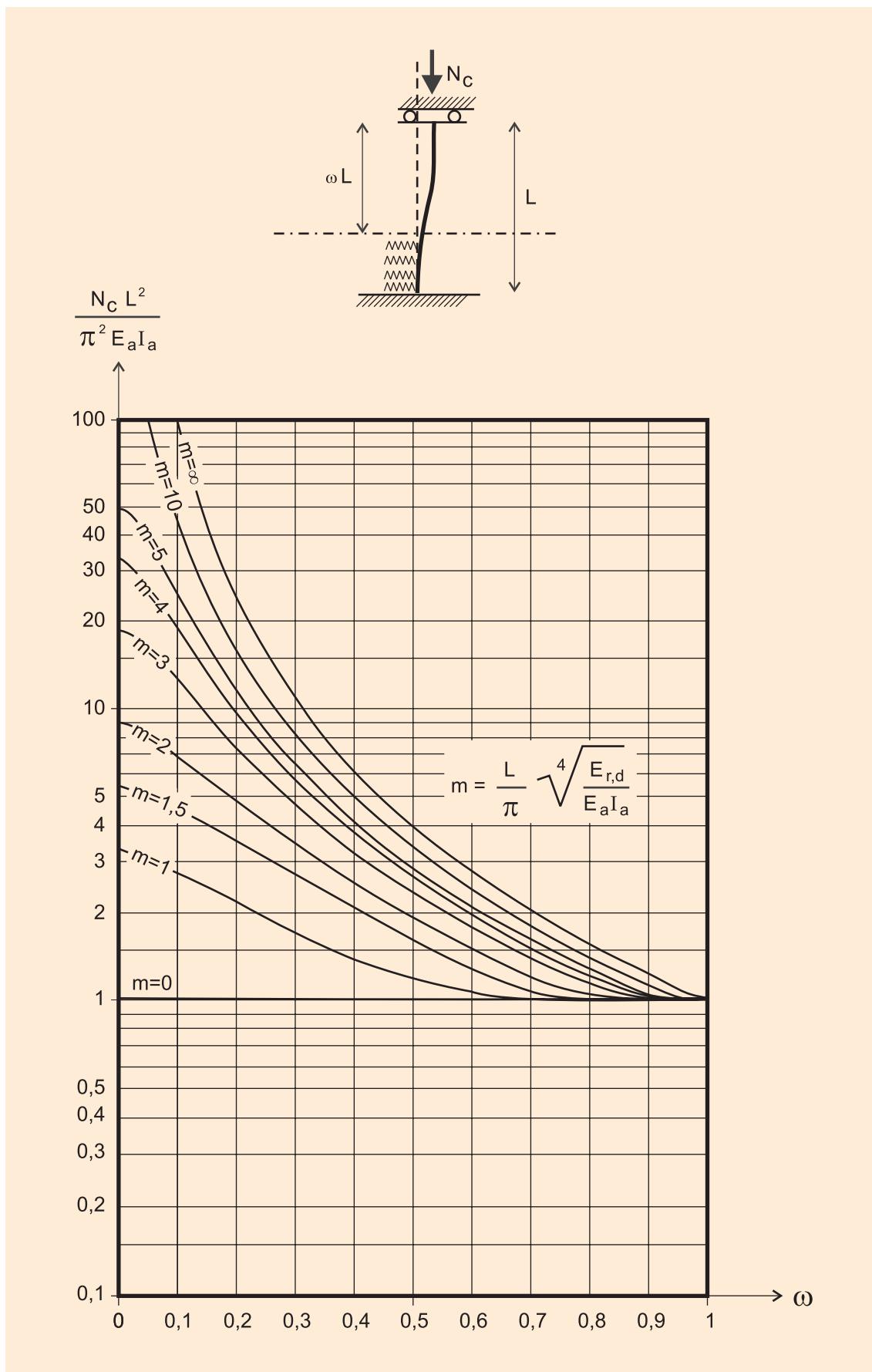


FIGURA A-3.9. ÁBACO PARA CABEZA CON DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL SIN GIRO Y PUNTA EMPOTRADA

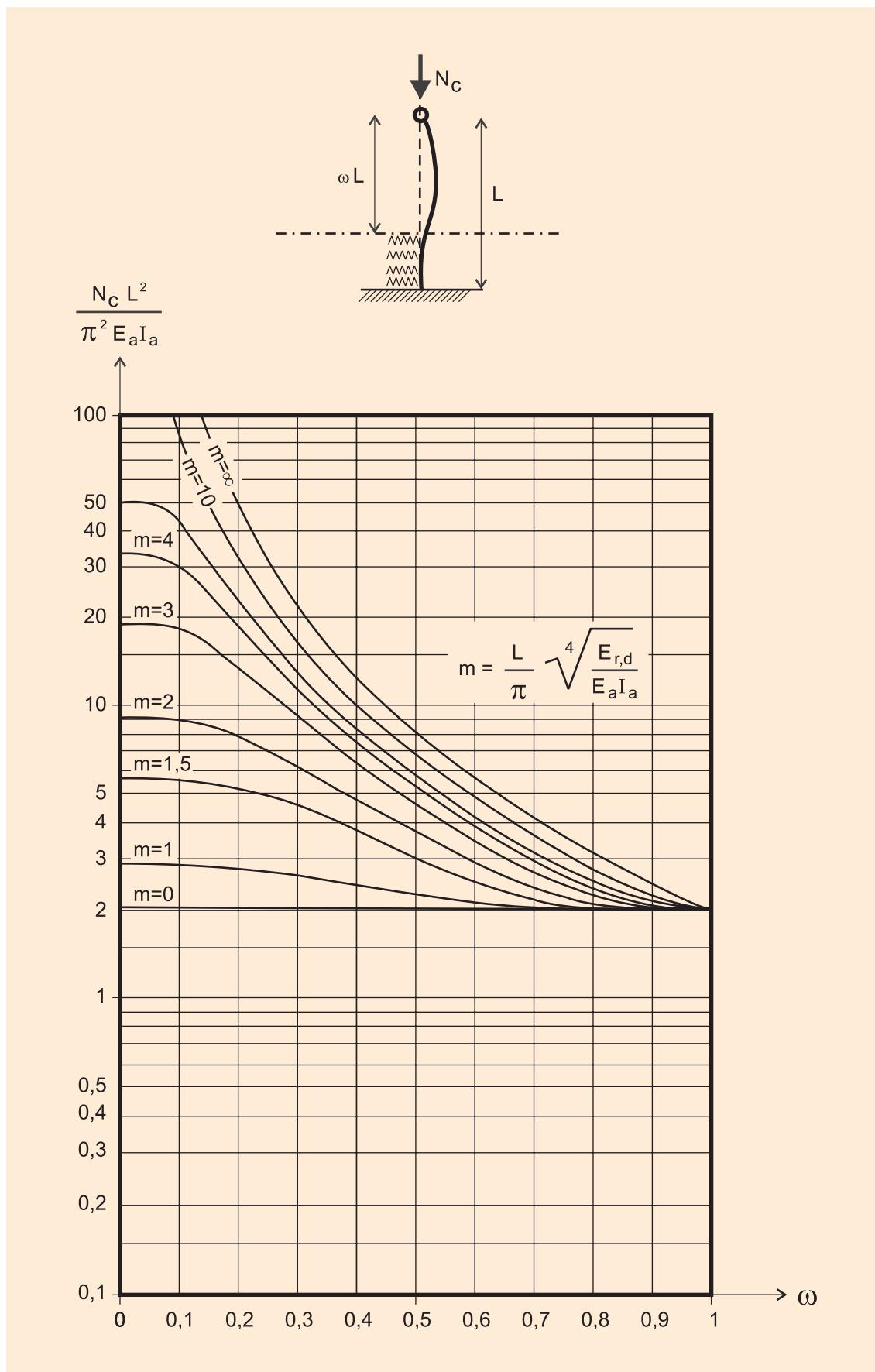


FIGURA A-3.10. ÁBACO PARA CABEZA ARTICULADA Y PUNTA EMPOTRADA

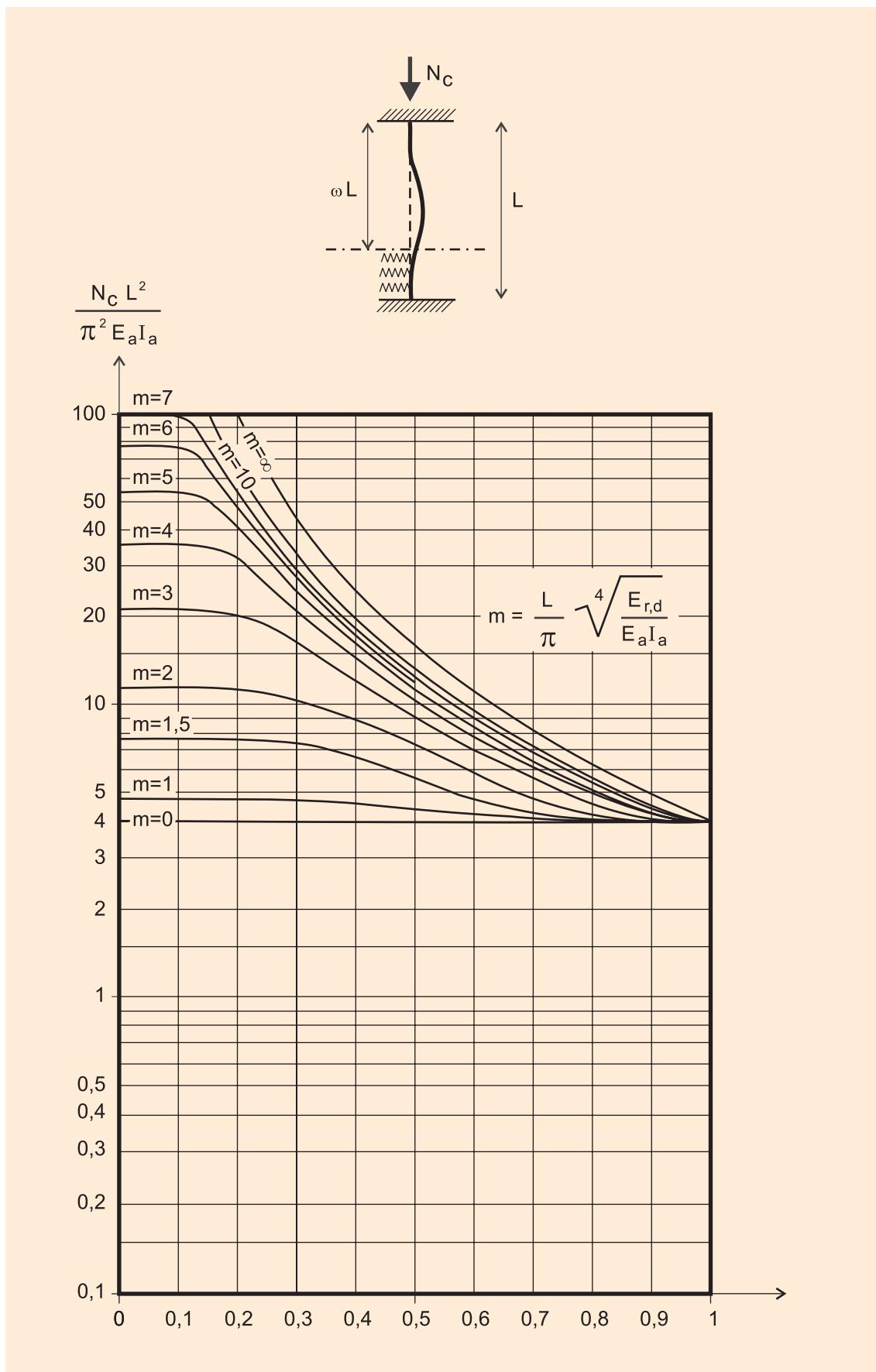


FIGURA A-3.11. ÁBACO PARA CABEZA Y PUNTA EMPOTRADAS

RESISTENCIA ESTRUCTURAL A FLEXIÓN, CORTANTE Y ESFUERZOS COMBINADOS

A-4.1. RESISTENCIA ESTRUCTURAL A FLEXIÓN

Para calcular la resistencia estructural del micropilote a flexión, se supondrá que únicamente colabora la armadura tubular del micropilote. En la unión de armaduras se considerará además la capacidad a flexión de dicha unión, si fuera menor que la de la armadura.

El valor de cálculo del momento flector M_{Ed} , en cada sección, deberá cumplir la condición:

$$M_{c,Rd} \geq M_{Ed}$$

donde:

M_{Ed} : Momento flector de cálculo, obtenido a partir de acciones mayoradas.

$M_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a flexión. Se determinará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Si } \frac{d_e - 2r_e}{t - r_e} \leq \frac{16450}{f_y} , \quad M_{c,Rd} = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_a} \cdot F_{u,f}$$

$$\text{Si } \frac{16450}{f_y} < \frac{d_e - 2r_e}{t - r_e} \leq \frac{21150}{f_y} , \quad M_{c,Rd} = W_{el} \frac{f_y}{\gamma_a} \cdot F_{u,f}$$

siendo:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión. Deberá tomarse de la tabla 2.4.

t : Espesor de la armadura tubular.

f_y : Límite elástico del acero de la armadura tubular, expresado en megapascales (MPa), que puede obtenerse de la tabla 2.1.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular¹. Se tomará un valor de uno coma diez ($\gamma_a = 1,10$).

W_{pl} : Módulo plástico de la sección:

$$W_{pl} = \frac{(d_e - 2r_e)^3 - d_i^3}{6}$$

¹ Véase: *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras RPX-95*, capítulo 6.

W_{el} : Módulo elástico de la sección:

$$W_{el} = \frac{\pi[(d_e - 2r_e)^4 - d_i^4]}{32(d_e - 2r_e)}$$

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

$F_{u,f}$: Coeficiente de minoración del módulo resistente de la armadura tubular en función del tipo de unión. Si no se dispusiera de ensayos específicos² sobre las propias uniones a utilizar, se adoptará un valor de cero coma cinco ($F_{u,f} = 0,5$).

A-4.2. RESISTENCIA ESTRUCTURAL A CORTANTE

Para calcular la resistencia estructural del micropilote a cortante, se supondrá que únicamente colabora la armadura tubular del micropilote.

El valor de cálculo del esfuerzo cortante V_{Ed} , en cada sección deberá cumplir la condición:

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd}$$

donde:

V_{Ed} : Esfuerzo cortante de cálculo, obtenido a partir de acciones mayoradas.

$V_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a esfuerzo cortante. Se adoptará $V_{c,Rd} = V_{pl,Rd}$

$V_{pl,Rd}$: Valor de cálculo de la resistencia plástica de la sección a esfuerzo cortante. Se determinará de acuerdo con la expresión³:

$$V_{pl,Rd} = \frac{2 A_{Pr}}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y}{\gamma_a}$$

donde:

f_y : Límite elástico del acero de la armadura tubular, que puede obtenerse de la tabla 2.1.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular⁴. Se tomará un valor de uno coma diez ($\gamma_a = 1,10$).

A_{Pr} : Sección reducida de la armadura tubular de acero, calculada teniendo en cuenta la reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión:

$$A_{Pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2]$$

siendo:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

² Para mayor información sobre los resultados obtenidos en este tipo de ensayos, véase: Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica (SEMSIG) y Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y del Subsuelo (AETESS) (2003): *Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS. 3.ª sesión: Micropilotes*, artículo: «Ensayos sobre sistemas de unión de armaduras tubulares en los micropilotes».

³ Véase: UNE EN 1993. *Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero*.

⁴ Véase: *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras RPX-95*, capítulo 6.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión. Deberá tomarse de la tabla 2.4.

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

A-4.3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL FRENTE A ESFUERZOS COMBINADOS

En el caso de que el micropilote esté sometido simultáneamente a esfuerzos axiles, flectores y cortantes, es necesario tener en cuenta la interacción entre esfuerzos para determinar la resistencia estructural de la sección⁵. Se incluye a continuación el caso particular de interacción de esfuerzos de flexión y cortante.

En secciones sometidas simultáneamente a esfuerzos de flexión y cortante, la resistencia estructural se reduce. Para valores pequeños del esfuerzo cortante esta reducción se compensa por el endurecimiento del material por deformación y se puede despreciar. Sin embargo, cuando el esfuerzo cortante sea mayor que la mitad de la resistencia plástica a esfuerzo cortante, se deberá considerar su efecto en el valor de la resistencia de cálculo a flexión.

En tales circunstancias, el valor de cálculo de la resistencia a flexión de la sección, teniendo en cuenta el esfuerzo cortante $M_{v,Rd}$, se determinará aplicando un factor de reducción, ρ . Es decir:

$$\text{Si } V_{Ed} \leq 0,5 V_{p\ell,Rd} \quad , \quad M_{v,Rd} = M_{c,Rd}$$

$$\text{Si } V_{Ed} > 0,5 V_{p\ell,Rd} \quad , \quad M_{v,Rd} = (1 - \rho) M_{c,Rd}$$

donde:

$M_{v,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a flexión, teniendo en cuenta la interacción del esfuerzo cortante.

$M_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a flexión (flexión pura). Se determina conforme a lo especificado en A-4.1.

ρ : Factor de reducción, que se obtiene de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{p\ell,Rd}} - 1 \right)^2$$

donde:

V_{Ed} : Esfuerzo cortante de cálculo, obtenido a partir de acciones mayoradas.

$V_{p\ell,Rd}$: Valor de cálculo de la resistencia plástica de la sección a esfuerzo cortante, que se determinará conforme a lo especificado en A-4.2.

⁵ Véase: *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras RPX-95*, capítulo 6.

EJEMPLOS DE CONEXIÓN ENTRE MICROPILOTES Y ESTRUCTURA

A continuación se incluyen algunos ejemplos de conexión de los micropilotes a las cimentaciones, atendiendo a la siguiente clasificación:

- Conexión entre micropilote y estructura de nueva construcción.
- Conexión entre micropilote y cimentación preexistente, de forma directa.
- Conexión entre micropilote y nuevo encepado, que se conecta a su vez a una cimentación preexistente.

Se deberá tener en cuenta en todo caso, lo indicado en el apartado 3.9 para estos tipos de conexiones.

Este apéndice tiene un carácter meramente orientativo y pretende mostrar, a título de ejemplo, una serie de casos prácticos, sin constituir los mismos una relación cerrada o limitativa. Estos casos se refieren a micropilotes que trabajen sólo a compresión.

En la aplicación de micropilotes en estructuras de cimentación, éstos estarán generalmente sometidos a esfuerzos de compresión y, en lo tocante a este apéndice, se entiende que éste será el único tipo de esfuerzo a transmitir.

En el caso de que los micropilotes estén sometidos a esfuerzos laterales o momentos flectores se dispondrán las medidas necesarias para transmitir dichos esfuerzos.

A-5.1. EJEMPLOS DE CONEXIÓN A UNA CIMENTACIÓN DE NUEVA CONSTRUCCIÓN

En las conexiones en las que el micropilote termina en la parte inferior del encepado, hay que estudiar el mecanismo de transmisión de esfuerzos mediante bielas de compresión que se produce en el encepado y armar el mismo en consecuencia.

Puede ser necesario disponer placas de reparto en la cabeza del micropilote. Las placas se han de proyectar de forma que la tensión de compresión transmitida al hormigón del encepado sea admisible.

En algunos casos se pueden disponer rigidizadores para que las placas de reparto trabajen adecuadamente.

En las figuras A-5.1 y A-5.2 se representan ejemplos distintos con placas de reparto, con y sin rigidizadores.

En las conexiones en que la armadura tubular del micropilote se prolonga por el canto del encepado, y dentro del mecanismo de transmisión de esfuerzos elegido, se cuenta con la transmisión en la interfaz acero-hormigón. En general se han de disponer conectadores para aumentar la capacidad resistente.

En la figura A-5.3 se muestra un ejemplo de conexión con barras corrugadas soldadas.

El espesor de garganta de las soldaduras de unión entre la armadura tubular y las barras corrugadas se determinará a partir de soldaduras de prueba ejecutadas sobre probetas de la misma sección que vaya a ser usada en producción. Las probetas se deberán seccionar para medir sobre ellas el espesor de garganta. Este proceso se repetirá hasta obtener una técnica de soldeo que garantice conseguir, en producción, el espesor de garganta deseado.

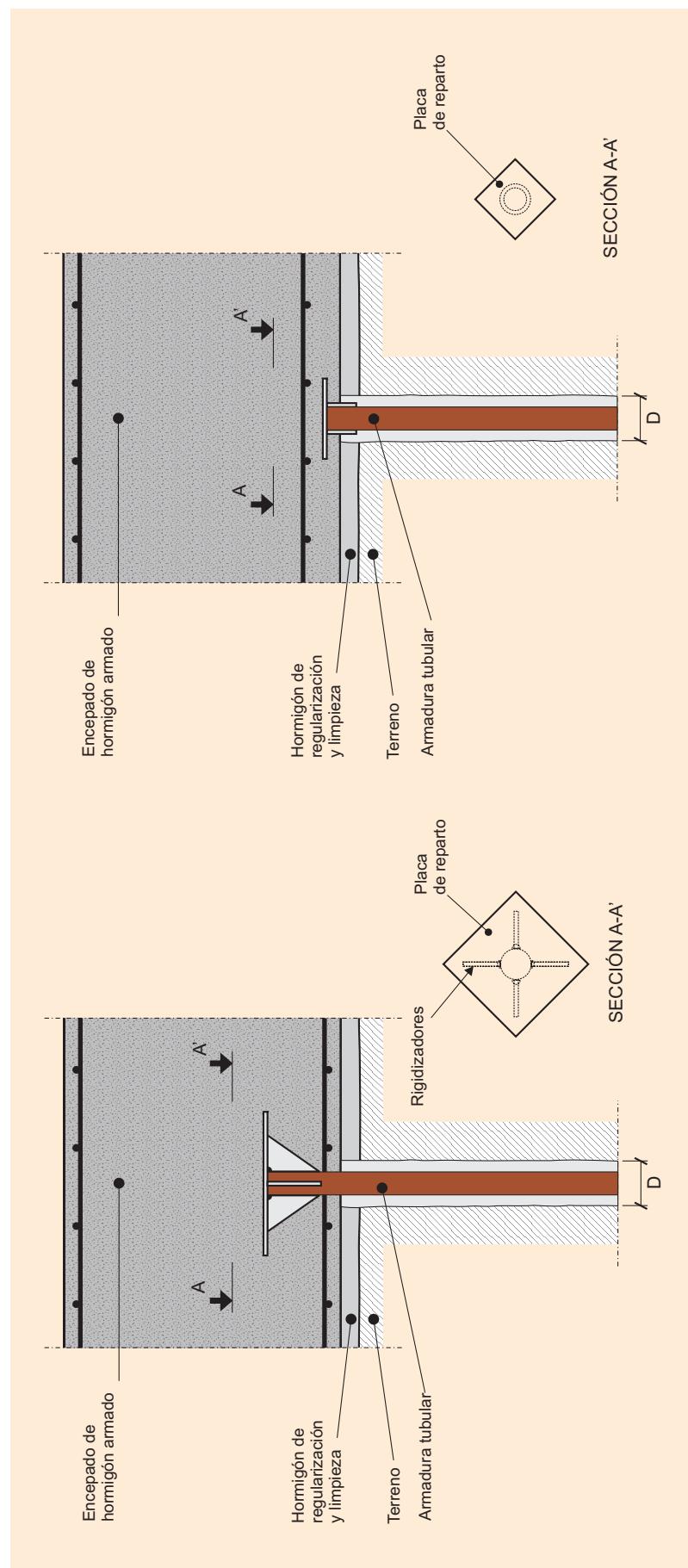


FIGURA A-5.1. EJEMPLOS DE CONEXIÓN CON PLACA DE REPARTO

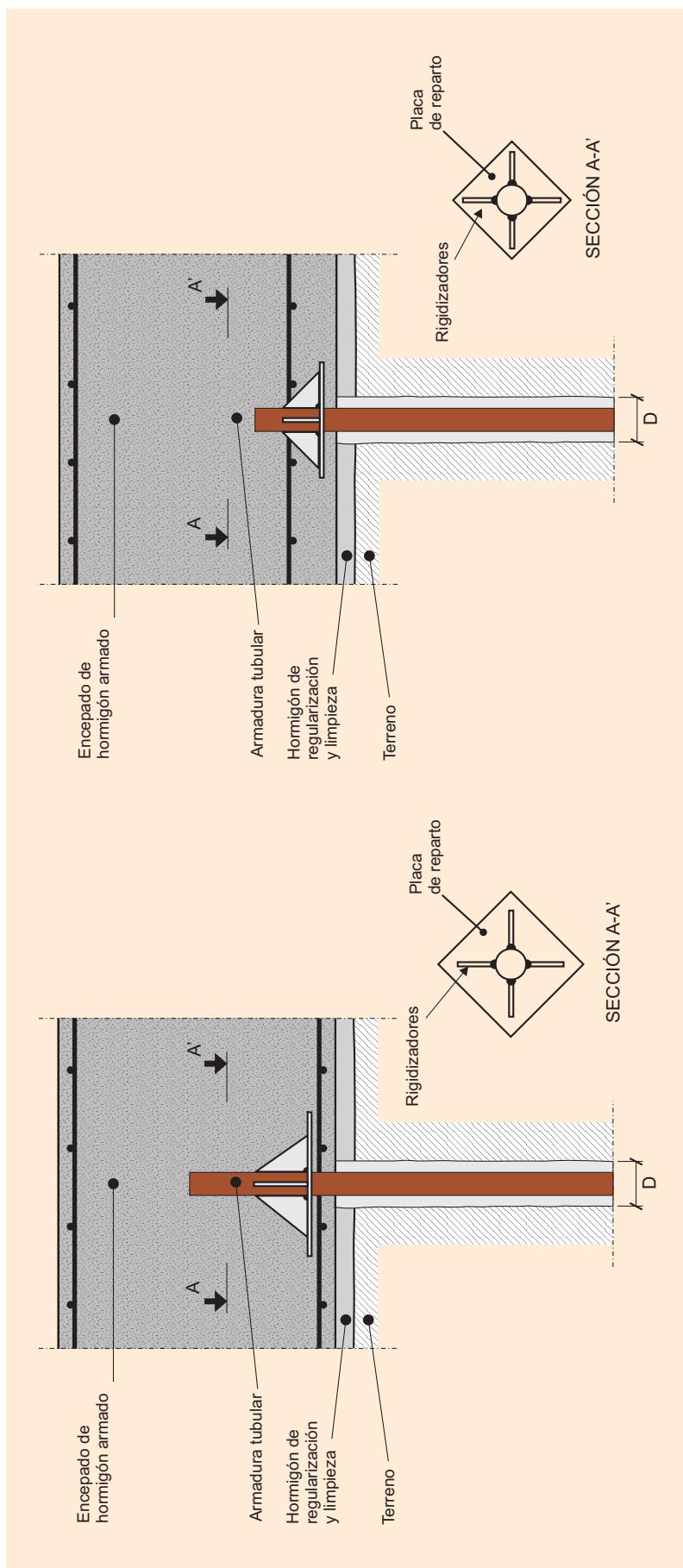


FIGURA A-5.2. EJEMPLOS DE CONEXIÓN CON PLACA DE REPARTO Y RIGIDIZADORES SOBRE LA MISMA

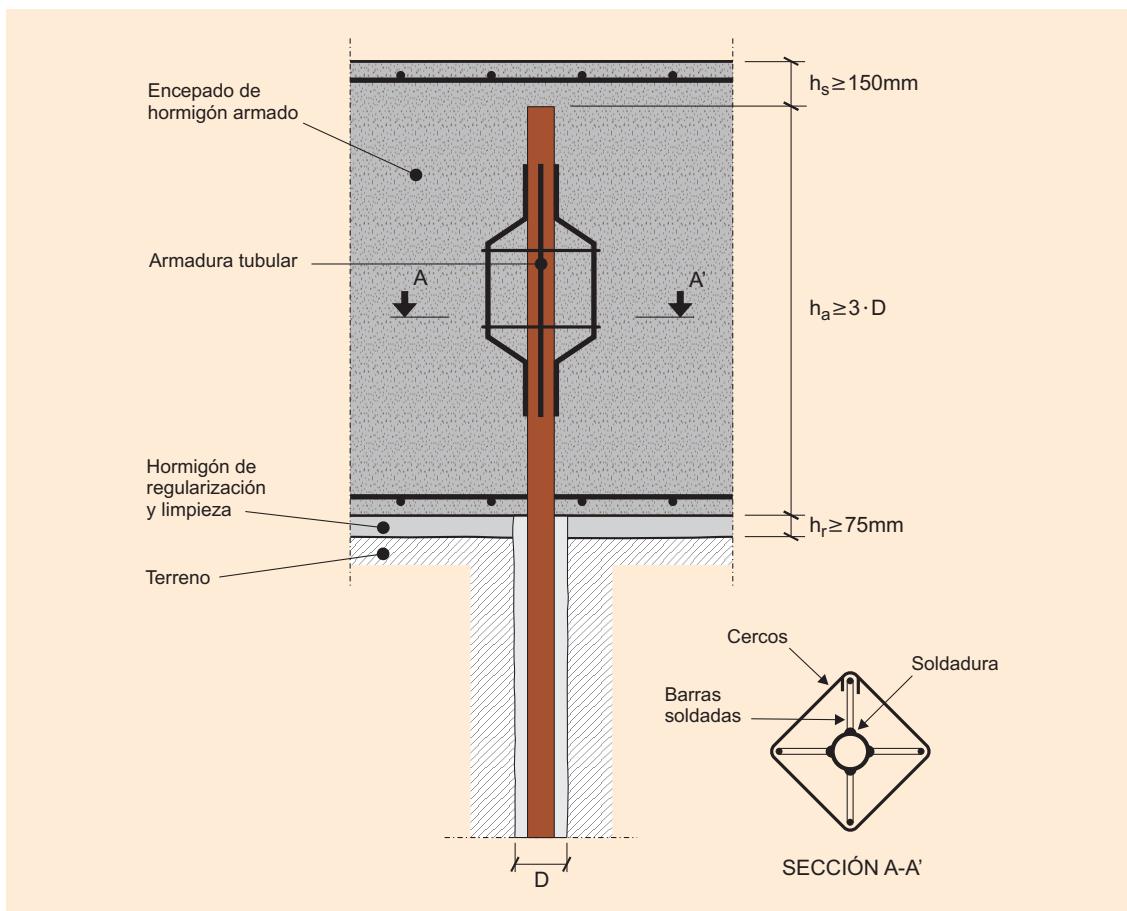


FIGURA A-5.3. EJEMPLO DE CONEXIÓN CON BARRAS CORRUGADAS SOLDADAS

En la figura A-5.4 se observan micropilotes con barras corrugadas soldadas en las cabezas, en una fase previa a la colocación de las armaduras del encepado.



FIGURA A-5.4. MICROPILOTES CON BARRAS CORRUGADAS SOLDADAS EN LA CABEZA

Otro sistema para aumentar la capacidad de transmisión de esfuerzos entre acero y hormigón puede ser el empleo de chapas rectangulares soldadas longitudinalmente a la armadura tubular, tal y como se representa en la figura A-5.5. La anchura de estas chapas conectadoras debe ser mayor que tres cuartas partes del diámetro nominal del micropilote.

$$b_c \geq 0,75 D$$

El espesor de las chapas soldadas será mayor o igual que el de la armadura tubular. Los espesores de la armadura tubular y de las chapas soldadas habrán de resultar, en todo caso, mayores de tres milímetros ($t > 3$ mm). El procedimiento de soldeo debe ser conforme a UNE EN 287 y UNE EN 288.

El espesor mínimo de la garganta de soldadura se determinará conforme a lo especificado en la tabla A-5.1.

TABLA A-5.1. ESPESORES MÍNIMOS DE GARGANTA DE SOLDADURA, e_g

ESPESOR DE ARMADURA TUBULAR Y CHAPA CONECTORA (mm)	ESPESOR DE GARGANTA DE LA SOLDADURA (mm)
$3 < t < 10$	$e_g > 3$
$10 \leq t \leq 20$	$e_g > 4,5$

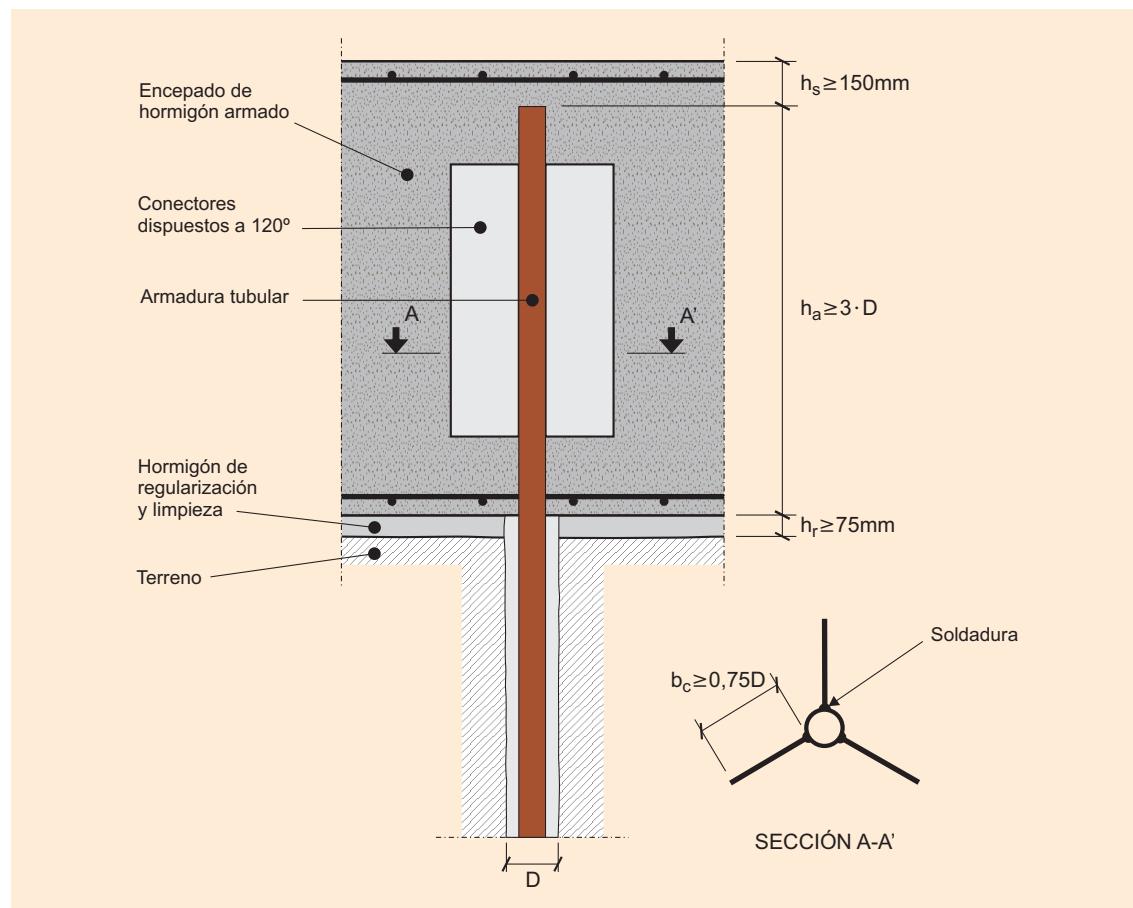


FIGURA A-5.5. EJEMPLO DE CONEXIÓN CON CHAPAS SOLDADAS LONGITUDINALMENTE

A-5.2. EJEMPLOS DE CONEXIÓN DIRECTA A UNA CIMENTACIÓN PREEXISTENTE

En algunos proyectos se podrá disponer, por su configuración, de zonas de conexión entre micropilote y estructura preexistente de gran desarrollo, como la que se muestra en la figura A-5.6, tomada de la literatura técnica¹.

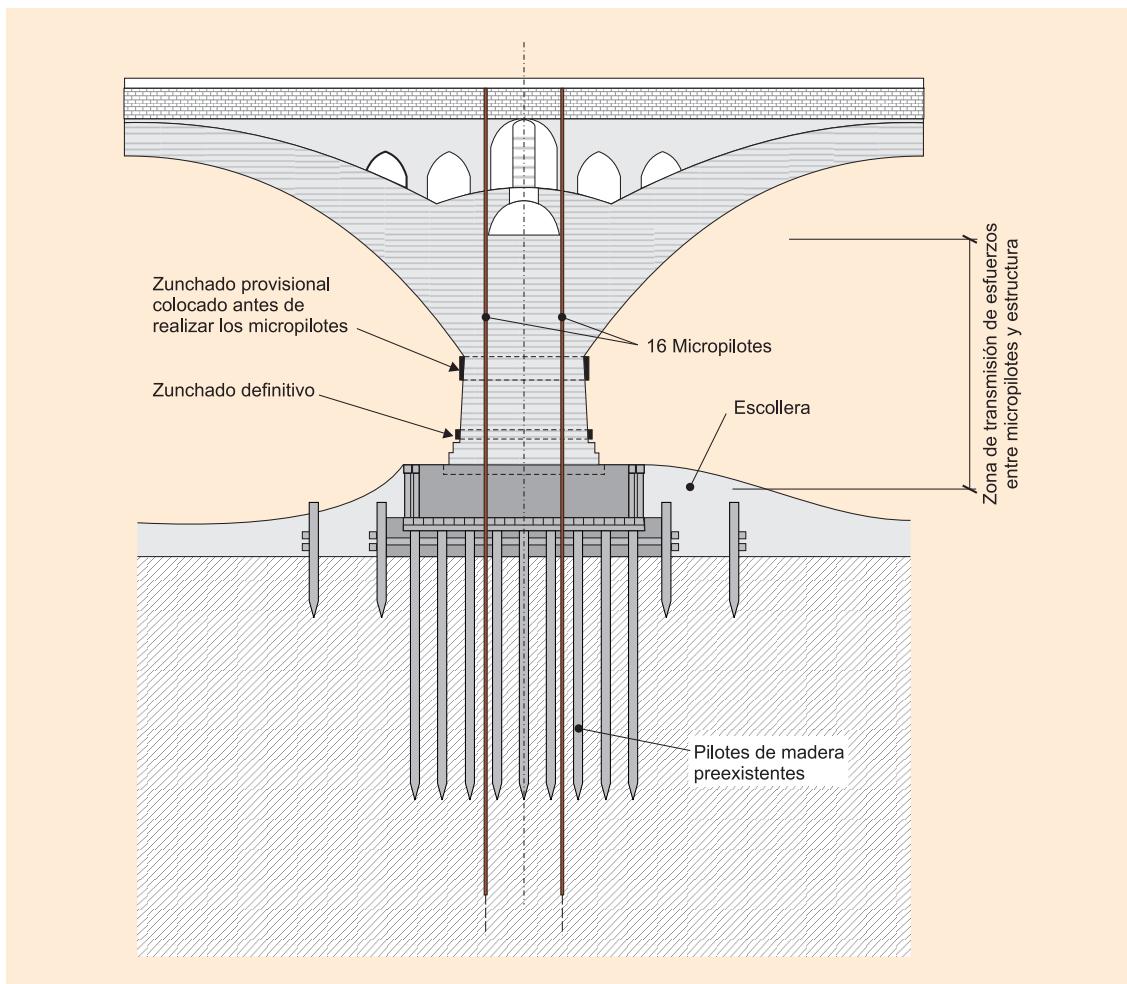


FIGURA A-5.6. EJEMPLO DE CONEXIÓN DIRECTA DE MICROPILOTES DE REFUERZO A LAS PILAS DE UN PUENTE DE PIEDRA

Tal y como se refleja en la figura A-5.6 la transmisión directa de esfuerzos entre micropilotes y estructura preexistente puede acompañarse de actuaciones complementarias, como, por ejemplo, el zunchado de la estructura a reforzar.

Debe tenerse en cuenta que las zonas de cimientos antiguos, con pilotes y elementos de madera u otros materiales, pueden presentar debilidad, siendo preferible en general no tenerlas en cuenta, tanto para la consideración de la transmisión de esfuerzos del micropilote a la estructura, como al terreno.

En otros casos, en que la longitud de transmisión de esfuerzos esté más limitada, pero se trate de cimentaciones de hormigón en las que se pueda conseguir una buena adherencia, se podrá aumentar el diámetro de la perforación por el interior de la cimentación existente, para conseguir una superficie de contacto mayor. En la figura A-5.7 se muestra un ejemplo de este tipo de conexión.

¹ Institut pour la Recherche et l'Experimentation en Génie Civil, IREX (2004): *Synthèse des résultats et recommandations du Projet national sur les micropieux*, FOREVER.

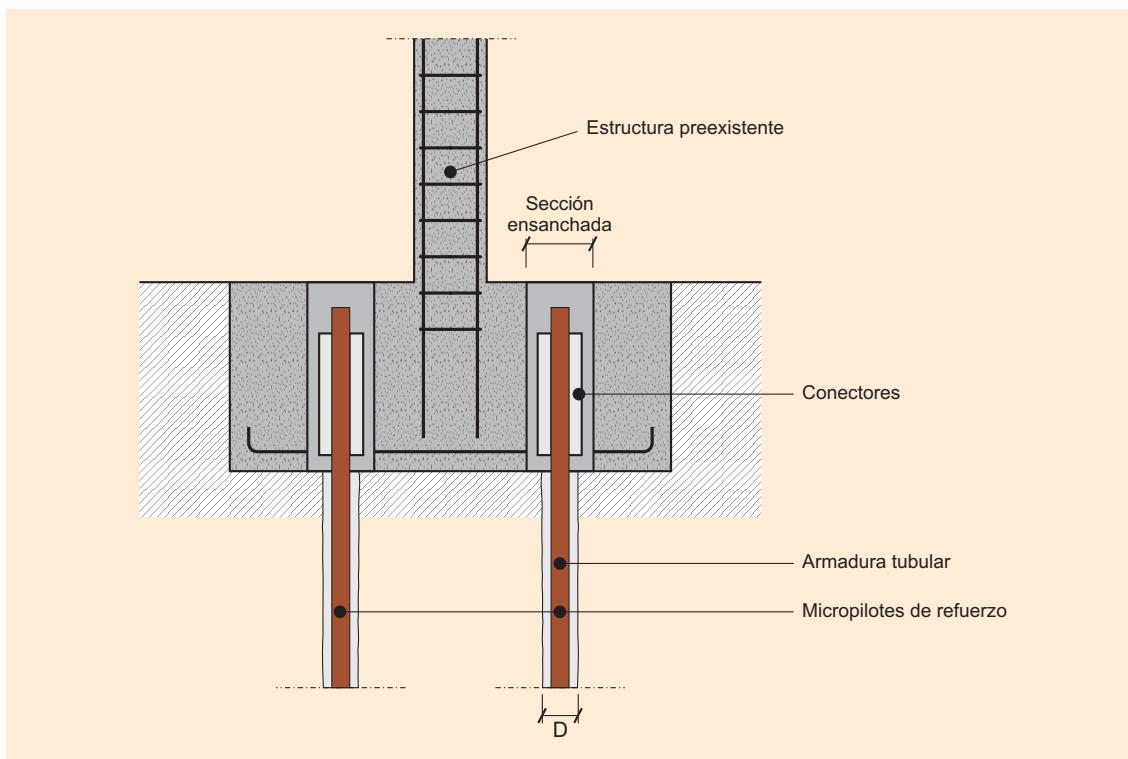


FIGURA A-5.7. EJEMPLOS DE CONEXIÓN DIRECTA A UNA CIMENTACIÓN PREEEXISTENTE DE HORMIGÓN ARMADO

En la tabla A-5.2 se indican valores orientativos, para la tensión rasante última de cálculo entre la lechada o mortero que rodea el micropilote y la cimentación preexistente, que tienen en cuenta la posible mejora de la mampostería o fábrica de ladrillo producida por la propia inyección del micropilote. No obstante lo anterior, podrán considerarse valores superiores cuando se utilicen morteros especiales para este tipo de aplicaciones, con datos avalados por ensayos, y así se justifique expresamente en el proyecto.

Se considera que el mortero es de «buena calidad» cuando aparece como compacto, poco alterado, resulta estable frente al agua y rellena por completo las juntas de la mampostería o fábrica de ladrillo; el «mortero pobre» es poroso, se encuentra alterado, parcialmente suelto y resulta disgregable y erosionable por el agua, presentando juntas descamadas. En general, el mortero condiciona la calidad del conjunto de la fábrica de ladrillo, excepto cuando el ladrillo está en mal estado, es decir, cuando se trata de un ladrillo de baja resistencia, mal cocido, poroso, alterado y sensible al agua.

TABLA A-5.2. TENSIÓN RASANTE ÚLTIMA DE CÁLCULO ENTRE LECHADA O MORTERO DEL MICROPILOTE Y CIMENTACIÓN PREEEXISTENTE, $\tau_{Rc,d}$

TIPO DE CIMENTACIÓN	$\tau_{Rc,d}$ (MPa)
Mampostería de piedra de resistencia media a baja ($q_u \leq 50$ MPa) con mortero pobre	0,01-0,20
Mampostería de piedra de alta resistencia ($q_u \geq 50$ MPa) con mortero de buena calidad	0,20-0,30
Fábrica de ladrillo de baja calidad, con mortero pobre	0,02-0,25
Fábrica de ladrillo de alta calidad, con mortero de buena calidad	0,25-0,40
Hormigón	Según EHE ²

² Véase: EHE, artículo 47.

A-5.3. EJEMPLOS DE CONEXIÓN A UN NUEVO ENCEPADO QUE SE CONECTA A SU VEZ A UNA CIMENTACIÓN PREEEXISTENTE

En muchos casos, cuando se puedan ampliar en planta o sustituir parcialmente las cimentaciones preexistentes, se podrán conectar los micropilotes mediante nuevos encepados que a su vez se conecten a la referida cimentación preexistente.

En la figura A-5.8 se esquematiza un ejemplo concreto representativo de un caso particular de este tipo de conexiones.

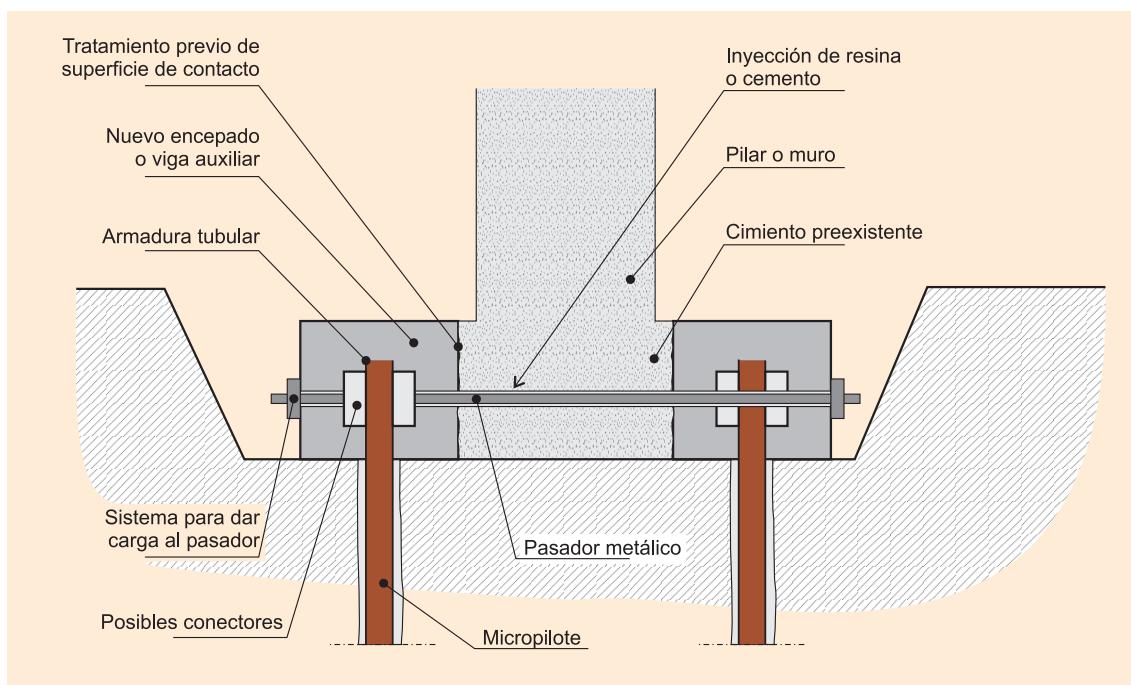


FIGURA A-5.8. EJEMPLO DE CONEXIÓN DE UN NUEVO ENCEPADO QUE SE CONECTA A SU VEZ A UNA CIMENTACIÓN PREEEXISTENTE

CORRELACIONES Y CLASIFICACIONES EMPÍRICAS DE TIPO GEOTÉCNICO, REFERIDAS EN ESTA GUÍA

A los efectos de esta Guía en general podrán adoptarse, con las debidas precauciones, las correlaciones y clasificaciones empíricas que resultan habituales en la mecánica del suelo y de las rocas. A continuación se incluyen aquellas a las que se ha hecho mención expresa.

A-6-1. ESCALA DE METEORIZACIÓN DE LAS ROCAS

TABLA A-6.1. ESCALA DE METEORIZACIÓN DE LA ROCA (SOCIEDAD INTERNACIONAL DE MECÁNICA DE ROCAS-ISRM)

GRADO	DENOMINACIÓN	CRITERIO DE RECONOCIMIENTO
I	Roca sana o fresca	La roca no presenta signos visibles de meteorización, pueden existir ligeras pérdidas de color o pequeñas manchas de óxidos en los planos de discontinuidad
II	Roca ligeramente meteorizada	La roca y los planos de discontinuidad presentan signos de decoloración. Toda la roca ha podido perder su color debido a la meteorización y superficialmente ser más débil que la roca sana
III	Roca moderadamente meteorizada	Menos de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma continua o en zonas aisladas
IV	Roca meteorizada a muy meteorizada	Más de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma discontinua
V	Roca completamente meteorizada	Todo el material está descompuesto a un suelo. La estructura original de la roca se mantiene intacta
VI	Suelo residual	La roca está totalmente descompuesta en un suelo y no puede reconocerse ni la textura ni la estructura original. El material permanece «in situ» y existe un cambio de volumen importante

A-6.2. CLASIFICACIÓN DE LA COMPACIDAD DE LAS ARENAS

Puede determinarse en función de los índices N del ensayo SPT, y de densidad I_D .

TABLA A-6.2. COMPACIDAD DE LAS ARENAS EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE N DEL ENSAYO SPT

N	CLASIFICACIÓN
< 5	Muy floja
5-10	Floja
11-30	Media
31-50	Densa
> 50	Muy densa

TABLA A-6.3. COMPACIDAD DE LAS ARENAS EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE DENSIDAD I_D

I_D	CLASIFICACIÓN
0-0,15	Muy floja
0,15-0,35	Floja
0,35-0,65	Media
0,65-0,85	Densa
0,85-1,00	Muy densa

Índice de densidad de una arena: Relación entre los índices de poros e, o pesos específicos γ , que se indica:

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{\gamma_{\max}}{\gamma} \cdot \frac{\gamma - \gamma_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}$$

donde:

I_D : Índice de densidad.

e, γ : Índice de poros y peso específico de la arena correspondiente al estado analizado.

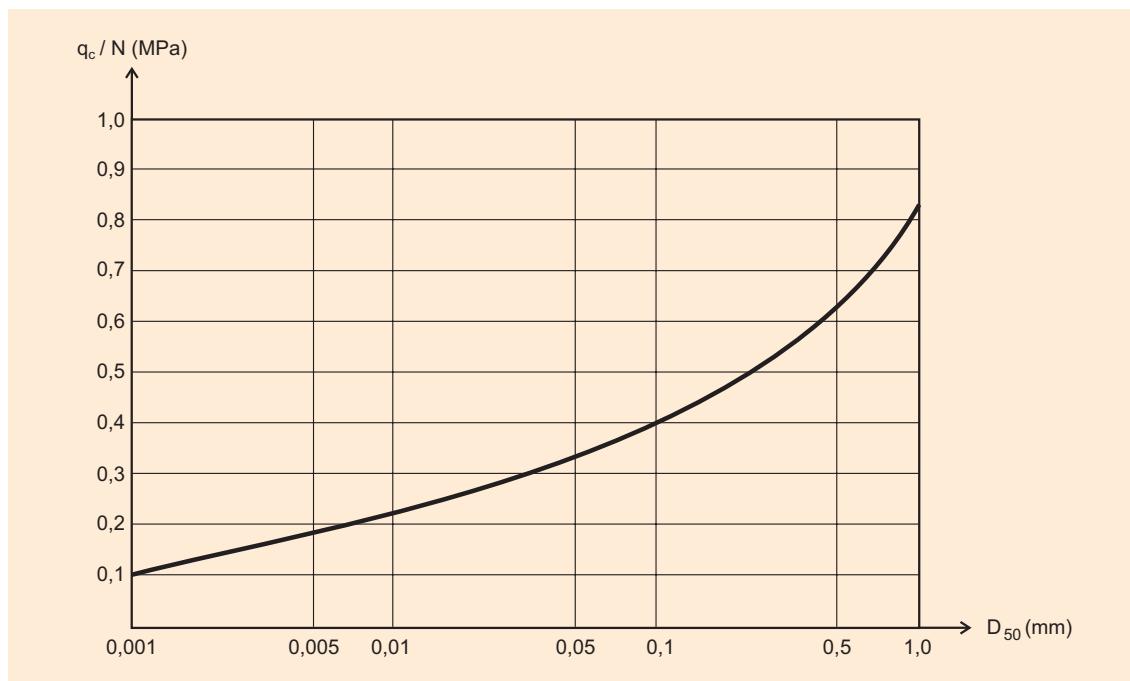
e_{\min}, γ_{\min} : Índice de poros y peso específico mínimo de la arena.

e_{\max}, γ_{\max} : Índice de poros y peso específico máximo de la arena.

Los valores $\gamma_{\max}, \gamma_{\min}$, pueden obtenerse conforme a lo especificado en UNE 103106 y UNE 103105 respectivamente.

A-6.3. CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE N DEL ENSAYO SPT Y LA RESISTENCIA POR PUNTA DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁTICA CPT

Los valores del índice N del ensayo de penetración estándar SPT según UNE 103800, pueden relacionarse con la resistencia por punta q_c , del ensayo de penetración con el cono CPT según UNE 103804, en función del tamaño medio de las partículas del suelo D_{50} , de acuerdo con la ley aproximada recogida en la figura A-6.1.

FIGURA A-6.1. CORRELACIÓN (D_{50} , q_c/N)

A-6.4. CLASIFICACIÓN DE LA CONSISTENCIA DE LOS SUELOS ARCILLOSOS

TABLA A-6.4. CONSISTENCIA DE LOS SUELOS ARCILLOSOS

CONSISTENCIA DE LOS SUELOS ARCILLOSOS	RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (kN/m ²)	ENsayo Manual
Muy blanda	0 - 25	Se extruye entre los dedos
Blanda	25 - 50	Se puede moldear fácilmente
Media	50 - 100	Se moldea con dificultad
Firme	100 - 200	Se puede deformar con el dedo pulgar
Muy firme	200 - 500	Se puede arañar con la uña del pulgar
Dura	> 500	Difícil de arañar

La resistencia al corte sin drenaje (en general, equivalente a la mitad de la resistencia a la compresión simple) de los suelos cohesivos normalmente consolidados puede suponerse preliminarmente igual al veintidós por ciento (22%) de la presión vertical efectiva a la profundidad a la que se encuentra. Es decir:

$$s_u = \frac{q_u}{2} \approx 0,22 \sigma'_v$$

A-6.5. MÓDULO DE REACCIÓN DEL TERRENO

A-6.5.1. INTRODUCCIÓN

En esta Guía se representa la reacción del terreno a los movimientos laterales del micropilote mediante el modelo lineal de la figura A-6.2

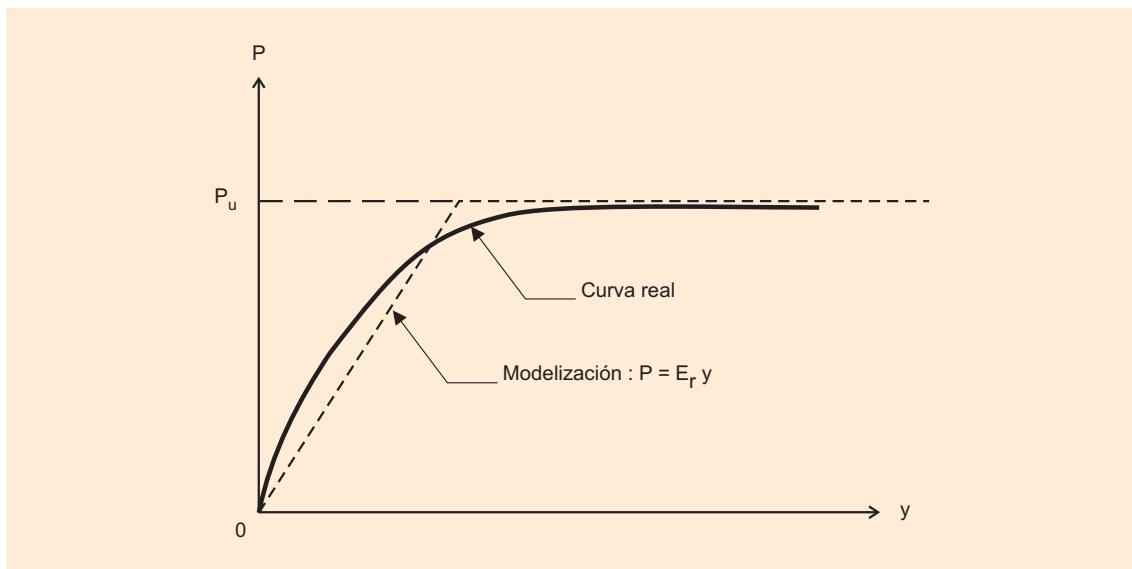


FIGURA A-6.2. CURVA DE REACCIÓN SUELO-MICROPILOTE

La reacción del terreno sobre el micropilote por unidad de longitud es, según este modelo lineal:

$$P = E_r \cdot y \quad \text{para } y \leq \frac{P_u}{E_r}$$

$$P = P_u \quad \text{para } y > \frac{P_u}{E_r}$$

donde:

P: Reacción horizontal del terreno sobre el micropilote por unidad de longitud del micropilote.

y: Desplazamiento del micropilote medido perpendicularmente a su eje.

E_r : Módulo de reacción del terreno.

P_u : Presión de fluencia del terreno.

En general se recomienda la consideración de los siguientes valores del módulo de reacción del terreno (véanse figuras A-6.3 y A-6.4):

- Solicitaciones permanentes: E_r .
- Solicitaciones de corta duración: $2E_r$.

Para el caso particular de suelos granulares de compacidad floja a media en presencia de solicitudes permanentes, se recomienda adoptar una curva de reacción de pendiente $E_r/2$, o bien una curva bilineal de pendiente E_r hasta un valor de P igual a la mitad de la presión de fluencia y de pendiente $E_r/5$ a partir de este punto (véase figura A-6.5).

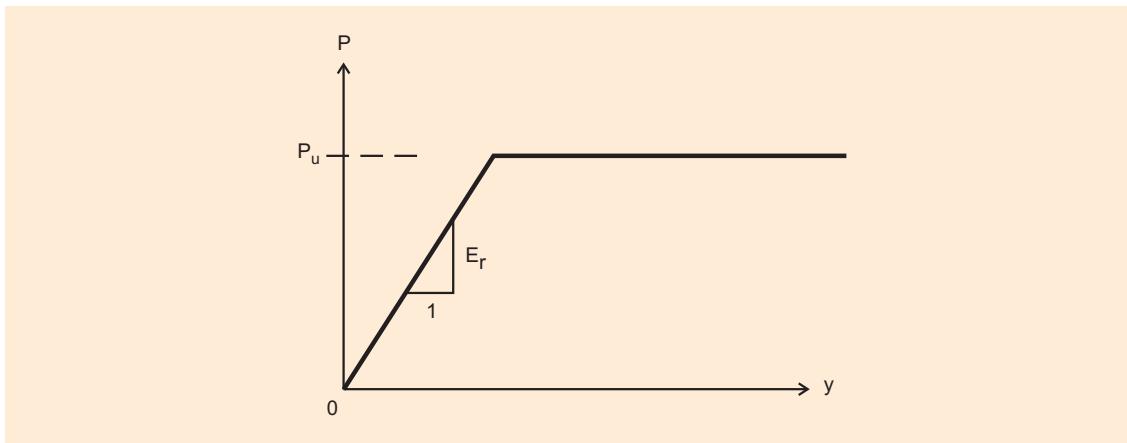


FIGURA A-6.3. CURVA DE REACCIÓN DEL SUELO PARA SOLICITACIONES PERMANENTES

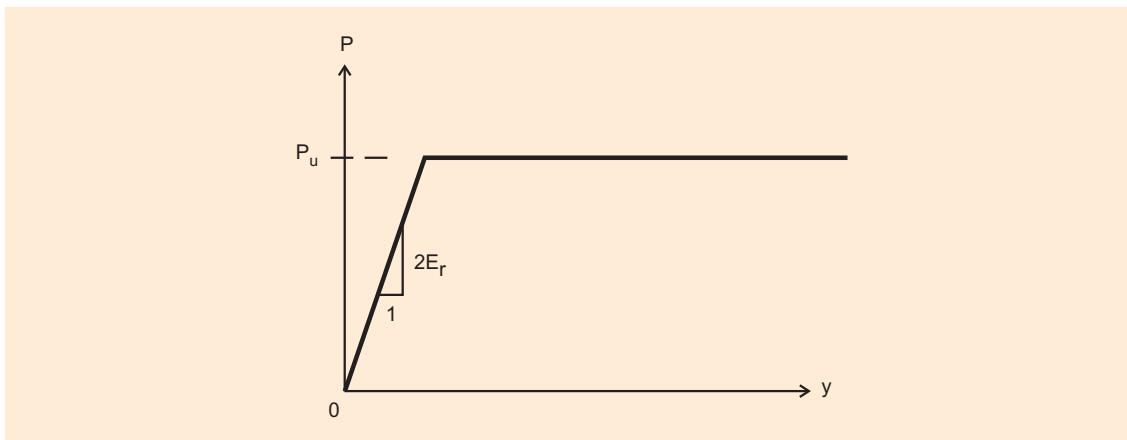


FIGURA A-6.4. CURVA DE REACCIÓN DEL SUELO PARA SOLICITACIONES DE CORTA DURACIÓN

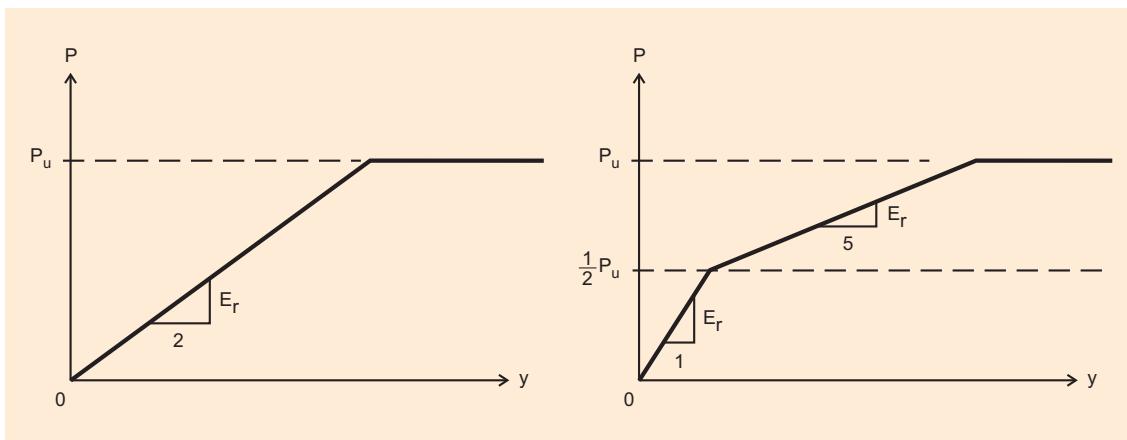


FIGURA A-6.5. CURVA DE REACCIÓN DEL SUELO PARA SUELOS GRANULARES FLOJOS A MEDIOS Y SOLICITACIONES PERMANENTES

A-6.5.2. ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE REACCIÓN DEL TERRENO

El módulo de reacción del terreno E_r , se puede estimar, en general, por varios procedimientos que se indican en orden de preferencia:

1. A partir de pruebas de carga horizontal, debidamente interpretadas (véanse apartados 3.5, 5.4 y apéndice 2).
2. En función de ensayos presiométricos realizados en sondeos.
3. A partir de correlaciones basadas en la experiencia general.

Estimación a partir de ensayos presiométricos

Los ensayos presiométricos resultan especialmente indicados para caracterizar la deformabilidad del terreno. Cuando se disponga de información respecto al módulo presiométrico E_M , se puede suponer:

$$E_r = E_M \frac{6}{\frac{4}{3}(2,65)^{\alpha_p} + \alpha_p}$$

donde:

E_r : Módulo de reacción del terreno.

E_M : Módulo presiométrico.

α_p : Coeficiente cuyos valores se tomarán de la tabla A-6.5, en función del tipo de suelo y de la relación entre el módulo presiométrico y la presión límite del terreno (E_M/P_{lim}).

TABLA A-6.5. COEFICIENTE α_p

TIPO DE SUELO	TURBA	ARCILLAS		LIMOS		ARENAS		ARENAS Y GRAVAS	
	α_p	E_M/P_{lim}	α_p	E_M/P_{lim}	α_p	E_M/P_{lim}	α_p	E_M/P_{lim}	α_p
Sobreconsolidado	—	>16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3
Normalmente consolidado	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Alterado o remoldeado	—	7-9	1/2	5-8	1/2	5-7	1/3	—	1/4

NOTA: En el caso de rocas se adoptan valores comprendidos entre $\alpha_p = 1/3$ si está muy fracturada y $\alpha_p = 2/3$ si está ligeramente fracturada.

En la tabla A-6.6 se indican, a título meramente orientativo, valores promedio del módulo presiométrico y la presión límite en el ensayo presiométrico para distintos tipos de suelos.

TABLA A-6.6. VALORES ORIENTATIVOS (E_M , P_{lim})

TIPO DE SUELO		E_M (MPa)	P_{lim} (MPa)
Granular ⁽¹⁾	Flojo	0 - 3,5	0 - 0,5
	Medio	3,5 - 12	0,5 - 1,5
	Denso	12 - 22,5	1,5 - 2,5
	Muy denso	> 22,5	> 2,5
Cohesivo ⁽²⁾	Blando	0 - 2,5	0 - 0,2
	Medio	2,5 - 5	0,2 - 0,4
	Firme	5 - 12	0,4 - 0,8
	Muy firme	12 - 25	0,8 - 1,6
	Duro	> 25	> 1,6

⁽¹⁾ Veáñense criterios de clasificación para terrenos granulares en el apartado A-6.2, en función de los índices N del ensayo SPT, o de densidad I_D .

⁽²⁾ Veáñense criterios de clasificación para terrenos cohesivos en el apartado A-6.4, en función, preferiblemente, de su resistencia a compresión simple.

Estimación a partir de correlaciones

Correlaciones para el módulo de reacción

En arenas se puede suponer que el módulo de reacción del terreno depende de la profundidad z, de acuerdo con la siguiente ley:

$$E_r = k_h \cdot z$$

El valor de la constante de proporcionalidad k_h (MPa/m) se puede obtener de la tabla A-6.7.

TABLA A-6.7. COEFICIENTE k_h (MPa/m)

COMPACIDAD DE LAS ARENAS	SITUACIÓN RESPECTO AL NIVEL FREÁTICO	
	POR ENCIMA	POR DEBAJO
Muy floja	1	0,6
Floja	2	1,2
Media	5	3
Densa	10	6
Muy densa	20	12

En arcillas puede suponerse que el módulo de reacción es proporcional a su resistencia al corte sin drenaje:

$$50 s_u < E_r < 100 s_u$$

Modelo de Winkler

El modelo de comportamiento tenso-deformacional de Winkler, o del coeficiente de balasto, se define sobre un medio continuo en el que los desplazamientos de una superficie sometida a una presión uniforme, son proporcionales a la misma. Es decir:

$$p = k \cdot s$$

donde:

p: Presión.

s: Desplazamiento.

k: Constante de proporcionalidad entre presiones y desplazamientos, llamado módulo de Winkler o coeficiente de balasto.

El caso del semiespacio elástico de Winkler para el cálculo de asientos se representa en la figura A-6.6.

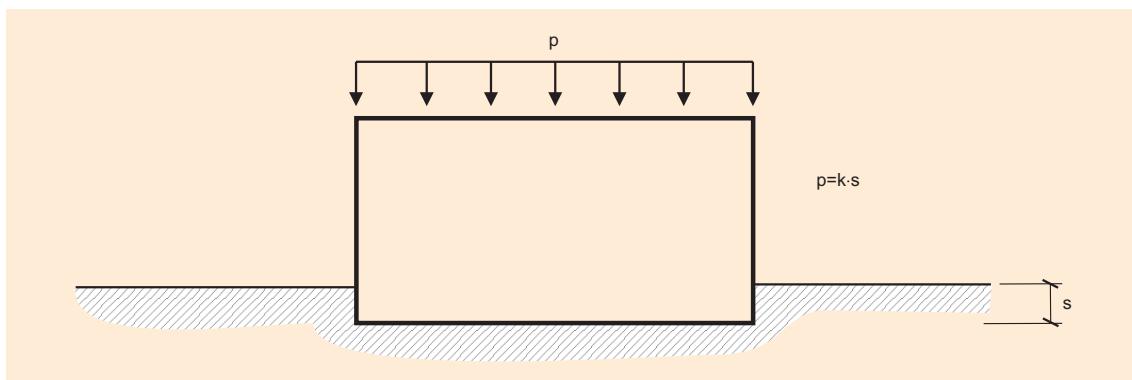


FIGURA A-6.6. SEMIESPACIO DE WINKLER

El módulo de Winkler o coeficiente de balasto tiene dimensiones de peso específico. El asiento de una cimentación superficial como la representada en la figura A-6.6, es equivalente a lo que se hundiría el plano de cimentación en un líquido con dicha densidad.

Pese a las limitaciones teóricas del semiespacio de Winkler¹ su utilización facilita el desarrollo de soluciones analíticas, como las que se refieren en este documento para caracterizar la reacción del terreno a los movimientos transversales del micropilote, según se representan en la figura A-6.7.

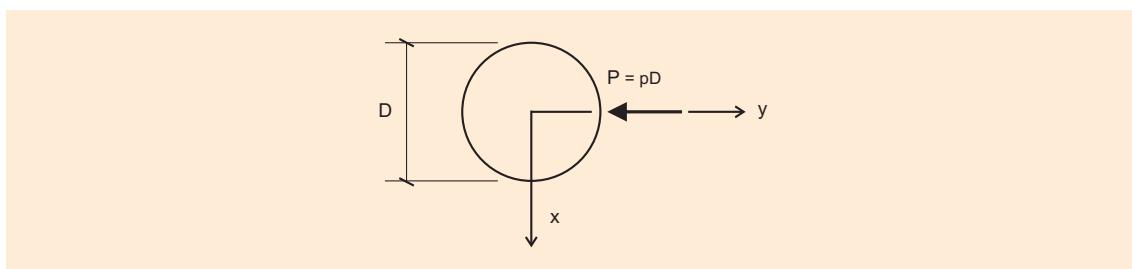


FIGURA A-6.7. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN MICROPILOTE SOMETIDO A UNA CARGA P POR UNIDAD DE LONGITUD

¹ Véase, Jiménez Salas, J. A. y otros: *Geotecnia y Cimientos II*, capítulo 3.

En general, puede considerarse la carga P por unidad de longitud de eje de micropilote igual a la reacción por unidad de longitud en el terreno al deformarse el micropilote, o bien, la carga media por unidad de superficie p (en proyección sobre el eje x) igual a la reacción media por unidad de superficie del terreno al deformarse el micropilote.

Si se utiliza la reacción por unidad de superficie con el modelo de Winkler se tiene la siguiente expresión:

$$p = k \cdot y$$

donde:

p : Reacción transversal del terreno sobre el micropilote por unidad de superficie.

k : Módulo de Winkler (o coeficiente de balasto).

y : Desplazamiento del eje del micropilote en la dirección del eje y .

Si se emplea la reacción por unidad de longitud del eje del micropilote, se tiene la expresión:

$$P = E_r \cdot y$$

donde:

P : Reacción transversal del terreno sobre el micropilote por unidad de longitud (del eje del micropilote).

E_r : Módulo de reacción del terreno.

y : Desplazamiento del eje del micropilote en la dirección del eje y .

El módulo de Winkler o coeficiente de balasto k , tiene dimensiones de peso específico mientras que el módulo de reacción E_r , tiene dimensiones de tensión, al igual que el módulo de elasticidad (o de Young). Uno y otro estarían relacionados a través del diámetro del micropilote.

NOMENCLATURA

A-7.1. GLOSARIO

En este documento se utilizan, entre otros, los siguientes términos, con el significado con que figuran a continuación:

ARMADURA TUBULAR. Tubo de acero estructural, longitudinal al micropilote, que comprende la práctica totalidad de su longitud, y contribuye a su capacidad estructural.

ASIENTO MÁXIMO. Asiento correspondiente a la carga máxima (de prueba) en una prueba de carga.

ASIENTO NOMINAL. Asiento medido durante una prueba de carga, al aplicar la carga nominal.

ASIENTO REMANENTE. Asiento no recuperable que se produce al descargar, al finalizar una prueba de carga.

CABEZA. Parte del micropilote que sirve como vínculo con el elemento estructural a cimentar, encepado o viga de atado. Salvo aplicaciones horizontales o en contrapendiente constituye la zona a mayor cota del micropilote.

CARGA DE PRUEBA. Carga máxima a la que se somete a un micropilote durante una prueba de carga. Ha de ser igual o inferior a la de hundimiento y normalmente, al menos un cincuenta por ciento (50%) superior a la nominal.

CARGA DE TRABAJO. Carga realmente actuante sobre los micropilotes, debida a las acciones externas aplicadas.

CARGA NOMINAL. Solicitud obtenida en el proyecto de la estructura, máxima a que se preve que sea sometido el micropilote durante su vida útil.

CENTRADOR. Elemento solidario a la armadura que sirve para garantizar su posición y recubrimiento.

CONECTADOR. Elemento que, fijado a la armadura tubular del micropilote en la zona de conexión de ésta con la cimentación, sirve para aumentar la capacidad de transmisión de esfuerzos entre ambos.

DIÁMETRO NOMINAL. Diámetro del micropilote considerado a efectos de cálculo, que será menor o igual que el de perforación.

DIÁMETRO DE PERFORACIÓN. Diámetro realmente obtenido por el útil de perforación empleado.

ENCEPADO. Elemento de hormigón armado dimensionado para transmitir los esfuerzos de la estructura a los micropilotes, en el que se unen las cabezas de los mismos, procurando su trabajo conjunto. En determinados casos de recalce, el cimiento preexistente puede constituir en sí mismo el encepado.

FUSTE. Superficie lateral del micropilote que permanece enterrada. Salvo indicación expresa en otro sentido y a los efectos del cálculo resistente, su área se obtendrá considerando el diámetro nominal y la longitud enterrada, excepto en las zonas con huecos.

INYECCIÓN. Proceso, en la ejecución de un micropilote, que permite llenar la zona existente entre el terreno y la armadura, así como el interior de ésta y los posibles huecos existentes en el terreno. Para realizar la inyección se emplean lechadas o morteros de cemento.

LATIGUILLO. Tubería flexible que tiene un extremo conectado a la bomba de inyección y el otro en el interior del micropilote. En el caso de inyecciones tipo IU, este extremo se encuentra abierto; en las repetitivas está cerrado por un tapón y el tramo introducido en el micropilote se encuentra perforado y aislado por uno o dos obturadores, según se trate de inyecciones IR ó IRS, respectivamente.

OBTURADOR. Dispositivo hidráulico o neumático, que permite aislar una zona específica de la armadura tubular, con el objetivo de inyectar una determinada zona del terreno.

PERFORACIÓN. Taladro ejecutado en el terreno hasta la profundidad definida en el proyecto, para alojar el micropilote en su interior.

PRUEBA DE CARGA. Ensayo «in situ» efectuado sobre un micropilote (o grupo de micropilotes) en el que se miden sus movimientos al someterlo, según un procedimiento definido previamente, a la denominada carga de prueba de compresión, tracción o lateral.

PUNTA. Extremo opuesto a la cabeza del micropilote. Salvo aplicaciones horizontales o en contrapendiente constituye la zona a menor cota del mismo.

REINYECCIÓN. Segunda o posteriores inyecciones en los micropilotos tipos IR ó IRS.

SECCIÓN TRANSVERSAL. Sección recta perpendicular al eje del micropilote. A efectos de cálculo se considera circular y de diámetro igual al nominal.

TUBO-MANGUITO. Elemento cilíndrico dotado de válvulas antirretorno regularmente espaciadas, que permiten la realización de inyecciones repetitivas utilizando un dispositivo de obturación.

VÁLVULA ANTIRRETORNO. Dispositivo que permite el flujo de la inyección en un sólo sentido.

A-7.2. NOTACIÓN

a/c	Relación agua/cemento, en peso
A_a	Sección de cálculo de la armadura tubular de acero
A_c	Sección neta de lechada o mortero, descontando armaduras
A_L	Área lateral del micropilote
A_{Le}	Área lateral del micropilote en el empotramiento en roca
A_{pe}	Área de la sección recta de la punta en el empotramiento en roca
A_{Pr}	Sección reducida de la armadura tubular de acero, calculada teniendo en cuenta la reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión
A_s	Sección total de las barras corrugadas de acero
b_c	Ancho de las chapas conectadoras soldadas a la armadura tubular para aumento de la superficie de transmisión de esfuerzos por adherencia
B_g	Ancho (dimensión menor en planta) de un grupo de micropilotes
c'	Cohesión efectiva
C_e	Coeficiente de eficacia de un grupo de micropilotes bajo carga vertical
C_R	Coeficiente para la determinación del factor R (pandeo)
C_u	Coeficiente de uniformidad
d_e	Diámetro exterior nominal de la armadura tubular

d_i	Diámetro interior nominal de la armadura tubular
d_t	Distancia del eje del micropilote a la cabeza de un talud
$d_{t,\text{lím}}$	Distancia límite a la cabeza de un talud
D	Diámetro nominal del micropilote
D_p	Diámetro de la perforación del micropilote
D_R	Diámetro del micropilote en la zona de pandeo
D_T	Diámetro del túnel
D_x	Abertura del tamiz por el que pasa el x% de la muestra
D_{50}	Abertura del tamiz por el que pasa el 50% de la muestra (tamaño medio de las partículas)
e	Índice de poros
e_B	Distancia entre el terreno y la carga horizontal que provoca la rotura (ábacos de Broms)
$e_{\text{máx}}$	Índice de poros máximo
$e_{\text{mín}}$	Índice de poros mínimo
e_g	Espesor de garganta de soldadura
E	Módulo de elasticidad del terreno
E_a	Módulo de elasticidad del acero
E_c	Módulo de elasticidad de la lechada o mortero
E_d	Esfuerzo de cálculo para un determinado modo de fallo
E_L	Módulo de elasticidad del terreno a la profundidad L
E_M	Módulo presiométrico
E_p	Módulo de deformación del micropilote
E_r	Módulo de reacción del terreno
$E_{r,d}$	Valor de cálculo del módulo de reacción del terreno
E_0	Módulo de elasticidad del terreno en superficie
f	Coeficiente que depende de la relación entre el valor del módulo de elasticidad de terreno en superficie E_0 y el valor módulo de elasticidad a la profundidad L, E_L
f_{cd}	Resistencia de cálculo del mortero o lechada de cemento a compresión
f_{ck}	Resistencia característica de la lechada o mortero, a compresión simple a los 28 días de edad
$f_{ck,7}$	Resistencia característica de la lechada o mortero, a compresión simple a los 7 días de edad
$f_{e,d}$	Resistencia unitaria por fuste de cálculo en el empotramiento en roca
f_{sd}	Resistencia de cálculo del acero de las armaduras corrugadas
f_{sk}	Límite elástico del acero de las armaduras corrugadas
f_y	Límite elástico del acero de la armadura tubular
f_{yd}	Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular
F_c	Coeficiente de minoración de la cohesión
F_{cu}	Coeficiente de minoración, definido como relación entre la resistencia al corte sin drenaje del terreno natural y el rozamiento unitario por fuste de cálculo
F_e	Coeficiente de influencia del tipo ejecución

F_{fc}	Coeficiente de minoración de la resistencia característica por fuste (compresión)
F_{ft}	Coeficiente de minoración de la resistencia característica por fuste (tracción)
F_H	Coeficiente de minoración de la resistencia horizontal
F_{med}	Coeficiente aplicable al valor medio de los resultados obtenidos en n_c ensayos
$F_{mín}$	Coeficiente aplicable al valor mínimo de los resultados obtenidos en n_c ensayos
F_p	Coeficiente de minoración de la carga horizontal máxima aplicable en cabeza, limitada por la presión de fluencia del suelo
F_r	Coeficiente de minoración del rozamiento unitario límite por fuste
$F_{u,c}$	Coeficiente de minoración del área de la armadura tubular en función del tipo de unión (compresión)
$F_{u,f}$	Coeficiente de minoración del módulo resistente de la armadura tubular en función del tipo de unión (flexión)
$F_{u,t}$	Coeficiente de minoración del área de la armadura tubular en función del tipo de unión (tracción)
F_w	Coeficiente de minoración del módulo de reacción del terreno
F_{we}	Coeficiente de minoración del peso propio del micropilote
F_ϕ	Coeficiente de minoración de la tangente del ángulo de rozamiento interno
h	Altura de la zona de terreno que se considera que grava (a efectos de cálculo) sobre el revestimiento de un túnel, a corto plazo
h_a	Longitud de la armadura tubular embebida en el encepado
h_r	Altura mínima de micropilote recubierto de mortero o lechada, sobre el plano del cimiento, antes de hormigonar el encepado
h_s	Distancia mínima entre la sección recta superior de la armadura tubular y la cara superior del encepado
H	Longitud de la zona libre (sin terreno o rodeado de terreno inestable)
H_B	Resistencia horizontal (ábacos de Broms)
H_{Ed}	Carga horizontal de cálculo
H_f	Altura del frente de excavación
$H_{máx,M}$	Carga horizontal máxima, aplicable en cabeza, limitada por la flexión
$H_{máx,P}$	Carga horizontal máxima, aplicable en cabeza, limitada por la presión de fluencia del suelo
H_o	Carga horizontal en cabeza
H_1	Altura por encima de la punta de los micropilotes que limita la zona de interés para el cálculo de asientos de un grupo de micropilotes
i	Inclinación del micropilote
I_a	Momento de inercia de la sección de acero
I_c	Momento de inercia de la sección de lechada o mortero
I_D	Índice de densidad
I_P	Momento de inercia de la sección transversal del micropilote
IR	Inyección repetitiva
IRS	Inyección repetitiva selectiva
IU	Inyección única

k	Módulo de Winkler
k_o	Coeficiente de empuje al reposo
k_p	Coeficiente de empuje pasivo
k_r	Relación entre los ángulos de rozamiento del contacto terreno-fuste e interno del terreno
K_i	Constante del muelle equivalente al terreno en el tramo iésimo
ℓ	Semilongitud de onda de la imperfección geométrica supuesta de forma sinusoidal
ℓ_d	Longitud de análisis de una imperfección geométrica
ℓ_0	Longitud de transferencia
L	Longitud del micropilote
L_a	Longitud del avance de excavación
L_d	Longitud de cálculo de cada micropilote, considerado como una viga
L_e	Longitud elástica del micropilote
L_{ef}	Profundidad de empotramiento ficticio
L_{emp}	Longitud de empotramiento del micropilote
L_E	Longitud del micropilote que se acorta elásticamente
L_f	Longitud de frente de excavación
L_g	Longitud (dimensión mayor en planta) de un grupo de micropilotes
L_{inf}	Longitud del micropilote bajo la superficie de rotura en un talud o ladera
L_ℓ	Longitud libre del pilote que sobresale de la superficie del terreno
L_s	Longitud de solape entre dos micropilotes sucesivos en un paraguas
L_{sup}	Longitud del micropilote por encima de la superficie de rotura en un talud o ladera
m	Parámetro adimensional que relaciona los volúmenes máximo y teórico de inyección
m_g	Número de columnas de un grupo de micropilotes
M_B	Momento de rotura del micropilote (ábacos de Broms)
$M_{c,Rd}$	Resistencia de cálculo a flexión de la sección del micropilote
M_e	Momento exterior
M_{Ed}	Momento flector de cálculo
M_i	Momento interior
$M_{máx}$	Momento flector máximo
M_o	Momento en cabeza del micropilote
$M_{v,Rd}$	Resistencia de cálculo de la sección del micropilote a flexión, teniendo en cuenta la interacción del esfuerzo cortante
n	Número de micropilotes que forman un grupo
n_c	Número de ensayos de carga efectuados en el mismo tipo de terreno con micropilotes análogos
n_g	Número de filas de un grupo de micropilotes
N	Índice del ensayo SPT
N	Esfuerzo de compresión
N_c	Carga crítica de pandeo

$N_{c,Ed}$	Esfuerzo axil de cálculo (compresión)
$N_{c,Ek}$	Esfuerzo axil característico
$N_{c,Rd}$	Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de compresión
N_g	Carga axial que actúa sobre el grupo de micropilotes
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo axil de cálculo (tracción)
$N_{t,Rd}$	Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de tracción
p	Reacción horizontal del terreno sobre el micropilote por unidad de superficie, en proyección
p	Presión (modelo de Winkler)
p_i	Presión de inyección
P	Reacción horizontal del terreno sobre el micropilote por unidad de longitud
P_{lim}	Presión límite del terreno determinada en el ensayo presiométrico
P_{ref}	Reacción horizontal del terreno sobre el micropilote considerando un terreno horizontal semiindefinido
P_u	Presión de fluencia del terreno
q	Carga del terreno en la zona de influencia de cada micropilote
q_c	Resistencia unitaria del terreno a la penetración estática (resistencia unitaria por punta al avance del cono)
q_d	Valor de cálculo de la carga del terreno
$q_{pe,d}$	Resistencia unitaria por punta de cálculo en el empotramiento en roca
q_u	Resistencia a compresión simple de una roca o suelo cohesivo
Q_N	Carga nominal en una prueba de carga
r	Recubrimiento de la armadura tubular
r_e	Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión
$r_{fc,d}$	Rozamiento unitario de cálculo por fuste frente a esfuerzos de compresión
$r_{ft,d}$	Rozamiento unitario de cálculo por fuste frente a esfuerzos de tracción
$r_{f,lim}$	Rozamiento unitario límite por fuste
R	Factor empírico de pandeo
$R_{c,d}$	Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento (esfuerzo axil de compresión)
$R_{cg,d}$	Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento, del grupo de micropilotes
$R_{c,med}$	Resistencia media frente a esfuerzos de compresión determinada en n_c pruebas de carga
$R_{c,mín}$	Resistencia mínima frente a esfuerzos de compresión determinada en n_c pruebas de carga
R_d	Resistencia de cálculo frente a un determinado modo de fallo
$R_{e,d}$	Resistencia de cálculo en un empotramiento en roca
$R_{fc,d}$	Resistencia de cálculo por fuste frente a esfuerzos de compresión
$R_{fc,k}$	Resistencia característica por fuste frente a esfuerzos de compresión
$R_{ft,d}$	Resistencia de cálculo por fuste frente a esfuerzos de tracción
$R_{ft,k}$	Resistencia característica por fuste frente a esfuerzos de tracción
$R_{h,d}$	Resistencia de cálculo frente a carga horizontal

R_{OC}	Razón de sobreconsolidación
$R_{p,d}$	Resistencia de cálculo por punta
$R_{t,d}$	Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de arranque (esfuerzo axial de tracción)
$R_{t,med}$	Resistencia media frente a esfuerzos de tracción determinada en n_c pruebas de carga
$R_{t,min}$	Resistencia mínima frente a esfuerzos de tracción determinada en n_c pruebas de carga
$R_{u,d}$	Resistencia de cálculo de la conexión micropilote-estructura
$R_{\alpha,d}$	Resistencia de cálculo frente a una carga que forma un ángulo α con la vertical
s	Desplazamiento (modelo de Winkler)
s_b	Asiento debido a la presencia de capas blandas profundas
s_e	Acortamiento elástico del micropilote
s_{gpo}	Asiento de un grupo de micropilotes
$s_{máx}$	Asiento máximo en una prueba de carga
s_{nom}	Asiento nominal en una prueba de carga
s_N	Asiento del micropilote sometido al esfuerzo $N_{c,Ek}$
s_o	Asiento que tendría un micropilote de un grupo considerado como aislado y sometido a una carga axial de valor N_g/n
s_{rem}	Asiento remanente en una prueba de carga
s_t	Separación entre ejes de micropilotes contiguos en una misma sección transversal, en un paraguas
s_{TOT}	Asiento total
s_u	Resistencia al corte sin drenaje del terreno
S	Separación entre ejes de los micropilotes
t	Espesor de la armadura tubular
v_s	Velocidad de asiento en una prueba de carga
V_a	Volumen adicional de inyección
$V_{c,Rd}$	Resistencia de cálculo de una sección a esfuerzo cortante
V_{Ed}	Esfuerzo cortante de cálculo
$V_{máx}$	Volumen máximo de inyección
V_o	Cortante en cabeza del micropilote
$V_{pl,Rd}$	Valor de cálculo de la resistencia plástica de una sección a esfuerzo cortante
V_t	Volumen teórico del micropilote
w	Contenido de humedad de un suelo
w_e	Componente del peso propio del micropilote en la dirección de su eje
W	Módulo resistente de la sección de la armadura tubular
W_{el}	Módulo elástico de la sección de la armadura tubular
W_{pl}	Módulo plástico de la sección de la armadura tubular
x	Coordinada en la dirección del eje del micropilote
y	Desplazamiento del micropilote medido perpendicularmente a su eje
y_o	Desplazamiento del eje del micropilote respecto a un eje ideal rectilíneo, debido a una imperfección geométrica inicial

y_1	Deformada del eje del micropilote debida a la flexión
z	Profundidad, medida verticalmente desde la superficie del terreno

LETRAS GRIEGAS

α	Inclinación con respecto a la vertical
α_c	Semiángulo cónico
α_f	Ángulo de inclinación del frente con respecto a la rasante
α_g	Coeficiente para la modificación de la profundidad de empotramiento ficticio en grupos
α_p	Coeficiente adimensional empleado para la obtención del módulo de reacción del terreno a partir del presiométrico
β	Ángulo de un talud respecto a la horizontal
β_d	Amplitud relativa máxima de una imperfección geométrica
γ	Peso específico del terreno
γ_a	Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular
γ_{ap}	Peso específico aparente del terreno
γ_c	Coeficiente parcial de seguridad para el mortero o lechada
$\gamma_{máx}$	Peso específico máximo de una arena
$\gamma_{mín}$	Peso específico mínimo de una arena
γ_s	Coeficiente parcial de seguridad para el acero de las barras corrugadas
δ	Ángulo de rozamiento del contacto terreno-fuste
δ_d	Amplitud de la imperfección geométrica o defecto de forma inicial
δ_o	Amplitud máxima de la imperfección geométrica
δ_1	Amplitud máxima de la deformada debida a la flexión
η	Coeficiente que tiene en cuenta la alternancia de cargas sobre el micropilote
$\theta(z)$	Giro en función de la profundidad z
v	Módulo de Poisson
ρ	Factor de reducción empleado en la obtención de la resistencia estructural frente a esfuerzos combinados de flexión y cortante
ρ_t	Factor de reducción de la reacción horizontal del terreno sobre un micropilote que tiene en cuenta la proximidad de un talud
σ'_H	Presión efectiva horizontal del terreno
$\sigma_{s,máx}$	Tensión máxima en el acero
σ'_V	Presión efectiva vertical del terreno
$\tau_{Ra,d}$	Tensión rasante última de cálculo entre lechada o mortero y acero estructural
$\tau_{Rc,d}$	Tensión rasante última de cálculo entre la lechada o mortero del micropilote y el cimiento preexistente
ϕ	Ángulo de rozamiento interno del terreno
ϕ'	Ángulo de rozamiento interno efectivo del terreno
ω	Cociente entre la longitud libre en la parte superior del micropilote y su longitud total (ábacos de Souche)

NORMAS UNE Y BIBLIOGRAFÍA

A-8.1. NORMAS UNE

Las normas UNE citadas en esta Guía son las siguientes:

- UNE 22950-1.** Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 1: Resistencia a la compresión uniaxial.
- UNE 36068.** Barras corrugadas de acero soldable para armaduras de hormigón armado.
- UNE 103105.** Determinación de la densidad mínima de una arena.
- UNE 103106.** Determinación de la densidad máxima de una arena por el método del apisonado.
- UNE 103400.** Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo.
- UNE 103401.** Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo.
- UNE 103402.** Determinación de los parámetros resistentes de una muestra de suelo en el equipo triaxial.
- UNE 103800.** Geotecnia. Ensayos in situ. Ensayo de penetración estándar (SPT).
- UNE 103804.** Geotecnia. Procedimiento internacional de referencia para el ensayo de penetración con el cono (CPT).
- UNE EN 287.** Cualificación de soldadores. Soldeo por fusión.
- UNE EN 288.** Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos.
- UNE EN 10025.** Productos laminados en caliente, de acero no aleado, para construcciones metálicas de uso general. Condiciones técnicas de suministro.
- UNE EN 10027.** Sistemas de designación de aceros.
- UNE EN 10113.** Productos laminados en caliente para construcciones metálicas. Aceros soldables de grado fino.
- UNE EN 10210.** Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado de grano fino.
- UNE EN 10219.** Perfiles huecos para construcción, conformados en frío, de acero no aleado y de grano fino.
- UNE EN 14199.** Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Micropilotes.
- UNE EN 1993.** Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero.
- UNE EN 1994.** Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón.
- UNE EN 1997.** Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico.

A-8.2. BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (2003): *Normas UNE referidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)* (publicación en CD-Rom).
- Briaud, J.-L. (1992): *The Pressuremeter*, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Bustamante, M. (1986): «Un método para el cálculo de los anclajes y de los micropilotes inyectados», *Boletín de Información del Laboratorio de Carreteras*, n.º 174, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Ceroni, E. G. (2002): *Micropali, pali di fondazione, sottopassi e tunnel, plinti basse quadrati*, Dario Flaccovio Editore.
- Dirección General de Carreteras: *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)* (se recomienda el empleo de la publicación en CD-Rom de la Dirección General de Carreteras).
- Dirección General de Carreteras (2003): *Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera*.
- Dirección General de Carreteras (2003): *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.
- Dirección General de Carreteras (2000): *Manual de aplicación de las Recomendaciones RPM-RPX/95*.
- Dirección General de Carreteras (1998): *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-98)*, Orden Ministerial de 12 de febrero de 1998 (*BOE* del 4 de marzo).
- Dirección General de Carreteras (1996): *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras, RPX-95*.
- Frank, R. (1999): *Calcul des fondations superficielles et profondes*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Institut pour la Recherche et l'Experimentation en Genie Civil (IREX) (2004): *Synthèse des résultats et recommandations du Projet national sur les micropieux (FOREVER)*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Jiménez Salas, J. A. y otros: *Geotecnia y cimientos* (volúmenes I a III), editorial Rueda.
- Johnson, S. M. y Kavanagh, T. G. (1968): *The Design of Foundations for Buildings*, McGraw-Hill.
- Meyerhof, G. G. y Ghosh, D. P. (1989): «Ultimate Capacity of Flexible Piles under Eccentric and Inclined Loads», *Canadian Geotechnical Journal*, 26.
- Mezazigh, S. et al. (1998): «Experimental Study of the Slope Effect on the P-y Reaction Curves of Laterally Loaded Piles», *Revue française de Geotechnique*, n.º 82.
- Ministère de l'Équipement des Transports et du Tourisme (Francia) (1999): *Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil*, fascicule n.º 62.
- Ministère de l'Urbanisme du Logement et des Transports. Direction des Routes (Francia) (1986): *Les micropieux*.
- Ministerio de Fomento (2003): *Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-03)*, Real Decreto 1797/2003 de 26 de diciembre (*BOE* del 16 de enero de 2004) por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos, RC-03.
- Ministerio de Fomento (1998): *Instrucción de Hormigón Estructural¹ (EHE)*, Real Decreto 2661/1998 de 11 de diciembre (*BOE* del 13 de enero de 1999), por el que se aprueba la Instrucción de hormigón estructural, EHE. Modificado por Real Decreto 966/1999 de 11 de junio (*BOE* del 24 de junio).
- Sociedad española de mecánica del suelo e ingeniería geotécnica (SEMSIG) y Asociación de empresas de la tecnología del suelo y del subsuelo (AETESS) (2003): *Jornadas Técnicas SEMSIG - AETESS. 3.ª sesión: Micropilotes*.

¹ A los efectos de este Guía, todas las referencias al articulado de la misma son relativas a dicho texto, vigente en el momento de su publicación.

Tanzani, M. (2004): *Micropali e pali di piccolo diámetro. Aspetti progettuali e tecnologici*, Dario Flaccovio Editore.

US Department of Transportation. Federal Highway Administration (Estados Unidos de América) (2000): *FHWA-SA-97-070. Micropile Design and Construction Guidelines. Implementation Manual*.

US Department of Transportation. Federal Highway Administration (Estados Unidos de América) (1997). *FHWA-RD-96-016/019. Drilled and Grouted Micropile; State of the Practice Review*.

