

CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DE PILOTES CON EL EUROCÓDIGO 7 (UNE-EN 1997-1)

<https://doi.org/10.33586/nt.2023.01>

GRUPO DE TRABAJO EUROCÓDIGOS



Aunque la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE) ha hecho un gran esfuerzo por asegurar que toda la información contenida en este documento es correcta y precisa, ACHE, sus miembros y sus trabajadores no aceptan responsabilidad alguna por daños y/o perjuicios de cualquier clase que pudiera originar el uso y aplicación del contenido de esta publicación. Las publicaciones de ACHE están redactadas para ser utilizadas por técnicos con capacidad para evaluar su contenido y por tanto cada lector asume la responsabilidad del uso de la información incluida en el presente documento. Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse o distribuirse de ninguna forma, ni por ningún medio sin la previa autorización por escrito de ACHE.

Edita: ACHE (Asociación Española de Ingeniería Estructural)

Edición n.º 1: julio de 2023

Grupo de trabajo Ad-Hoc

Eurocódigos

Coordinador: Miguel Ortega Cornejo

IDEAM, UPM

Secretaria: Maria João dos Santos Freitas

IDEAM

Miembros: Francisco Arriaga

UPM

Amadeo Benavent

UPM

José Estaire

CEDEX

José María Goicolea

UPM

Juan Luis Mansilla

IDEAM

Alejandro Pérez Caldentey

FHECOR INGENIEROS CONSULTORES, UPM

Jesús Rodríguez Santiago

UPM

Alejandra Sánchez

SEG Ingeniería

Álvaro Serrano

MC2 ESTUDIO DE INGENIERÍA, UPM

José Simón-Talero

TORROJA INGENIERÍA, UPM

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	Tratamiento de los pilotes en el Eurocódigo 7 (UNE-EN 1997-1).....	5
CAPÍTULO 2	Estado Límite Último GEO de capacidad portante del pilote	6
2.1.	Valores de los coeficientes parciales de la resistencia por punta y por fuste del Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1.....	8
CAPÍTULO 3	Estado Límite Último STR de rotura estructural de un pilote trabajando exclusivamente a compresión.....	13
CAPÍTULO 4	NCCI incluida en el Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1	20

CAPÍTULO 1 Tratamiento de los pilotes en el Eurocódigo 7 (UNE-EN 1997-1)

Aplicando el método de los estados límite, el Eurocódigo 7 parte 1 (UNE-EN 1997-1) define en su capítulo 7 los criterios para la verificación de los pilotes:

- Los diferentes **Estados Límite Últimos GEO** que debe **satisfacer un pilote aislado** según UNE-EN 1997-1 son los siguientes:
 - Estado Límite Último GEO de capacidad portante, o resistencia última frente al hundimiento, según su apartado 7.6.2;
 - Estado Límite Último GEO de arranque por tracción, según su apartado 7.6.3 (en el caso de pilotes traccionados);
 - Estado Límite Último GEO de rotura horizontal, según su apartado 7.7 (en el caso de que existan fuerzas horizontales).

- Adicionalmente se deben verificar los **Estados Límite Últimos STR de rotura estructural de acuerdo con lo indicado en el Eurocódigo 2** (UNE-EN 1992) en el caso de pilotes de hormigón, o **con el Eurocódigo 3** (UNE-EN 1993) en el caso de pilotes metálicos, según indican los apartados 2.4.6.4 y 7.8 de la UNE-EN 1997-1. Estas son las habituales verificaciones estructurales resistentes de ELU para esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores de cálculo, que, en pilotes de hormigón, se utilizan para armar el pilote.

- Los diferentes **Estados Límite de Servicio** que le sean de aplicación:
 - En el caso de pilotes cargados verticalmente, se debe controlar, en servicio, el desplazamiento vertical de la cimentación pilotada según el apartado 7.6.4.

Por lo tanto, **el antiguo concepto de “tope estructural”**, tal y como se entendía tradicionalmente en España hasta hace unos años, limitando la tensión de compresión de trabajo del pilote en ELS **no aparece como tal en las verificaciones de los**

Eurocódigos Estructurales.

CAPÍTULO 2 Estado Límite Último GEO de capacidad portante del pilote

Pensando en un pilote aislado sometido exclusivamente a carga centrada, se deberá realizar una verificación geotécnica relacionada con la actuación de los esfuerzos axiales de compresión: se deberá garantizar que, en ELU, el axil de cálculo solicitante es menor que la resistencia de cálculo del terreno a compresión.

$$F_{c;d} \leq R_{c;d} \quad (1)$$

(ec. 7.1 de UNE-EN 1997-1)

Donde:

$F_{c;d}$ es el valor de cálculo (en ELU) del axil solicitante en el pilote;

$R_{c;d}$ es el valor de cálculo de la resistencia a compresión del terreno solicitado por el pilote.

Esta verificación es idéntica a la que estábamos habituados a aplicar, tradicionalmente, en España, con la salvedad de que, previo al Eurocódigo 7 (UNE-EN 1997-1), esta verificación se hacía con acciones sin mayorar y con coeficientes globales de la resistencia (por punta y por fuste), por supuesto, diferentes a los que establece ahora UNE-EN 1997-1, que realiza la verificación en ELU.

El valor de $R_{c;d}$ se puede obtener, según la cláusula 7.6.2.2(14)P de la UNE-EN 1997-1, bien como:

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} \quad (2)$$

(ec. 7.4 de UNE-EN 1997-1)

o como

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} \quad (3) \quad (\text{ec. 7.5 de UNE-EN 1997-1})$$

con

$$R_{c;k} = R_{b;k} + R_{s;k} \quad (4) \quad (\text{ec. 7.3 de UNE-EN 1997-1})$$

y siendo:

$R_{c;k}$ valor característico de la resistencia a compresión del terreno, suma de la resistencia característica por punta ($R_{b;k}$) más la resistencia característica por fuste ($R_{s;k}$);

γ_t coeficiente parcial de la resistencia total del pilote;

$R_{b;k}$ valor característico de la resistencia por punta;

γ_b coeficiente parcial para la resistencia por punta del pilote;

$R_{s;k}$ valor característico de la resistencia por fuste;

γ_s coeficiente parcial para la resistencia por fuste del pilote.

La ecuación 7.5 de UNE-EN 1997-1 es formalmente idéntica a la que se empleaba tradicionalmente en España; esto implica que la determinación de los valores característicos de la resistencia por punta y por fuste puede hacerse mediante los métodos de cálculos usuales (por ejemplo, los basados en el SPT, el presiómetro, el penetrómetro estático, o los parámetros resistentes del modelo de Mohr-Coulomb). La única diferencia está en los valores de los coeficientes parciales de resistencia por punta y por fuste, dado que UNE-EN 1997-1 realiza esta verificación en Estado Límite Último, es decir, se comprueba la resistencia de cálculo comparándola con las

acciones previamente ponderadas por los coeficientes parciales de las acciones.

Los coeficientes parciales para la resistencia de los pilotes deberán corregirse mediante un coeficiente de modelo, $\gamma_{R,d}$, para asegurar que la capacidad portante prevista es suficientemente segura (véase el apartado 2.1 de este documento).

En resumen:

La verificación ELU-GEO de la capacidad portante de un pilote (ec. 7.1 de UNE-EN 1997-1), equivale a la verificación tradicional que se venía realizando en España (en ELS), con la diferencia de que la verificación de UNE-EN 1997-1 se debe realizar en ELU frente a acciones mayoradas, y que los coeficientes parciales de la resistencia por punta y por fuste serán diferentes de los empleados tradicionalmente, es decir, antes del empleo de UNE-EN 1997-1.

Como es normal, el Anejo Nacional español de UNE-EN 1997-1, encargado de definir los parámetros de determinación nacionales (NDPs), ha definido los coeficientes parciales de forma que la seguridad global obtenida con la aplicación de UNE-EN 1997-1 sea equivalente a la obtenida con los métodos que tradicionalmente se aplicaban en España para el dimensionamiento geotécnico de un pilote.

De esta manera, un pilote no tiene limitada su capacidad de carga más que por lo que admite el terreno (ELU-GEO de hundimiento), con el límite de la capacidad estructural, ELU-STR, del pilote que se describe en capítulo 3.

2.1. Valores de los coeficientes parciales de la resistencia por punta y por fuste del Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1

Los coeficientes parciales para la resistencia total, por punta y por fuste de un pilote a emplear en España se definen en las tablas A.6, A.7 y A.8 del apartado A.3.3.2 del Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1, incluidas a continuación. Los coeficientes

parciales recogidos en dichas tablas corresponden al conjunto R2 puesto que, tal como se indica en el apartado 2.4.7.3.4.1(1)P del Anejo Nacional, el enfoque a utilizar en España para la comprobación de los Estados Límite Último de tipo estructural y geotécnico (ELU-STR y ELU-GEO, respectivamente) debe ser el Enfoque de Proyecto 2 (salvo para la comprobación del Estado Límite Último de estabilidad global, en el que se debe utilizar el Enfoque de Proyecto 3).

2.4.7.3.4.1(P): Enfoques de proyecto a utilizar para la comprobación de los estados límite último de tipo estructural (STR) y geotécnico (GEO)

El enfoque de proyecto a utilizar para la comprobación de los estados límite último de tipo estructural (STR) y geotécnico (GEO) debe ser el Enfoque de Proyecto 2, excepto para la comprobación del estado límite último de estabilidad global de las distintas actuaciones geotécnicas en los que se debe utilizar el Enfoque de Proyecto 3.

Figura 1 Enfoques de Proyecto a emplear en España

$$\text{Enfoque de Proyecto 2} - \text{Combinación: } A_1 + M_1 + R_2 \quad (5)$$

Tabla 1 Coeficientes parciales de resistencia (γ_R) para pilotes hincados, Conjunto R2 (Tabla A.6 del Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1)

Resistencia	Símbolo	Valor	
		Estructuras de edificación	Otras estructuras
Punta	γ_b	1,55 ¹	1,25 ¹
Fuste (pilotes a compresión)	γ_s	1,55 ¹	1,05 ¹
Total/combinada (pilotes a compresión)	γ_t	1,40 ²	1,15 ²
Fuste (pilotes a tracción) ³	$\gamma_{s,t}$	1,80 ⁴	1,05 ⁴

¹ Aplicable junto con el coeficiente de modelo definido en el punto 7.6.2.3(8).
² Aplicable, según los casos, junto con el coeficiente de modelo definido en el punto 7.6.2.3(8) o con los coeficientes de correlación (ξ) definidos en las tablas A.9, A.10 y A.11.
³ Se entiende que este coeficiente se aplica a la resistencia por fuste en pilotes a tracción (de acuerdo a la práctica habitual, esta resistencia es menor que la resistencia por fuste a compresión).

ACHE. Grupo de trabajo Ad-Hoc Eurocódigos. NOTA TÉCNICA 01: Criterios para el cálculo de pilotes con el Eurocódigo 7 (UNE-EN 1997-1)

Resistencia	Símbolo	Valor	
		Estructuras de edificación	Otras estructuras
⁴ Aplicable junto con el coeficiente de modelo definido en el punto 7.6.3.3(6).			

Tabla 2 Coeficientes parciales de resistencia (γ_R) para pilotes perforados, Conjunto R2 (Tabla A.7 del Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1)

Resistencia	Símbolo	Valor	
		Estructuras de edificación	Otras estructuras
Punta	γ_b	1,55 ¹	1,35 ¹
Fuste (pilotes a compresión)	γ_s	1,55 ¹	1,10 ¹
Total/combinada (pilotes a compresión)	γ_t	1,40 ²	1,25 ²
Fuste (pilotes a tracción) ³	$\gamma_{s,t}$	1,80 ⁴	1,10 ⁴

¹ Aplicable junto con el coeficiente de modelo definido en el punto 7.6.2.3(8).
² Aplicable, según los casos, junto con el coeficiente de modelo definido en el punto 7.6.2.3(8) o con los coeficientes de correlación (ξ) definidos en las tablas A.9, A.10 y A.11.
³ Se entiende que este coeficiente se aplica a la resistencia por fuste en pilotes a tracción (de acuerdo a la práctica habitual, esta resistencia es menor que la resistencia por fuste a compresión).
⁴ Aplicable junto con el coeficiente de modelo definido en el punto 7.6.3.3(6).

Tabla 3 Coeficientes parciales de resistencia (γ_R) para pilotes de barrena continua, CFA, Conjunto R2 (Tabla A.8 del Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1)

Resistencia	Símbolo	Valor	
		Estructuras de edificación	Otras estructuras
Punta	γ_b	1,55 ¹	1,45 ¹

Resistencia	Símbolo	Valor	
		Estructuras de edificación	Otras estructuras
Fuste (pilotes a compresión)	γ_s	1,55 ¹	1,15 ¹
Total/combinada (pilotes a compresión)	γ_t	1,40 ²	1,30 ²
Fuste (pilotes a tracción) ³	$\gamma_{s,t}$	1,80 ⁴	1,15 ⁴

¹ Aplicable junto con el coeficiente de modelo definido en el punto 7.6.2.3(8).
² Aplicable, según los casos, junto con el coeficiente de modelo definido en el punto 7.6.2.3(8) o con los coeficientes de correlación (ξ) definidos en las tablas A.9, A.10 y A.11.
³ Se entiende que este coeficiente se aplica a la resistencia por fuste en pilotes a tracción (de acuerdo a la práctica habitual, esta resistencia es menor que la resistencia por fuste a compresión).
⁴ Aplicable junto con el coeficiente de modelo definido en el punto 7.6.3.3(6).

Los coeficientes parciales para la resistencia de los pilotes deberán corregirse mediante un coeficiente de modelo, $\gamma_{R;d}$, para asegurar que la capacidad portante prevista es suficientemente segura. Para la obtención de la resistencia a compresión (punta, fuste y total/combinada), el Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1 define, en su apartado 7.6.2.3(8), un coeficiente de modelo de valor 1,4. Para la obtención de la resistencia a tracción (fuste), el Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1 define, en su apartado 7.6.3.3(6), un coeficiente de modelo de valor también 1,4.

Y, por lo tanto, el valor de la resistencia a compresión del terreno ELU-GEO se puede obtener como:

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b \cdot \gamma_{R;d}} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s \cdot \gamma_{R;d}} \quad (7)$$

o

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t \cdot \gamma_{R;d}} \quad (8)$$

CAPÍTULO 3 Estado Límite Último STR de rotura estructural de un pilote trabajando exclusivamente a compresión

Si bien es cierto que, en general, los pilotes estarán sometidos a esfuerzos axiales de compresión (y, en algún caso, a tracciones), normalmente también están sometidos a fuerzas horizontales, que producirán cortantes y momentos flectores.

Tal y como establecen los apartados 2.4.6.4 y 7.8 de UNE-EN 1997-1, las verificaciones estructurales ELU-STR de un pilote de hormigón se deben realizar de acuerdo con el Eurocódigo 2 (UNE-EN 1992-1-1).

UNE-EN 1997-1 establece, además, en su cláusula 7.8(5), que ***“normalmente no es necesario comprobar los pilotes a pandeo cuando se encuentran confinados en suelos con una resistencia a cortante c_u representativa mayor de 10kPa”***.

En un caso así, con un pilote de hormigón sometido exclusivamente a cargas axiales y pandeo no condicionante, según UNE-EN 1997-1 y UNE-EN 1992-1-1, la única verificación estructural ELU-STR a realizar sería la siguiente:

$$E_d \leq R_d \quad (9)$$

(ec. 2.5 de UNE-EN 1997-1)

Es decir, en ELU, los valores de cálculo de los efectos de las acciones (E_d) deben ser menores o iguales que las correspondientes resistencias de cálculo (R_d), lo cual expresado en términos de esfuerzos axiales de compresión sería:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (10)$$

Donde:

N_{Ed} es el valor de cálculo del axil producido por las acciones exteriores (en ELU);

N_{Rd} es el valor de cálculo del axil resistido por la sección del pilote de hormigón armado.

Según el capítulo 6 del Eurocódigo 2 (UNE-EN 1992-1-1) y considerando, además, el apartado 2.4.2.5 de la misma norma (que tiene en cuenta un coeficiente reductor adicional k_f de la capacidad última de compresión del pilote) el valor de N_{Rd} será:

$$N_{Rd} = A_s f_{yd} + A_c f_{cd} \quad (11)$$

Siendo:

A_s área de acero pasivo;

f_{yd} límite elástico de cálculo del acero pasivo, de valor: $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$

con:

f_{yk} límite elástico característico del acero pasivo (por ejemplo, de valor 500 MPa para un acero B-500);

γ_s coeficiente parcial de seguridad del acero pasivo.

A_c área de hormigón;

f_{cd} valor de cálculo de la resistencia a compresión del hormigón, obtenida según el apartado 3.1.6 de UNE-EN 1992-1-1 de valor:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c \cdot k_f} \quad (12)$$

con:

α_{cc} coeficiente que tiene en cuenta los efectos a largo plazo en la resistencia

a compresión del hormigón y los efectos desfavorables que resultan de la manera en que se aplica la carga. El Anejo Nacional de UNE-EN 1992-1-1 lo define con valor $\alpha_{cc}=1,00$. El valor definido por el Anejo Nacional coincide con el valor recomendado por UNE-EN 1992-1-1.

f_{ck} valor característico de la resistencia a compresión del hormigón

γ_c coeficiente parcial de seguridad del hormigón

k_f (apartado 2.4.2.5 de UNE-EN 1992-1-1) es un coeficiente que multiplica el coeficiente parcial de seguridad del hormigón para la obtención de la resistencia de pilotes hormigonados in situ sin encamisado permanente. Si bien el valor recomendado por UNE-EN 1992-1-1 es de $k_f=1,10$, el Anejo Nacional español adopta $k_f=1,25$, que es el valor a emplear en España.

2.4.2.5 Coeficientes parciales de seguridad para los materiales para cimentaciones

- (1) Los valores de cálculo de las propiedades de resistencia del suelo se deberían calcular conforme a la Norma EN 1997.
- (2) El coeficiente parcial de seguridad para el hormigón γ_c dado en el punto (1) del apartado 2.4.2.4 se debería multiplicar por un coeficiente k_f para el cálculo de la resistencia de pilotes hormigonados *in situ* sin encamisado permanente.

NOTA El valor de k_f para su uso en un Estado se puede encontrar en su anexo nacional. El valor recomendado es 1,1.

Figura 2 Valor recomendado de k_f (apartado 2.4.2.5 de UNE-EN 1992-1-1)

2.4.2.5 (2) Coeficiente que multiplica al coeficiente parcial de ponderación del hormigón en la comprobación de pilotes hormigonados in situ sin encamisado permanente

Se adopta el valor recomendado del coeficiente k_f que multiplica al coeficiente parcial de ponderación del hormigón γ_c en la comprobación de pilotes hormigonados in situ sin encamisado permanente, $k_f = 1,25$.

Figura 3 Valor de k_f a emplear en España (apartado 2.4.2.5 del Anejo Nacional de UNE-EN 1992-1-1)

El coeficiente k_f no se deberá emplear en el caso de pilotes con camisa perdida, o que los pilotes no se hormigonen in situ.

El coeficiente k_f pretende reducir, por tanto, la capacidad estructural de compresión del hormigón en pilotes in situ ejecutados con condiciones menos favorables.

Los valores recomendados para los coeficientes parciales γ_c y γ_s se recogen en el apartado 2.4.2.4 de la UNE-EN 1992-1-1.

2.4.2.4 Coeficientes parciales de seguridad para los materiales

(1) Se deberían usar coeficientes parciales de seguridad para los materiales, γ_c y γ_s , para los estados límite últimos.

NOTA Los valores de γ_c y γ_s para su uso en un Estado se pueden encontrar en su anexo nacional. Los valores recomendados para las situaciones "persistente", "transitoria" y "accidental" se indican en la tabla 2.1N. Éstos no son válidos para cálculos de resistencia al fuego, para los cuales se debería hacer referencia a la Norma EN 1992-1-2.

Para la comprobación de fatiga se recomiendan los coeficientes parciales de seguridad $\gamma_{c, fat}$ y $\gamma_{s, fat}$ para las situaciones de proyecto persistentes, indicadas en la tabla 2.1N.

Tabla 2.1N – Coeficientes parciales de seguridad para materiales para estados límite últimos

Situaciones de proyecto	γ_c para hormigón	γ_s para acero de armadura pasiva	γ_s para acero de armadura activa
Persistente y transitoria	1,5	1,15	1,15
Accidental	1,2	1,0	1,0

(2) Los valores de los coeficientes parciales de seguridad de los materiales para la comprobación de los estados límite de servicio deberían ser los indicados en los apartados pertinentes de este Eurocódigo.

NOTA Los valores de γ_c y γ_s en el estado límite de servicio para su uso en un Estado se pueden encontrar en su anexo nacional. El valor recomendado para situaciones no cubiertas por apartados particulares de este Eurocódigo es de 1,0.

(3) Se pueden usar valores menores de γ_c y γ_s si se justifican medidas que reduzcan la incertidumbre en la resistencia calculada.

NOTA Se aporta información en el anexo (informativo) A.

Figura 4 Apartado 2.4.2.4 de UNE-EN 1992-1-1

No obstante, el Anejo Nacional español define los siguientes valores (**a emplear en España**):

Tabla 4 Coeficientes parciales para la ponderación de los materiales en la comprobación de los Estados Límite Últimos a emplear en España (Tabla AN/1 (Tabla 2.1N) del Anejo Nacional de UNE-EN 1992-1-1)

Situaciones de proyecto	γ_c , hormigón	γ_s , armadura pasiva	γ_s , armadura activa
Persistente o transitoria	1,5	1,15	1,15
Accidental	1,3	1,0	1,0

Para las comprobaciones relativas al Estado Límite de Fatiga, el Anejo Nacional de UNE-EN 1992-1-1 indica que se adoptan los valores de los coeficientes parciales indicados en la Tabla AN/1 para los Estados Límites Últimos (Tabla 4 de este documento). También según el Anejo Nacional, los coeficientes parciales para la ponderación de los materiales en la comprobación de los Estados Límite Últimos indicados en su Tabla AN/1 pueden reducirse de acuerdo con los criterios indicados en su apartado AN.4.3.

Además, para la consideración del área comprimida de hormigón, sería necesario considerar el apartado 2.3.4.2 de UNE-EN 1992-1-1, que limita la sección eficaz de los pilotes ejecutados *in situ* sin encamisado permanente.

2.3.4.2 Requisitos adicionales para hormigonado de pilotes «*in situ*»

(1)P Se deben tener en cuenta en el proyecto las incertidumbres relacionadas con la sección transversal de hormigonado de pilotes *in situ* y los procedimientos de hormigonado.

(2) En ausencia de otras disposiciones, el diámetro a emplear en los cálculos del proyecto de pilotes hormigonados *in situ* sin encamisado permanente debería ser:

– si $d_{\text{nom}} < 400$ mm $d = d_{\text{nom}} - 20$ mm

– si $400 \leq d_{\text{nom}} \leq 1\,000$ mm $d = 0,95 \cdot d_{\text{nom}}$

– si $d_{\text{nom}} > 1\,000$ mm $d = d_{\text{nom}} - 50$ mm

dónde d_{nom} es el diámetro nominal de los pilotes.

Figura 5 Apartado 2.3.4.2 de UNE-EN 1992-1-1

En los casos habituales de puentes, con pilotes de gran diámetro (mayor de 1,00 m), el diámetro nominal para el cálculo se debe reducir en 50 milímetros.

Estas dos últimas limitaciones, el coeficiente reductor k_f y la reducción del diámetro efectivo del pilote, son las dos únicas limitaciones/reducciones del Eurocódigo a la capacidad última a compresión de un pilote (ELU-STR).

En relación con las cuantías mínimas geométricas de armadura a considerar en un

pilote, la UNE-EN 1992-1-1 establece en su apartado 9.8.5 los siguientes valores mínimos:

9.8.5 Pilotes perforados

(1) Los apartados siguientes se aplican a pilotes perforados armados. Para pilotes perforados no armados véase el capítulo 12.

(2) Con el fin de permitir el libre flujo del hormigón alrededor de la armadura es prioritario que la armadura, las jaulas de armadura y cualquier inserto anexo se dispongan de manera que no se vea afectado desfavorablemente el flujo del hormigón.

(3) En pilotes perforados se debería disponer una armadura longitudinal mínima de área $A_{s,bpmin}$ en relación con la sección transversal del pilote A_c .

NOTA Los valores de $A_{s,bpmin}$ y el A_c asociado, para su uso en un Estado se puede encontrar en su anexo nacional. Los valores recomendados indican en la tabla 9.6N. Esta armadura se debería distribuir a lo largo del contorno de la sección.

Tabla 9.6N – Área de la armadura longitudinal mínima recomendada en pilotes perforados hormigonados *in situ*

Sección transversal del pilote: A_c	Área de armadura mínima longitudinal $A_{s,bpmin}$
$A_c \leq 0,5 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,005 \cdot A_c$
$0,5 \text{ m}^2 < A_c \leq 1,0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 25 \text{ cm}^2$
$A_c > 1,0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,0025 \cdot A_c$

El diámetro mínimo para las barras longitudinales no debería ser menor que 16 mm. Los pilotes deberían tener al menos 6 barras longitudinales. La distancia libre entre barras no debería superar 200 mm medida a lo largo del contorno del pilote.

(4) Para el detalle constructivo de las armaduras longitudinales y transversales en pilotes perforados, véase la Norma EN 1536.

Figura 6 Apartado 9.8.5 de UNE-EN 1992-1-1

No obstante, la Tabla 9.6N de UNE-EN 1992-1-1 es un parámetro nacional, y el Anejo Nacional sustituye esta tabla por los siguientes valores (a emplear en España):

“Para la cuantía de armadura mínima a disponer en su caso, se adopta:

$$A_{s,bpmin} = 0,1 \frac{A_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \quad (13)$$

Se adopta el valor $\phi_{min}=12 \text{ mm}$.

Para la separación entre armaduras, se adoptan los siguientes criterios adicionales recomendados:

- *un valor de separación máxima de 200 mm medido sobre el contorno del pilote,*

y

- *deben disponerse al menos 6 barras longitudinales.*”

La armadura mínima $A_{s,bpmin} > 0,10 \cdot A_c \cdot f_{cd}/f_{yd}$ para un hormigón C25/30 y una armadura pasiva B-500, equivale a $A_{s,bpmin} > 0,00383 A_c$.

Si bien el Eurocódigo 2 no define nada adicional para el caso de pilotes, para el caso de **pilares**, la cláusula 9.5.2(2) del Anejo Nacional de UNE-EN 1992-1-1 indica que cuando se trate de secciones sometidas a compresión simple armadas simétricamente, además de la cuantía mínima deberá cumplirse esta verificación de cuantía mínima geométrica¹:

$$A_{s,min} = 0,004A_c \quad (14)$$

¹ Parece haber una errata en la fórmula incluida en el Anejo Nacional de UNE-EN 1992-1-1, que la define, por error, como $A_{s,min}=0,004A_c f_{yd}$. La condición adicional que un pilar a compresión debe cumplir es la de una cuantía mínima de armadura igual al 4‰ referida a la sección total de hormigón, por lo que la fórmula correcta sería $A_{s,min} = 0,004A_c$.

CAPÍTULO 4 NCCI incluida en el Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1

El Anejo Nacional de UNE-EN 1997-1 incluye, en su apartado AN.4.1, la siguiente *Información Complementaria No Contradictoria (NCCI)*² con el texto del propio Eurocódigo relativa al cálculo estructural de los pilotes hormigonados *in situ*, sin entubación permanente:

“AN.4.1.1 Normativa a aplicar

El proyecto, la ejecución, la supervisión y el control de los pilotes se deben hacer de acuerdo a las normas siguientes:

- *UNE-EN 1536 para el proyecto, la ejecución, la supervisión y el control de los pilotes*
- *UNE-EN 1992-1-1 y UNE-EN 1992-2 para determinar el valor de cálculo de la resistencia a compresión del hormigón utilizado en pilotes en edificación y puentes, respectivamente.*
- *UNE-EN 1997 para realizar el proyecto geotécnico de los pilotes*

AN.4.1.2 Valor de cálculo de la resistencia a compresión del hormigón

*El valor de cálculo de la resistencia a compresión del hormigón (f_{cd}) que se debe utilizar en la verificación de los estados límite últimos de rotura estructural (STR) de los pilotes hormigonados *in situ* sin entubación permanente, se debe determinar de acuerdo con los apartados 3.1.6, 2.4.2.4 y 2.4.2.5 de la Norma UNE-EN 1992-1-1, para edificación, y los mismos apartados de la Norma UNE-EN 1992-2, para puentes, mediante la siguiente expresión:*

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c \cdot k_f} f_{ck} \quad (15)$$

² La sigla NCCI corresponde a la traducción en inglés *Non-Contradictory Complementary Information*

donde:

α_{cc} coeficiente que tiene en cuenta los efectos a largo plazo en la resistencia a compresión del hormigón y los efectos desfavorables de la manera en que se aplica la carga, cuyo valor se indica en el apartado 3.1.6 del anexo nacional de las Normas UNE-EN 1992-1-1 y UNE-EN 1992-2

f_{ck} valor característico de la resistencia a compresión del hormigón. Para su consideración en la comprobación de los estados límite últimos de rotura estructural (STR) en pilotes hormigonados in situ, se debe tomar siempre un valor menor o igual que 35 MPa

γ_c coeficiente parcial de resistencia del hormigón, según el apartado 2.4.2.4 del anexo nacional de la Norma UNE-EN 1992-1-1

k_f coeficiente que multiplica al coeficiente parcial de seguridad de hormigón para la obtención de la resistencia de pilotes hormigonados in situ sin encamisado permanente (apartado 2.4.2.5 de la Norma UNE-EN 1992-1-1). El valor de k_f será el indicado en el anexo nacional a la Norma UNE-EN 1992-1-1.

AN.4.1.3 Valor de cálculo del diámetro del pilote

En la comprobación de los estados límite últimos de rotura estructural (STR) de los pilotes hormigonados in situ, sin entubación permanente, el valor de cálculo del diámetro del pilote (d_d) se debe determinar de acuerdo con las expresiones recogidas en el punto 2.3.4.2 (2) de la Norma UNE EN 1992-1. El valor de cálculo de la sección transversal del pilote se debe obtener a partir del valor de cálculo del diámetro del pilote.

En la comprobación de los estados límite últimos tipo GEO, el valor de cálculo del diámetro del pilote puede tomarse igual a su valor nominal.

AN.4.1.4 Notas aclaratorias

- a) *El valor de cálculo de la resistencia a compresión del hormigón (f_{cd}), anteriormente indicado, no es equivalente al valor del “tope estructural”, comúnmente utilizado en España.*
- b) *El valor del tope estructural se puede equiparar, teniendo en cuenta las bases de cálculo del Eurocódigo 7, al límite que se puede imponer a la “tensión media de compresión que actúa sobre la sección nominal del pilote para la combinación casi-permanente de acciones”, lo que representa una verificación en estado límite de servicio.*

De acuerdo con la Norma UNE-EN 1990 (ecuación 6.16 b), la hipótesis casi-permanente de acciones se define mediante la siguiente expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (16)$$

$G_{k,j}$ *valor característico de cada acción permanente j ;*

P *valor representativo pertinente de la acción del pretensado;*

$Q_{k,j}$ *valor casi-permanente de cada acción variable j ;*

$\psi_{2,j}$ *factor de simultaneidad de cada acción variable j . Su valor es el indicado en el anexo nacional de la Norma UNE-EN 1990.*

- c) *Queda al criterio del ingeniero proyectista la posible limitación de dicha “tensión media de compresión que actúa sobre la sección del pilote para la combinación casi-permanente de acciones”. Dicha posible limitación debería hacerse teniendo en cuenta fundamentalmente el diámetro y tipo del pilote y el tipo de terreno en el que se excava, aunque también se debe considerar la intensidad del control de la integridad de los pilotes y el número de pilotes*

por encepado.

d) Los valores recomendados, según la práctica geotécnica habitual española, para el límite superior de dicha “tensión media de compresión que actúa sobre la sección del pilote para la combinación casi-permanente de acciones ($\sigma_{c,m}$)”, equiparable al denominado “tope estructural”, se recogen en las tablas siguientes.

Tabla 5 Tabla AN.1 – Valores usuales de la tensión media de compresión que actúa sobre la sección del pilote para la combinación casi-permanente de acciones (para estructuras de edificación)

Tipo de pilote	$\sigma_{c,m}$ (MPa)	
	Tipo de apoyo	
	Suelo firme	Roca
Entubados	5,0	6,0
Ejecutado con lodos	4,0	5,0
Ejecutado en seco	4,0	5,0
Barrenado sin control de parámetros	3,5	–
Barrenado con control de parámetros	4,0	–

Tabla 6 Tabla AN.2 – Valores usuales de la tensión media de compresión que actúa sobre la sección del pilote para la combinación casi-permanente de acciones (para otras estructuras)

Tipo de pilote ^{1) 2)}	$\sigma_{c,m}$ (MPa)
Ejecutado con entubación recuperable ³⁾	6,0
Ejecutado con lodos ³⁾ Ejecutado en seco ³⁾	5,0
Barrenado con control de parámetros	4,5

Tipo de pilote ^{1) 2)}	$\sigma_{c,m}$ (MPa)
Barrenado sin control de parámetros	4,0

¹⁾ En los pilotes de diámetro inferior a 60 cm, $\sigma_{c,m}$ se suele limitar a 4,0 MPa.
²⁾ En los pilotes de diámetro igual o inferior a 80 cm o aquellos que estén en encepados formados por uno o dos pilotes, $\sigma_{c,m}$ se suele limitar a 5,0 MPa.
³⁾ Cuando estén dispuestos en encepados de 6 pilotes o más, $\sigma_{c,m}$ se puede aumentar en un 25%.

De forma complementaria, los valores usuales en la práctica geotécnica habitual española de dicha “tensión media de compresión que actúa sobre la sección del pilote para la combinación casi-permanente de acciones ($\sigma_{c,m}$)”, para pilotes hincados y metálicos, se indican en las siguientes expresiones:

- Pilotes de hormigón armado: $\sigma_{c,m} = 0,3 f_{ck}$
- Pilotes de hormigón pretensado: $\sigma_{c,m} = 0,3 (f_{ck} - 0,9 f_p)$
- Pilotes metálicos: $\sigma_{c,m} = 0,33 f_{yk}$

Siendo f_{ck} el valor característico de la resistencia a compresión del hormigón, f_p la compresión nominal provocada por las armaduras activas y f_{yk} el límite elástico del acero.”

