

Anejo Nacional Español del Eurocódigo 7

José Estaire¹, Fernando Pardo de Santayana y Áurea Perucho
Laboratorio de Geotecnia - CEDEX

Tema : Cimentaciones superficiales y profundas. Modelos de cálculo

RESUMEN

El objetivo principal de este texto es presentar los principales contenidos del Anejo Nacional Español al Eurocódigo EC-7, especialmente en lo que se refiere al Enfoque de Proyecto elegido y a los valores de los coeficientes parciales de seguridad. Primeramente se describe el marco normativo desarrollado en el EC-7, basado fundamentalmente en el método de los coeficientes parciales de seguridad, y se indica el contenido formal que debe tener dicho Anejo Nacional. Posteriormente, se presentan los trabajos llevados a cabo para la elección del Enfoque de Proyecto y de los valores de los coeficientes parciales de seguridad a aplicar en el dimensionamiento de las cimentaciones superficiales y por pilotes y en los cálculos de estabilidad de taludes y global.

Palabras clave: Eurocódigo, Anejo Nacional, Cimentaciones

1 INTRODUCCIÓN

Dentro del programa de los Eurocódigos, el Eurocódigo 7 (EC-7 en adelante) es el documento de referencia para la realización del dimensionamiento de los aspectos geotécnicos de los proyectos de ingeniería civil y edificación. Este Eurocódigo 7, denominado en su versión inglesa “*Geotechnical design*”, tiene dos partes: la Parte 1, titulada “*General rules*”, fue aprobada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) en Abril del año 2004 y la Parte 2, titulada “*Ground investigation and testing*”, fue aprobada en Enero del año 2007.

El organismo español de normalización (AENOR) emitió la versión en español de la Par-

te 1 del EC-7 como norma UNE, con la denominación UNE-EN-1997-1, en Octubre de 2010. La traducción de la parte 2 todavía no está finalizada.

A pesar de ello, actualmente el EC-7 no tiene rango de obligado cumplimiento hasta que el órgano competente de la Administración Central, muy posiblemente la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento, no lo incorpore al ordenamiento jurídico español mediante su publicación en el BOE.

Sin embargo, como requisito previo a dicha publicación, se debe haber finalizado la redacción del Anejo Nacional Español del EC-7, documento cuyo significado y alcance se analiza en un apartado posterior de este texto.

¹ José Estaire: Jose.Estaire@cedex.es ; Laboratorio de Geotecnia – CEDEX; c/ Alfonso XII nº3; 28014 Madrid

2 EUROCÓDIGO EC-7

2.1 Ideas básicas

El Eurocódigo EC-7 es el eurocódigo estructural dedicado a los aspectos geotécnicos de los proyectos de edificación o de ingeniería civil. Está dividido en 12 capítulos y 9 anejos, de los cuales únicamente el primero de los anejos es normativo.

El capítulo 2, denominado “*Bases del Proyecto Geotécnico*”, desarrolla el marco teórico con el que se debe proceder a realizar el análisis geotécnico.

Este análisis geotécnico parte de la definición, para cada actuación geotécnica incluida en el proyecto (por ejemplo, una cimentación superficial o profunda, una estructura de contención, etc.), de una serie de estados límite que no deben ser excedidos. El EC-7 permite que la verificación de estos estados límite se pueda realizar por alguno de los siguientes métodos:

- Utilización de cálculos.
- Adopción de medidas prescriptivas.
- Uso de modelos experimentales y ensayos de carga.
- Utilización de un modelo observacional.

Es claro y evidente que la utilización de cálculos es el método más extendido y al que se recurre lógicamente en la mayoría de los casos, dejando los otros tres métodos citados para los casos en los que la predicción del comportamiento geotécnico de la estructura es difícil de realizar. Por esta razón, este texto se centra únicamente en el proyecto geotécnico basado en cálculos.

El marco teórico que utiliza el EC-7 con el que se aborda el proyecto geotécnico mediante cálculos está basado en tres aspectos fundamentales:

- Definición de los “Estados límite” (últimos o de servicio) que deben cumplir las distintas actuaciones geotécnicas incluidas en los proyectos.
- Adopción del método de cálculo basado en coeficientes parciales de seguridad (γ) que afectan a:

- Acciones (γ_F) o efectos de las acciones (γ_E).
 - Materiales, referidos a los parámetros geotécnicos, (γ_M).
 - Resistencias del terreno (γ_R).
- Determinación de diferentes “Enfoques de Proyecto” (*Design Approach*, en su denominación inglesa). Estos enfoques de proyecto constituyen diferentes formas de cuantificar la incertidumbre en el cálculo de los estados límite mediante la distinta ponderación de los coeficientes parciales de seguridad indicados anteriormente, tal como se desarrollará en un apartado posterior de este texto.

A la vista de lo dicho anteriormente, se puede afirmar que la gran diferencia del marco teórico del EC-7 con respecto a la práctica geotécnica tradicional es la adopción del método de cálculo basado en coeficientes parciales de seguridad. Esta manera de cálculo es similar a la utilizada en el cálculo estructural, por lo que su adopción en el análisis de los aspectos geotécnicos hace que el proyecto de cualquier estructura pueda hacerse de manera integral y unificada.

2.2 Estados límite

La verificación de la seguridad en el EC-7 parte de la base de la definición de una serie de estados límite, que debe cumplir cada una de las actuaciones geotécnicas, englobados en dos tipos: Estados Límite Últimos (ELU) y Estados Límite de Servicio (ELS), los primeros enfocados a garantizar la seguridad frente a la rotura y los segundos a la funcionalidad de la estructura proyectada. Así por ejemplo, una cimentación superficial debe cumplir los estados límite últimos de hundimiento, deslizamiento, vuelco, estabilidad global y capacidad estructural y el estado límite de servicio en relación a los movimientos admisibles.

Con objeto de sistematizar los cálculos, el EC-7 clasifica los diferentes estados límite en los siguientes cinco tipos:

- Tipo EQU: implica la pérdida de equilibrio estático de la estructura, considerado como cuerpo rígido. En este tipo de estado límite la resistencia de los materiales estructurales y

del terreno no colabora en el equilibrio. Un ejemplo de este tipo es el vuelco rígido de un muro.

- Tipo STR: implica la rotura interna o una excesiva deformación de la estructura o de alguno de sus elementos, incluyendo las zapatas, pilotes o muros de sótano. La resistencia de los materiales tiene un papel primordial en este tipo de estados límite. Un ejemplo de este tipo de ELU es la rotura estructural de un elemento de cimentación.
- Tipo GEO: implica la rotura interna o una excesiva deformación del terreno. La resistencia del terreno tiene un papel preponderante. Un ejemplo de este tipo de ELU es el hundimiento de una cimentación superficial o profunda.
- Tipo UPL: implica la pérdida de equilibrio de la estructura debido a una elevación provocada por presiones de agua (efecto de subpresión) o cualquier otra acción vertical.
- Tipo HYD: implica un fallo ocasionado por la filtración de agua en el terreno. Ejemplos de este tipo de ELU son la inestabilidad hidráulica por sifonamiento y la erosión interna por tubificación, provocadas por gradientes hidráulicos elevados.

A la vista del listado anterior, es obvio que la gran mayoría de los estados límite que deben cumplir las actuaciones geotécnicas son, como su propio nombre indica del tipo GEO.

2.3 Enfoques de proyecto (Design Approach)

Con objeto de dar cabida a las diferentes maneras de abordar el dimensionamiento geotécnico existentes en los distintos países que han aceptado los Eurocódigos como marco de proyecto, el EC-7 define tres Enfoques de Proyecto distintos.

Estos Enfoques de Proyecto se diferencian básicamente en los parámetros a los que se aplican simultáneamente los coeficientes parciales de seguridad: acciones, materiales o resistencias, tal como se muestra simplídicamente en la Tabla 1.

Tabla 1. Uso de los coeficientes parciales de seguridad en los diferentes Enfoques de Proyecto

Enfoque de proyecto		Mayoración de acciones	Minoración parámetros geotécnicos	Minoración de resistencias
1	Comb. 1	X		
	Comb. 2		X	$X^{(a)}$
2		$X^{(b)}$		X
3		$X^{(b)}$	X	

Notas: ^(a) (sólo pilotes cargados axialmente y anclajes)
^(b) (o efectos de las acciones)

El análisis de esta tabla permite realizar las siguientes consideraciones:

- En el Enfoque de Proyecto 1 se deben realizar dos cálculos complementarios: en la Combinación 1 únicamente se mayoran las acciones, mientras que en la Combinación 2, las acciones se mantienen con su valor representativo y se minoran los parámetros geotécnicos y las resistencias.
- En el Enfoque de Proyecto 2 se mayoran las acciones (o los efectos de las acciones) y se minoran las resistencias, dejando sin minorar los valores de los parámetros geotécnicos.
- En el Enfoque de Proyecto 3 se mayoran las acciones (o los efectos de las acciones) y se minoran los valores de los parámetros geotécnicos.

Cada país debe definir, en un documento denominado “Anejo Nacional”, cuyo alcance se desarrolla en el siguiente apartado, el Enfoque de Proyecto a utilizar en su país basándose en lo que se considere más apropiado o más cercano a su método tradicional de dimensionamiento.

A este respecto, es importante destacar que se puede optar por un Enfoque de Proyecto diferente para cada una de las actuaciones geotécnicas (cimentaciones superficiales o profundas, pantallas, terraplenes, etc.).

2.4 Coeficientes parciales de seguridad

Como se ha indicado anteriormente los coeficientes parciales de seguridad (γ) afectan a las siguientes tres variables del proyecto geotécnico:

- Acciones (γ_F) o efectos de las acciones (γ_E).
- Materiales, referidos a los parámetros geotécnicos, (γ_M).
- Resistencias del terreno (γ_R).

En este contexto, se debe distinguir entre las acciones y el efecto de las acciones. Por ejemplo, en una estructura, como la esquematizada en la Figura 1, las acciones son las fuerzas aplicadas directamente sobre la estructura (como podrían ser, entre otras, las sobrecargas de uso y la carga de viento o nieve) mientras que el efecto de las acciones es el conjunto de acciones aplicadas sobre la cimentación (resultante de las fuerzas verticales, de las fuerzas horizontales y de los momentos, cuantificados en la base de la cimentación).

Por su parte, la resistencia del terreno se entiende que es la carga de hundimiento o la resistencia al deslizamiento del terreno, en función del estado límite que se esté analizando.

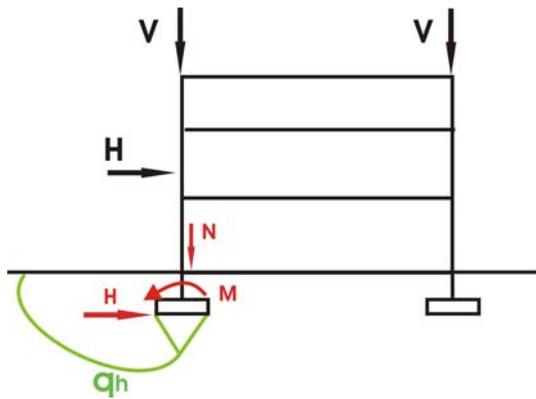


Figura 1: Esquema de una estructura con cimentación superficial

Los valores concretos de estos coeficientes parciales de seguridad se recogen, de manera orientativa, en el Anexo A del EC-7 aunque pueden ser modificados por cada país en su Anejo Nacional.

Un análisis pormenorizado de las tablas del Anexo A del EC-7 donde se recogen los valores de los diferentes coeficientes parciales de seguridad permite realizar las siguientes consideraciones:

- Los valores de los coeficientes de mayoración de acciones (γ_F) o de efectos de las acciones (γ_E) dependen del tipo de estado límite último que se esté considerando. En la Tabla 2 siguiente se recogen los valores de los coeficientes parciales de seguridad en función

del tipo de ELU y del carácter permanente/variable y desfavorable/favorable de la acción.

Tabla 2. Valores de los coeficientes parciales de mayoración de las acciones (γ_F) o de los efectos de las acciones (γ_E) recomendados en el EC-7

Acción o Efecto de acción	EQU	STR / GEO		UPL	HYD	
		A1	A2			
Perm.	Desfav.	1,10	1,35	1,00	1,00	1,35
	Favorable	0,90	1,00	1,00	0,90	0,90
Variable	Desfav.	1,50	1,50	1,30	1,50	1,50
	Favorable	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

- Es conveniente resaltar que una misma acción o efecto de acción puede tener consideración de favorable o de desfavorable en función del estado límite último que se esté analizando. Un ejemplo podría ser el axil aplicado por un pilar sobre una zapata: para el estado límite último de hundimiento es claramente desfavorable mientras que para el estado límite de deslizamiento es favorable.
- Cada parámetro geotécnico tiene su propio valor de coeficiente de minoración (γ_M). A este respecto sólo se distinguen los siguientes parámetros geotécnicos: ángulo de rozamiento, cohesión, resistencia al corte sin drenaje, resistencia a compresión simple y peso específico, tal como se indica en la Tabla 3, junto con los valores recomendados en el EC-7.

Tabla 3. Valores de los coeficientes parciales de minoración de los parámetros geotécnicos (γ_M) recomendados en el EC-7

Parámetro geotécnico	γ_M
Ángulo de rozamiento (aplicable a $\tan\phi$)	1,25
Cohesión efectiva	1,25
Resistencia al corte no drenada	1,40
Resistencia a compresión simple	1,40
Peso específico	1,00

- Los valores de los coeficientes de minoración de resistencias (γ_R) dependen de cada actuación geotécnica que se esté analizando. A este respecto, en el EC-7 se indican únicamente los valores de los coeficientes de minoración de resistencias de las actuaciones geotécnicas recogidas en la Tabla 4.

Tabla 4. Actuaciones geotécnicas, estados límite último a considerar y valores de γ_R correspondientes, recomendados en el EC-7 para el Enfoque de Proyecto 2

Actuación geotécnica	Estado Límite Último	Tipo ELU	γ_R ^(a)
Cimentación Superficial	Hundimiento	GEO	1,40
	Deslizamiento	GEO	1,10
Cimentación Profunda	Hundimiento	GEO	1,10
	Arranque	GEO	1,15
	Rotura horizontal	GEO	1,10
Estructuras de contención	Hundimiento	GEO	1,40
	Deslizamiento	GEO	1,10
	Vuelco rígido	EQU	---
Estabilidad global y de taludes	Estabilidad global	GEO	1,10
Pantallas	Estabilidad propia	STR	---
	Estabilidad fondo de excavación	HYD	---
		UPL	---
Anclajes pretensados	Arrancamiento	GEO	1,10

Nota ^(a): los valores indicados en la tabla corresponden al Enfoque de Proyecto 2. Estos valores varían para los otros Enfoques de Proyecto.

2.5 Comprobación de los estados límite mediante cálculos

De acuerdo al EC-7, el cálculo de cualquier estado límite último implica la verificación de la siguiente expresión:

$$E_d \leq R_d$$

donde E_d es el valor de cálculo de los efectos de las acciones y R_d es el valor de cálculo de la resistencia del terreno frente a una acción.

El valor de cálculo de los efectos de las acciones (E_d) se determina a partir de los valores representativos de las acciones, afectados por el coeficiente de mayoración de acciones (γ_F), o a partir de los valores representativos de los efectos de las acciones, afectados por el coeficiente de mayoración de los efectos de acciones (γ_E).

Por su parte, el valor de cálculo de la resistencia del terreno a una acción (R_d) se calcula a partir del valor representativo de dicha resistencia afectado por el coeficiente de minoración de las resistencias (γ_R).

En ambas determinaciones, los valores de los parámetros geotécnicos de los materiales del terreno involucrados en el estado límite último se deben obtener de los valores representativos o característicos minorados por el coeficiente de minoración de los materiales (γ_M). A este respecto, el EC-7 indica que “*el valor característico de un parámetro geotécnico se debe seleccionar como una estimación prudente de dicho valor*” [Ap. 2.4.5.2.(2)].

Desde un punto de vista de notación, los conceptos recogidos en los párrafos anteriores llevan a las siguientes expresiones de E_d y R_d :

$$E_d = E\{\gamma_F \cdot F_{rep}; X_K / \gamma_M; a_d\}$$

ó, alternativamente,

$$E_d = \gamma_E E\{F_{rep}; X_K / \gamma_M; a_d\}$$

y

$$R_d = R\{\gamma_F \cdot F_{rep}; X_K / \gamma_M; a_d\} / \gamma_R$$

donde F_{rep} es el valor representativo de una acción, X_k indica los valores representativos, también denominados característicos, de los parámetros geotécnicos de los materiales y a_d son los valores de diseño de los datos geométricos.

Los valores de los distintos coeficientes parciales de seguridad referidos a las acciones (γ_F) o a los efectos de las acciones (γ_E), a los materiales (γ_M) y a las resistencias (γ_R) dependen de los diferentes “Enfoques de Proyecto” que permite adoptar el EC-7.

3 ANEJO NACIONAL DEL EC-7

3.1 Ideas básicas

El Anejo Nacional es un documento que define todos aquellos aspectos y valores que cada uno de los diferentes eurocódigos deja abiertos para ser fijados por los distintos países que aceptan el marco normativo de los Eurocódigos.

En el texto del EC-7 hay 29 cláusulas abiertas para que el Anejo Nacional correspondiente indique, en cada caso, la opción o los valores ele-

gidos por cada país. Desde un punto de vista conceptual, estas 29 cláusulas hacen referencia a dos aspectos básicos:

- Enfoque de Proyecto que se debe utilizar para el proyecto de cada actuación geotécnica.
- Valores de los coeficientes parciales de seguridad que afectan a las acciones o a los efectos de las acciones, a los parámetros geotécnicos y a las resistencias.

Adicionalmente, el Anejo Nacional puede indicar el contenido mínimo requerido a cualquier proyecto geotécnico y los valores límite de los movimientos permitidos en cada actuación geotécnica. Asimismo puede contener información complementaria que sirva como guía de aplicación del marco normativo del propio EC-7.

3.2 *El Anejo Nacional Español*

3.2.1 *Introducción*

El Anejo Nacional Español se está redactando actualmente, a petición de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento, por un comité formado básicamente por personal técnico del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Este comité está siendo apoyado por personas de la comunidad geotécnica nacional, pertenecientes al mundo de la universidad y de las empresas consultoras y constructoras.

El principal objetivo del Anejo Nacional es definir tanto el enfoque de proyecto a utilizar en cada caso como los valores de los coeficientes parciales de seguridad para cada una de las actuaciones geotécnicas indicadas en la Tabla 4 anterior.

Para llegar a realizar esta definición se está llevando a cabo un estudio partiendo de la base de tratar de conseguir un nivel de seguridad similar al que se tiene en la práctica geotécnica española habitual.

El estudio se está abordando mediante el planteamiento y la resolución de una serie de casos sencillos de cada una de las actuaciones geotécnicas indicadas, en los que se varían los valores de todos los parámetros que influyen en el dimensionamiento.

No obstante, un primer problema que se plantea al abordar el hecho de que el Anejo Nacional

Español intente salvaguardar el mismo nivel de seguridad actual en el dimensionamiento geotécnico es la inexistencia de un procedimiento único que se pudiera denominar “español”, puesto que existen tres documentos de carácter geotécnico, con diferente rango normativo como son la ROM 0.5-05, la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera y el Código Técnico de la Edificación, que presentan diferentes formulaciones que conducen, en ocasiones y como es bien sabido, a diseños dispares.

3.2.2 *Enfoque de proyecto*

El análisis de los diferentes Enfoques de Proyecto existentes en el EC-7 ha hecho que el Anejo Nacional Español opte inicialmente por el Enfoque de Proyecto 2 para todas las actuaciones geotécnicas, excepto para el cálculo de la estabilidad global y de taludes para el que se opta por el Enfoque de Proyecto 3.

Cabe recordar que en el Enfoque de Proyecto 2 se mayoran las acciones (o los efectos de las acciones) y se minoran las resistencias sin afectar con ningún coeficiente los valores de los parámetros geotécnicos. Por su parte, el Enfoque de Proyecto 3 mayoran las acciones y minoran los valores de los parámetros geotécnicos, como normalmente se viene haciendo en los cálculos de estabilidad por equilibrio límite.

Se ha elegido el Enfoque de Proyecto 2 porque al no minorar los parámetros geotécnicos es el más parecido a la práctica habitual en España, aspecto éste que se ha considerado primordial mantener sin cambios.

Sin embargo, la gran diferencia entre el método tradicionalmente utilizado en España y el que se preconiza en el Anejo Nacional Español es el tratamiento de las acciones. En la práctica tradicional, los cálculos geotécnicos se hacen con acciones y efectos de las acciones sin mayorar, mientras que el Enfoque de Proyecto elegido implica la mayoración de las acciones o de los efectos de las acciones.

Como referencia de lo preconizado en el Anejo Nacional Español, en la Tabla 5 y en la Figura 2 se recogen los Enfoques de Proyecto elegidos por el resto de países que han adoptado los Eurocódigos como marco normativo.

Tabla 5. Enfoques de Proyecto elegidos por los diferentes países europeos

País	Enfoque de Proyecto
Alemania	2 / 2*
Austria	2
Bélgica	1
Chipre	2
Croacia	2
Dinamarca	3
Eslovaquia	2
Eslovenia	2
Estonia	2
Finlandia	2 / 2*
Francia	2
Gran Bretaña	1
Grecia	2 / 2*
Holanda	3
Hungría	2 / 2*
Irlanda	1 / 2 / 3
Islandia	1
Italia	1 / 2
Lituania	1
Luxemburgo	2
Noruega	3
Polonia	2 / 2*
Portugal	1
República Checa	1 / 2 / 3
Rumanía	1
Suecia	3
Suiza	3

Nota: El Enfoque de Proyecto 2* es una variante del Enfoque de Proyecto 2, que se comenta en el texto

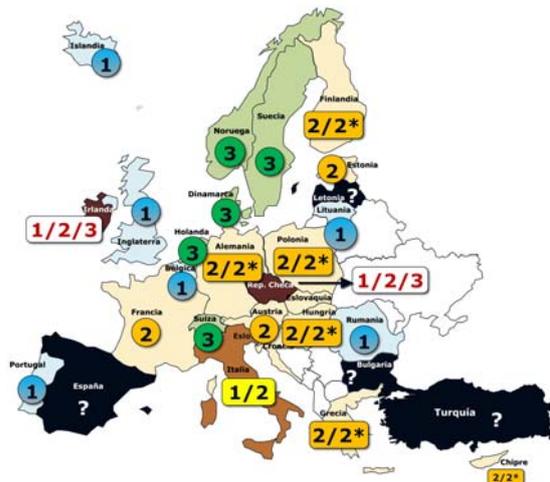


Figura 2: Enfoques de Proyecto elegidos en los Anejos Nacionales de los diferentes países europeos [Tomada de Bond, 2012]

3.2.3 Valores de los coeficientes parciales de mayoración de acciones o efecto de acciones

Una vez optado por el Enfoque de Proyecto 2, el siguiente paso es determinar los valores de los coeficientes parciales, tanto de mayoración de acciones y de efecto de acciones, como de minoración de resistencias.

La mayoración del efecto de las acciones (Enfoque de Proyecto 2*), juntamente con la minoración de la resistencia, sería un método equivalente a la utilización de un coeficiente de seguridad global, si se tiene presente la expresión $E_d \leq R_d$, y los valores de E_d y R_d indicados en el epígrafe 2.5. Utilizando la otra alternativa (Enfoque de Proyecto 2, “a secas”), con la mayoración de las acciones se armoniza el cálculo geotécnico con el cálculo estructural, de acuerdo con los restantes Eurocódigos. A este respecto, debe tenerse en cuenta que el resultado de aplicar uno u otro procedimiento no es exactamente el mismo en todos los casos, como se comenta más adelante.

En el Anejo Nacional Español se ha propuesto que la mayoración se realice sobre las acciones, por lo que las actuaciones geotécnicas se van a dimensionar con el efecto de las acciones que se obtienen de combinar las acciones previamente mayoradas, tal como se recoge en la siguiente expresión, tomada del EC-0:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

donde γ_G , γ_P , γ_Q son los coeficientes parciales de mayoración de cargas, ψ son los coeficientes de combinación de las acciones variables, G son las acciones permanentes, P es la acción del pretensado y Q son las acciones variables.

En la Figura 3 se muestra esquemáticamente esta forma de cálculo, considerando únicamente por simplicidad las cargas verticales, donde V_d es el efecto de las acciones y $R_{v,d}$ la resistencia de cálculo del terreno frente a las acciones verticales.

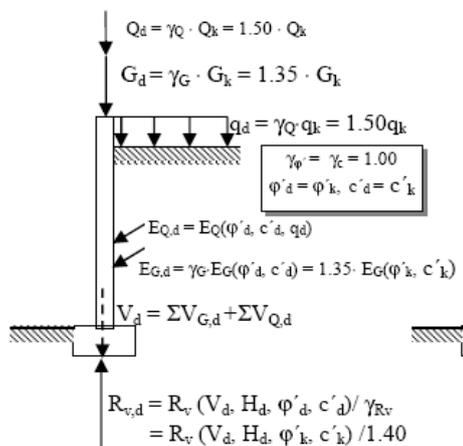


Figura 3: Método de mayoración de acciones para la verificación del estado límite de hundimiento de una cimentación superficial (por simplicidad, sólo se muestran las acciones verticales desfavorables) [Tomada de Frank, 2007]

Los Eurocódigos (EC0 “Bases de Cálculo”, EC1 “Acciones en estructuras” y el propio EC-7) indican que, para el Enfoque de Proyecto 2, los valores de los coeficientes parciales de seguridad para las acciones (γ_F) deben ser los recogidos en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de los coeficientes parciales de seguridad a las acciones (γ_F) propuestos en el EC-7

Acción	Efecto	γ_F
Permanente	Desfavorable	1,35
	Favorable	1,00
Transitoria	Desfavorable	1,50
	Favorable	0,00

Se ha considerado que es adecuado utilizar este conjunto de coeficientes parciales de seguridad en el dimensionamiento de las cimentaciones superficiales por las siguientes razones:

- Cumplen con la filosofía de los Eurocódigos, en el sentido de considerar toda la estructura, incluida la cimentación, como un todo por lo que las combinaciones de acciones, convenientemente ponderadas y mayoradas, se deben utilizar para el dimensionamiento de todos los elementos tanto estructurales como de cimentación.
- Son los valores recogidos en todos los Anejos Nacionales de los demás países europeos.

- Las normativas españolas de estructuras (IAP-11: *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*, y CTE, en su parte estructural) utilizan estos mismos valores para la mayoración de acciones, tal como puede verse en las tablas reproducidas en las Figuras 4 y 5.

ACCIÓN	EFECTO	
	FAVORABLE	DESFAVORABLE
Permanente de valor constante (G)	Peso propio	1,0 / 1,35
	Carga muerta	1,0 / 1,35
	Pretensado P_1	1,0 / 1,2 ¹⁹ / 1,3 ²⁰
Permanente de valor no constante (G*)	Pretensado P_2	1,0 / 1,35
	Otras presolicitaciones	1,0 / 1,0
	Raológicas	1,0 / 1,35
	Empuje del terreno	1,0 / 1,5
	Asientos	0 / 1,2 / 1,35 ²⁰
Variable (Q)	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0 / 1,35
	Sobrecarga de uso	0 / 1,35
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0 / 1,5
	Acciones climáticas	0 / 1,5
	Empuje hidrostático	0 / 1,5
	Empuje hidrodinámico	0 / 1,5
Sobrecargas de construcción	0 / 1,35	

Figura 4: Valores de los coeficientes parciales para las acciones (γ_F) para las comprobaciones resistentes recogidos en la IAP-11

Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
	desfavorable	favorable
Permanente	Peso propio, peso del terreno	1,35 / 0,80
	Empuje del terreno	1,35 / 0,70
	Presión del agua	1,20 / 0,90
Variable	1,50	0

Figura 5: Valores de los coeficientes parciales para las acciones (γ_F) recogidos en el CTE (DB-SE: seguridad estructural)

3.2.4 Valores de los coeficientes parciales de minoración de resistencias

Una vez elegidos los valores de los coeficientes parciales de mayoración de acciones o de efecto de acciones, el siguiente paso consiste en determinar los valores de los coeficientes de minoración de resistencias (γ_R) para cada una de las actuaciones geotécnicas recogidas en la Tabla 4.

Este paso es el que se desarrolla más pormenorizadamente en los siguientes apartados para los casos de cimentaciones superficiales y profundas.

4 CIMENTACIONES SUPERFICIALES

4.1 Introducción

En este apartado se analiza el procedimiento utilizado para la determinación de los valores de los coeficientes de minoración de resistencias (γ_R) para los diferentes estados límite últimos relativos a cimentaciones superficiales que son los siguientes: hundimiento, deslizamiento por la base, vuelco rígido, estabilidad global y capacidad estructural.

El estado límite último de hundimiento es, en general, el más determinante y específico de esta actuación geotécnica por lo que se le presta especial atención, junto con el de deslizamiento por la base.

El estado límite de vuelco rígido es un estado límite de equilibrio (tipo EQU) en el que las resistencias de los materiales no intervienen. Por otra parte, el estado límite de estabilidad global se debe analizar con el Enfoque de Proyecto 3, como se decía anteriormente, y el estado límite de capacidad estructural se debe analizar como una estructura de hormigón armado, mediante el EC-2 “Proyecto de estructuras de hormigón”.

La determinación de los valores de los coeficientes parciales de resistencias (γ_R) se ha abordado planteando y resolviendo una serie de casos sencillos de estudio para cada una de las actuaciones geotécnicas cumpliendo con la máxima de que se mantenga el mismo nivel de seguridad actual en el dimensionamiento de las cimentaciones superficiales.

4.2 Estado límite de hundimiento

4.2.1 Descripción de los casos de estudio

En la Figura 6 se muestra un esquema de las cimentaciones superficiales estudiadas que tienen un ancho B y una longitud L y están empotradas una profundidad D en un terreno homogéneo.

Se han llevado a cabo varios grupos de análisis comparativos, en los que se han variado los parámetros que caracterizan las siguientes propiedades:

- Geometría de la zapata: empotramiento (D) y relación longitud/anchura de la zapata (L/B).

- Condiciones de drenaje: posición del nivel de agua en el terreno (h_w)
- Cargas: inclinación y excentricidad de la carga (δ y e).
- Características del terreno: peso específico (γ_t), cohesión (c), ángulo de rozamiento interno (ϕ) y, en los casos sin drenaje, resistencia al corte sin drenaje (S_u).

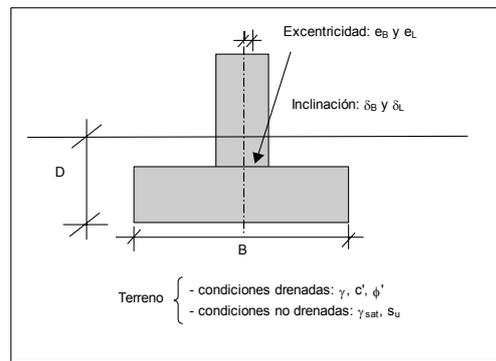


Figura 6: Esquema de los casos analizados

En la Tabla 7 se indican los valores numéricos dados a los parámetros que definen la geometría de la zapata (B, L y D), la posición del nivel de agua (h_w), las características de las cargas actuantes (δ_B , δ_L , e_B y e_L) y las propiedades resistentes del terreno de cimentación (c' y ϕ' , en los casos analizados con drenaje, y S_u , en el análisis realizado en condiciones sin drenaje).

Tabla 7. Datos de los casos analizados

CASO	D (m)	L/B	h_w (m)	δ_B (°)	δ_L (°)	e_B/B	$e_{L/L}$	γ^t (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	S_u (kPa)
1	1	1	0	0	0	0	0	20	10	25	0
2	1	1	0	0	0	0	0	20	30	25	0
3	1	1	0	0	0	0	0	20	50	25	0
4	1	1	0	0	0	0	0	20	0	30	0
5	1	1	0	0	0	0	0	20	0	35	0
6	1	1	0	0	0	0	0	20	0	0	50
7	1	1	0	0	0	0	0	20	0	0	75
8	1	1	0	0	0	0	0	20	0	0	100
9	1	1	0	0	0	0	0	20	0	0	150
10	1	1	0	0	0	0	0	20	0	0	200
11	1	1	0	0	0	0	0	18	10	25	0
12	1	1	0	0	0	0	0	22	10	25	0
13	2	1	0	0	0	0	0	20	30	25	0
14	3	1	0	0	0	0	0	20	30	25	0
15	1	1,5	0	0	0	0	0	20	30	25	0
16	1	2	0	0	0	0	0	20	30	25	0
17	1	3	0	0	0	0	0	20	30	25	0
18	1	1	20	0	0	0	0	10	30	25	0
19	1	1	20	0	0	0	0	20	0	30	0
20	1	1	0	5	0	0	0	20	30	25	0
21	1	1	0	10	0	0	0	20	30	25	0
22	1	1	0	0	5	0	0	20	30	25	0
23	1	1	0	0	0	0,05	0	20	30	25	0
24	1	1	0	0	0	0,1	0	20	30	25	0
25	1	1	0	0	0	0,15	0	20	30	25	0

Como se muestra en la referida tabla, se han realizado 26 combinaciones distintas de los parámetros de cálculo, de las cuales cinco están destinadas al cálculo sin drenaje. Estas 26 combinaciones se han realizado para tres sistemas de cargas que se especifican en la Tabla 8.

Tabla 8. Sistemas de cargas calculados

Sistema de carga	Carga permanente (kN)	Carga variable (kN)
C-1	1800	0
C-2	1800	300
C-3	1800	600

4.2.2 Procedimiento de cálculo

El procedimiento operativo para la obtención del coeficiente parcial de resistencia (γ_R) ha consistido en los siguientes pasos:

- Cálculo de la anchura de zapata (B) utilizando las expresiones de la normativa española y un coeficiente de seguridad global (FS) igual a 3.
- Cálculo de la anchura de la zapata (B) utilizando el método preconizado en el EC-7, es decir, mayorando las cargas y minorando la resistencia por un coeficiente γ_R de 1,4, que es el recomendado en el EC-7.
- Cálculo del coeficiente parcial de resistencia (γ_R) que, utilizando el método preconizado en el EC-7, permite obtener el mismo dimensionamiento, cuantificado, en este caso, en la anchura de la cimentación.

4.2.3 Resultados obtenidos

En la Tabla 9 se recogen los resultados obtenidos en los cálculos para el sistema de cargas C-2. Se muestra, para cada caso, la anchura obtenida siguiendo la práctica habitual española y el método preconizado en el EC-7, la relación entre ambas y el valor del coeficiente parcial de resistencias para que ambas anchuras de cimentación sean iguales. Los resultados obtenidos para los otros dos sistemas de cargas son similares.

Tabla 9. Resultados de los casos analizados para el sistema de cargas C-2

CASO	B_{ES} (m) para $FS_{(ES)}=3,0$	B_{EC7} (m) para $FS_{(EC7)}=1$	$B_{(ES)}/B_{(EC7)}$	γ_R para $B(ES)/B(EC7)=1$
1	3,30	2,70	1,22	2,20
2	2,30	1,85	1,24	2,15
3	1,90	1,50	1,27	2,25
4	3,40	2,85	1,19	2,15
5	2,55	2,10	1,21	2,20
6	4,35	3,50	1,24	2,15
7	3,60	2,90	1,24	2,15
8	3,15	2,50	1,26	2,20
9	2,60	2,05	1,27	2,20
10	2,25	1,80	1,25	2,20
11	3,45	2,80	1,23	2,20
12	3,15	2,60	1,21	2,15
13	2,15	1,75	1,23	2,15
14	2,05	1,65	1,24	2,20
15	2,00	1,60	1,25	2,20
16	1,80	1,45	1,24	2,20
17	1,50	1,20	1,25	2,15
18	2,10	1,70	1,24	2,15
19	2,55	2,15	1,19	2,15
20	2,55	2,05	1,24	2,15
21	2,90	2,30	1,26	2,20
22	2,70	2,15	1,26	2,20
23	2,40	1,95	1,23	2,25
24	2,45	2,00	1,23	2,20
25	2,50	2,05	1,22	2,15
26	2,60	2,15	1,21	2,25

El análisis de la tabla anterior, junto con los resultados de los otros dos sistemas de carga, permite comprobar que, en todos los casos analizados, el valor del coeficiente parcial de resistencia (γ_R) está comprendido entre 2,15 y 2,20.

Estos mismos resultados fueron obtenidos por Estaire y Perucho (2008) en un estudio en el que se calcularon unos 60.000 casos diferentes.

Asimismo, este mismo resultado se puede obtener si se analizan las expresiones contenidas en la Figura 7, en cuya columna izquierda se esquematiza el sistema de proyecto utilizado en la práctica geotécnica habitual en España, y en la derecha el método preconizado por el EC-7 con el Enfoque de Proyecto 2 (en realidad, el Enfoque de Proyecto 2*, con mayoración del efecto de las acciones, para facilitar la comparación).

El esquema comparativo de ambos métodos de dimensionamiento lleva a la conclusión de que el coeficiente de seguridad global (FS) es, en realidad, equivalente al producto de los coeficientes parciales de efecto de acciones (γ_E) y de resistencias (γ_R). Esto implica que la incertidumbre con la que se plantea habitualmente el dimensionamiento en España se debe considerar dividida en dos partes aplicando el EC-7: una parte que afecta a la cuantificación de las cargas

y otra parte que se refiere a la determinación de las resistencias del terreno.

ESPAÑA	EC-7
$q_{acr} = \frac{N}{B \cdot L}$	$E_d \leq R_d$
$q_{adm} = \frac{q_h}{FS}$	$E_d = q_{acr,d} = \frac{N \gamma_F}{B \cdot L}$
$q_{acr} = q_{adm} \Rightarrow B^*$	$R_d = \frac{q_{h,EC}(X_k / \gamma_M)}{\gamma_R}$
	$D.A.2 \rightarrow \gamma_M = 1 \Rightarrow q_{h,EC} = q_{h,esp}$
	$\frac{N \gamma_F}{B \cdot L} = \frac{q_h}{\gamma_R}$
$\frac{N}{B \cdot L} = \frac{q_{h,esp}}{FS} \Rightarrow FS = \frac{B \cdot L \cdot q_h}{N}$	$\gamma_R \cdot \gamma_F = \frac{B \cdot L \cdot q_h}{N}$

↓

$$FS = \gamma_R \cdot \gamma_F$$

Figura 7: Esquema comparativo del análisis del estado límite último de hundimiento por el sistema habitual español y por el EC-7.

Por tanto, si se usa la expresión anterior $[FS = \gamma_R \cdot \gamma_F]$ y se tienen en cuenta los valores de los coeficientes parciales de mayoración de acciones indicados anteriormente, se pueden obtener los coeficientes parciales de minoración de resistencias, tal como se indica en las expresiones siguientes:

$$FS = \gamma_R \cdot 1,35 = 3,0 \Rightarrow \gamma_R = 2,22$$

$$FS = \gamma_R \cdot 1,50 = 3,0 \Rightarrow \gamma_R = 2,00$$

Considerando, como aproximación, un valor medio de γ_F de 1,40, el valor de γ_R resultante es de 2,15:

$$FS = \gamma_R \cdot 1,40 = 3,00 \Rightarrow \gamma_R = 2,15$$

Un esquema semejante de comparación fue el utilizado en la determinación de los coeficientes de seguridad parciales del Anejo Nacional de Alemania (Frank et al., 2007).

A la vista de lo recogido en este apartado, la propuesta que se hace en el Anejo Nacional Español sobre el valor del coeficiente parcial de resistencia en el cálculo del estado límite de hundimiento de cimentación superficial es de 2,10.

4.2.4 Comparación con otros países

En la Tabla 10 se recoge el valor del coeficiente parcial de resistencias en el dimensionamiento

del estado límite de hundimiento de cimentaciones superficiales indicado en el Anexo Nacional de alguno de los países que han elegido el Enfoque de Proyecto 2.

Tabla 10. Valor del coeficiente parcial de resistencias en el dimensionamiento del estado límite de hundimiento de cimentaciones superficiales

País	γ_R
España	2,10
EC-7 (valor recomendado)	1,40
Alemania	1,40
Francia	1,40
Chipre	1,40
Finlandia	1,55
Italia	2,30

Es conveniente señalar que el valor recomendado en el EC7 de este coeficiente o el preconizado en los Anejos Nacionales de Alemania y Francia es bajo (1,40), comparado con el propuesto en España (2,10), debido a que en esos países el coeficiente de seguridad global utilizado para el estado límite de hundimiento de cimentaciones superficiales era de 2,0, tal como puede verse en los valores de la DIN 1054, mostrados en la tabla de la Figura 8.

	Caso de carga*		
	1	2	3
Frente al hundimiento	2	1,5	1,3
Frente al deslizamiento	1,5	1,35	1,2
Frente a la subpresión	1,1	1,1	1,05

* Caso 1: Cargas permanentes y sobrecargas de actuación frecuente (incluido el viento).
 Caso 2: Sobrecargas que actúan además de las del caso 1, pero no de forma regular. Cargas de construcción.
 Caso 3: Sobrecargas extraordinarias superpuestas a las del caso 2, como los efectos sísmicos, derrumbe de instalaciones de obra, etc.

Figura 8: Coeficientes de seguridad DIN 1054 (Nov. 1969) [Tomado de Rodríguez. Ortiz, 1989]

4.2.5 Consideraciones adicionales

La utilización de la expresión anterior $[FS = \gamma_R \cdot \gamma_F]$, con el valor de $\gamma_R = 2,1$ combinado con los valores de mayoración de acciones (γ_F) de la Tabla 6, parece que asegura que se reproduce de forma muy aproximada el dimensionamiento habitual en España.

Los países europeos que han optado por el Enfoque de Proyecto 2, en relación a la disyuntiva entre mayorar las acciones, o el efecto de las acciones (Enfoque de Proyecto 2*), se han dividido

entre las dos opciones, conforme se ha indicado en la Tabla 5 y en la Figura 2. Entre las diferencias tenidas en cuenta para inclinarse hacia una u otra variante, y en lo concerniente a las cimentaciones superficiales, debe destacarse el siguiente detalle: en el Enfoque de Proyecto 2*, así como en la práctica española tradicional, los factores de inclinación (i_c , i_q , i_v) que intervienen en la fórmula polinómica y la excentricidad de las cargas se determinan con las cargas sin mayorar, mientras que con el Enfoque de Proyecto 2 esos coeficientes y la propia excentricidad se calculan con las acciones ya mayoradas.

Con el fin de analizar la importancia de este aspecto, se ha hecho una estimación de unos valores medios de los factores de inclinación de las cargas, de acuerdo con la práctica española (con los factores tomados de la Guía de Cimentaciones) y se han comparado con unos valores medios obtenidos con los factores del EC-7 y una inclinación de cargas incrementada de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\delta_{B,(EC7)} = \delta_{B,(Esp)} \cdot \frac{1,50}{1,35} = \delta_{B,(Esp)} \cdot 1,11$$

Este incremento es el máximo posible, ya que correspondería al caso de suponer que todas las cargas horizontales fueran variables y se mayoraran con 1,50 y que todas las cargas verticales fueran permanentes y se mayoraran con 1,35.

Los valores medios así obtenidos se han recogido en la Figura 9 para distintos valores de inclinación de cargas. Así, por ejemplo, para un ángulo de inclinación de cargas de 10° , el valor medio de los factores de inclinación en la práctica española sería de 0,629, mientras que aplicando el Enfoque de Proyecto 2* del EC-7 sería de 0,595, al haber pasado el ángulo de inclinación a un valor de $11,1^\circ$. Como puede observarse en la figura, para todo el rango de inclinaciones, las diferencias no son relevantes.

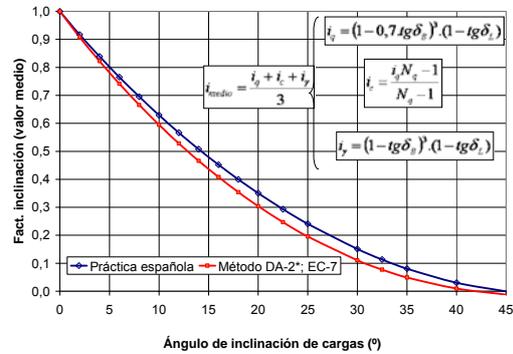


Figura 9: Comparación de los factores de inclinación de cargas (i) utilizados en la práctica española y en el Enfoque de Proyecto 2* (DA 2*) del EC-7

Desde el punto de vista de la excentricidad de la carga, se ha realizado un cálculo similar, reflejado en la Figura 10. El valor de la excentricidad se ha calculado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$e_{(EC7)} = e_{(Esp)} \cdot \frac{1,50}{1,35} = e_{(Esp)} \cdot 1,11$$

La conclusión que se deriva es que tampoco la diferencia en la determinación de la excentricidad tiene una influencia relevante.

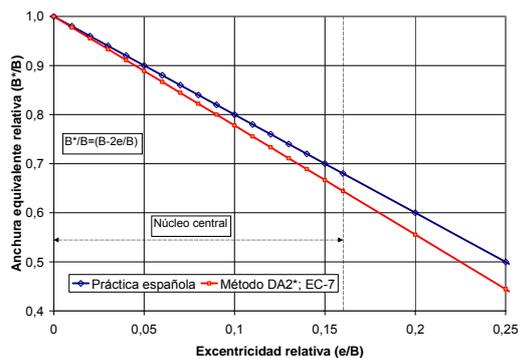


Figura 10: Comparación de las excentricidades utilizadas en la práctica española y en el Enfoque de Proyecto DA-2*

Estos resultados han llevado a descartar la adopción del Enfoque de Proyecto 2*, adoptado en algunos países, como se reflejaba en la Figura 2.

4.2.6 Determinación de la capacidad portante basada en ensayos geotécnicos de campo

El EC-7, en su apartado 6.5.2.3, también permite estimar la capacidad portante del terreno a partir de ensayos geotécnicos de campo, mediante la aplicación de métodos semi-empíricos. De hecho, en el Anejo E se indica la expresión que permite el uso de la presión límite equivalente neta de diseño (p^*_{ie}) obtenida en un ensayo presiométrico, para obtener la capacidad portante de diseño (R_d) tal como se recoge a continuación.

$$R_d / A' = \sigma_{v,0} + k p^*_{ie}$$

Esta expresión implica que no se utiliza ningún coeficiente parcial de resistencias o de materiales en la estimación de la capacidad portante de diseño.

Esta forma de abordar el diseño no es equiparable a la práctica geotécnica española, en la que la carga que se estima con esas expresiones se minoraría posteriormente con un coeficiente de seguridad global que, en muchos casos, toma valor de 3,0.

Este aspecto será indicado en el Anejo Nacional para equiparar el nivel de seguridad con el que se realicen este tipo de cálculos.

Por último, se debe indicar que este esquema de cálculo es susceptible de ser extendido a los resultados obtenidos de los ensayos de penetración estática.

4.3 Estado límite de deslizamiento

La comparación del análisis del dimensionamiento de una cimentación superficial frente al estado límite de deslizamiento por la base por el método habitual en España y el preconizado en el EC-7 lleva a la misma expresión indicada anteriormente:

$$FS = \gamma_R \cdot \gamma_F$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta la expresión anterior, los mismos valores del coeficiente parcial de seguridad a las acciones, indicados en la Tabla 6, y que el coeficiente de seguridad global

que se utiliza normalmente en la práctica geotécnica española para este estado límite tiene un valor de 1,5, para las situaciones permanentes y transitorias, el coeficiente parcial de seguridad a la resistencia (γ_R) tomaría un valor de 1,1.

Este valor es igual al recomendado en el Anexo A del EC-7.

4.4 Estado límite de servicio

La verificación del estado límite de servicio es un tema complejo dentro del marco de referencia del EC-7 ya que no existe el concepto de tensión admisible.

Por una parte, desde el punto de vista del Anejo Nacional Español, este documento únicamente va a indicar que el estado límite de servicio se debe comprobar con las cargas de servicio, es decir, sin mayorar. Quedará comprobado cuando los movimientos de la cimentación (tanto asientos como giros) sean inferiores a los límites tolerables por la estructura. Estos valores límite se propone no indicarlos de manera general en el Anejo Nacional y remitirse a que “*se deberán especificar en cada proyecto concreto*”.

Sin embargo, queda la cuestión de la forma en la que se debe realizar la verificación de este estado límite muy ligado al concepto de tensión admisible o de trabajo. A este respecto, hay que tener en cuenta que en el marco del EC-7 no aparece específicamente el concepto de tensión admisible con el que efectuar una estimación inicial de los movimientos. Quizás la única indicación que se puede hacer es que el Anejo Geotécnico, adjunto a cada proyecto, realice una estimación de movimientos para diferentes cargas, de tal manera que el proyectista compruebe posteriormente que la carga de trabajo de la cimentación es compatible con los movimientos máximos permitidos.

5 CIMENTACIONES POR PILOTES

5.1 Introducción

El tema de las cimentaciones por pilotes se aborda, de manera muy amplia, en el Capítulo 7 del EC-7 que comienza con la definición de los esta-

dos límite a considerar y con los métodos y consideraciones de diseño, haciendo especial hincapié en las pruebas de carga en pilote. Se distingue entre pilotes cargados axialmente, tanto a compresión como a tracción y pilotes sometidos a carga lateral.

Los diferentes estados límite últimos relativos a cimentaciones por pilotes se dividen en los siguientes conceptos:

- Capacidad portante: se analizan los modos de fallo relacionados con la falta de resistencia del terreno. Estos estados límite son los de hundimiento, arranque y rotura horizontal.
- Estabilidad global de la zona de apoyo: se analizan líneas de rotura que engloben toda la cimentación mediante las técnicas de cálculo de estabilidad de taludes.
- Rotura estructural: se analiza la resistencia estructural del pilote y del encepado.

En la Figura 11 se muestran esquemáticamente algunos de estos estados límite últimos.

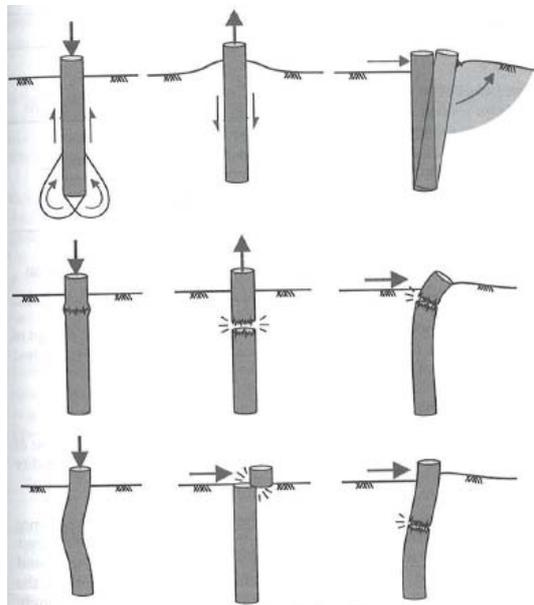


Figura 11: Algunos estados límite de cimentaciones por pilotes [Tomada de Bond & Harris, 2008]

De los estados límite últimos relativos a la capacidad portante del terreno, el hundimiento es, en general, el más determinante de esta actuación

geotécnica por lo que es el único que se trata específicamente con más detalle.

El estado límite de estabilidad global se debe analizar con el Enfoque de Proyecto 3, como se comentará posteriormente, y los estados límite relativos a la rotura estructural se deben analizar mediante el EC-2 “Proyecto de estructuras de hormigón”.

En lo que respecta a los métodos de diseño, el dimensionamiento de las cimentaciones por pilotes, de acuerdo al EC-7, puede realizarse, en términos generales, siguiendo los diferentes enfoques recogidos en la Tabla 11.

Tabla 11. Enfoques de cálculo de las cimentaciones por pilotes

Enfoque basado en:	Condiciones / limitaciones
Ensayos estáticos de carga	Se debe demostrar, por medio de cálculos u otros medios, que los resultados son consistentes con otras experiencias relevantes
Métodos de cálculo empíricos o analíticos	Se debe demostrar su validez mediante ensayos estáticos de carga en situaciones comparables
Ensayos dinámicos de carga	Se debe demostrar su validez mediante ensayos estáticos de carga en situaciones comparables
Comportamiento observado en una cimentación sobre pilotes similar	Enfoque apoyado por los resultados de un reconocimiento geotécnico del emplazamiento y de ensayos <i>in situ</i>

Como se puede deducir de la Tabla 11, en el dimensionamiento de las cimentaciones por pilotes, el EC-7 da prioridad a los ensayos estáticos de carga, bien para efectuar el dimensionamiento directamente a partir de los resultados de estos ensayos, bien para utilizarlos de validación del dimensionamiento realizado por métodos empíricos o analíticos, o a partir de ensayos dinámicos de carga. Sólo en el caso del método observacional no se hace referencia a los ensayos estáticos de carga.

En la práctica española, el dimensionamiento basado en cálculos mediante formulaciones analíticas o empíricas es, sin embargo, el más utili-

zado, lo cual crea un cierto problema en el enfoque inicial del asunto.

En este apartado se indican los métodos de cálculo y se proponen los valores de los coeficientes de minoración de resistencias (γ_R).

5.2 Estado límite de hundimiento

5.2.1 Ideas básicas

El estado límite de hundimiento implica, como cualquier otro estado límite último de acuerdo al EC-7, la verificación de la siguiente expresión:

$$E_d \leq R_d$$

donde E_d es el valor de cálculo de los efectos de las acciones y R_d es el valor de cálculo de la resistencia del terreno frente a una acción.

En el Apartado 3.2.3 de este texto ya se ha comentado la determinación del valor de cálculo de los efectos de las acciones (E_d).

Por su parte, el valor de cálculo de la resistencia del terreno que, en este caso, es la capacidad portante de diseño del terreno ($R_{c;d}$) se obtiene de la suma de la resistencia por punta ($R_{b;d}$) y por fuste ($R_{s;d}$) de diseño, tal como se recoge en la expresión siguiente:

$$R_{c;d} = R_{b;d} + R_{s;d}$$

Las resistencias por punta y por fuste de diseño se obtienen a partir de los valores representativos o característicos minorados por el coeficiente de resistencias correspondiente (γ_b para la resistencia por punta y γ_s para la resistencia por fuste), tal como se indica en las expresiones siguientes:

$$R_{b,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_b} ; R_{s,d} = \frac{R_{s,k}}{\gamma_s}$$

5.2.2 Capacidad portante última del terreno a partir de fórmulas analíticas

Este procedimiento de cálculo se desarrolla únicamente en la cláusula 7.6.3.2.(8) del EC-7 y se considera un "procedimiento alternativo".

En este método de cálculo, los valores representativos o característicos de las resistencias por punta y fuste se pueden obtener de las formula-

ciones analíticas que se consideren convenientes, ya sean las indicadas en la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera, en la ROM 0.5-05, en el Código Técnico de la Edificación o en cualquier otro texto, dado que el EC-7 no fija ninguna referencia en este aspecto.

Además, se deberá, de acuerdo a la propuesta contenida en el Anejo Nacional Español, utilizar un coeficiente de minoración adicional, denominado coeficiente de modelo ($\gamma_{R;d}$) que tenga en cuenta la incertidumbre asociada a no disponer de resultados de ensayos estáticos de carga sobre pilotes de prueba que, como se decía anteriormente, es el método preferido por el EC-7. Por lo tanto, las resistencias por punta y por fuste de diseño se obtienen a partir de las expresiones siguientes:

$$R_{b,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_b \cdot \gamma_{R,d}} ; R_{s,d} = \frac{R_{s,k}}{\gamma_s \cdot \gamma_{R,d}}$$

Las resistencias características, de acuerdo con la cláusula 7.6.2.3 (8), pueden obtenerse a partir de los valores característicos de la resistencia por punta, $q_{b;k}$ y por fuste, $q_{s;i;k}$, de las diferentes capas del terreno (obtenidos, a su vez, de los parámetros geotécnicos de las mismas) y de las superficies de pilote correspondientes:

$$R_{b,k} = A_b \cdot q_{b;k} ; R_{s,k} = \sum_i A_{s,i} \cdot q_{s,i;k}$$

Los valores de los coeficientes de minoración de resistencia por punta y fuste y del coeficiente de modelo se pueden determinar a partir de las siguientes expresiones, similares a la anteriormente deducida para las cimentaciones superficiales:

$$\text{Resistencia por punta} \Rightarrow FS_b = \gamma_F \cdot \gamma_b \cdot \gamma_{R,d}$$

$$\text{Resistencia por fuste} \Rightarrow FS_s = \gamma_F \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{R,d}$$

Estas expresiones indican que el coeficiente de seguridad global actualmente en uso se puede entender como el producto de los coeficientes parciales de acciones, de resistencia y de modelo.

Si se tienen en cuenta los valores de los coeficientes parciales de mayoración de acciones, anteriormente comentados, y se considera un coeficiente de seguridad global de 3,0 para la resistencia por punta y de 2,5 para la resistencia por fuste, en la Figura 12 se muestran las parejas $(\gamma_{R,d} - \gamma_b)$ y $(\gamma_{R,d} - \gamma_s)$ que cumplen dichas igualdades.

De estas parejas, los valores que se proponen en el Anejo Nacional Español se recogen en la Tabla 12, para que las diferencias con los valores propuestos por otros países no sean muy relevantes.

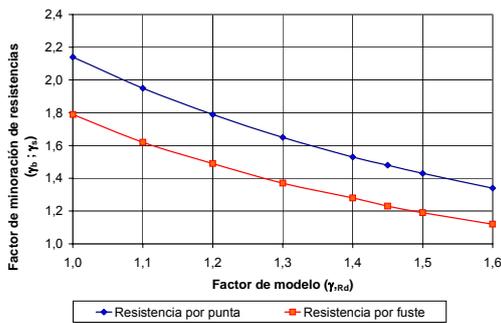


Figura 12: Relación entre los coeficientes de modelo y de minoración de resistencia por punta y fuste

Tabla 12. Valores de los coeficientes parciales de minoración de resistencia para el cálculo de cimentaciones por pilotes por el método analítico.

Concepto	Símbolo	Valor
Resistencia por punta	γ_b	1,35
Resistencia por fuste	γ_s	1,10
Modelo	$\gamma_{R,d}$	1,60

Con objeto de comparar la propuesta española con la de otros países, en la siguiente tabla se recogen los valores indicados en los anejos nacionales de países que han elegido el Enfoque de Proyecto 2.

Tabla 13. Valor del coeficiente parcial de resistencias en el dimensionamiento del estado límite de hundimiento de cimentaciones por pilotes

País	γ_b	γ_s	$\gamma_t^{(a)}$	$\gamma_{R,d}$
España	1,35	1,10	1,25	1,60
EC-7 (valor recomendado)	1,10	1,10	1,10	$\geq 1,00^{(d)}$
Alemania	1,10 ^(b) 1,40 ^(c)	1,10 ^(b) 1,40 ^(c)	1,10 ^(b) 1,40 ^(c)	1,00 ^(e)
Chipre	1,10	1,10	1,10	1,25
Finlandia	1,20	1,20	1,20	1,60 ^(f) 1,95 ^(g) 1,40 ^(h)
Italia	1,35	1,15	1,25	1,00

Notas: ^(a) Coeficiente de minoración de resistencia total, comentado posteriormente; ^(b) Uso de ensayos estáticos y dinámicos de carga; ^(c) En base a parámetros del terreno; ^(d) El EC-7 indica que podrán ser necesarios valores $>1,00$ cuando la resistencia se obtenga a partir de parámetros del terreno; ^(e) A partir de ensayos dinámicos, $\gamma_{R,d} = 0,85 \cdot 1,20$; ^(f) Para pilotes a fricción; ^(g) Para pilotes en terrenos cohesivos a corto plazo; ^(h) Para pilotes en terrenos cohesivos a largo plazo.

5.2.3 Capacidad portante última del terreno a partir de ensayos geotécnicos de campo

El EC-7 también permite que se dimensionen las cimentaciones por pilotes a partir de los resultados de ensayos geotécnicos de campo. Es importante resaltar que, en este punto, en el EC-7 no se indican los ensayos concretos a los que se refiere este apartado, aunque los múltiples ejemplos de aplicación existentes en la literatura parecen hacer referencia, al menos, a los ensayos presiométricos y los ensayos tipo CPTU [Frank et al. (2004) y Orr (2005)].

En este procedimiento de cálculo, los valores representativos o característicos de las resistencias por punta y fuste se obtendrán, por correlaciones con los resultados de los ensayos de campo, para cada uno de los emplazamientos de dichos ensayos, en los que se obtendrá un perfil del terreno. La resistencia total característica ($R_{c,k}$), obtenida como suma de la resistencia por punta y fuste, será la menor de los dos siguientes valores:

$$R_{c,k} = R_{b,k} + R_{s,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{medio}}{\xi_3}, \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

siendo $(R_{c,cal})_{medio}$ y $(R_{c,cal})_{min}$, los valores medio y mínimo de los valores calculados a partir de los resultados de los ensayos de campo y ξ_3 y ξ_4 , unos coeficientes parciales que dependen del número de “perfiles del terreno” que se hayan obtenido con los ensayos, tal como se refleja en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores de los coeficientes parciales de minoración de resistencia para el cálculo de cimentaciones por pilotes a partir de ensayos geotécnicos de campo

Número perfiles de ensayos	1	2	3	4	5	7	>10
ξ_3	1,60	1,55	1,52	1,50	1,47	1,45	1,40
ξ_4	1,60	1,45	1,40	1,35	1,30	1,25	1,20

Se han elegido provisionalmente estos valores para que sean equiparables al valor del coeficiente de modelo ($\gamma_{R,d}=1,60$), indicado anteriormente, en el caso de que sólo se obtenga información de un perfil y vayan disminuyendo a medida que se va aumentando el número de ensayos realizados.

Una vez obtenida la capacidad portante característica del terreno, la capacidad portante de diseño se obtiene minorando dicho valor por el coeficiente de minoración de resistencias (γ_t), tal como se indica en la expresión siguiente:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}$$

El valor que se propone en el Anejo Nacional Español para este coeficiente de minoración de resistencia total (γ_t), que tiene en cuenta de forma conjunta la resistencia por punta y por fuste, es de 1,25. Este valor se ha adoptado como valor intermedio entre los correspondientes a la resistencia por punta y fuste recogidos en la Tabla 12. En la Tabla 13, recogida anteriormente, se recogen los valores de este coeficiente de minoración de resistencias total (γ_t) propuestos por otros países.

Una vez descrito este procedimiento de determinación de la capacidad portante del terreno a partir de ensayos geotécnicos, se deben realizar las siguientes consideraciones:

- El concepto de “perfil de terreno” no es muy claro y puede entenderse como un emplazamiento en el que se haya ejecutado un ensayo tipo CPTU o perforado un sondeo en el que se hayan realizado ensayos presiométricos.
- El número de emplazamientos o de “perfiles de terreno” no se relaciona con las dimensiones del solar en el que se implanta el edificio a cimentar o con el número de apoyos de la estructura a cimentar.
- No hay ninguna indicación en el EC-7 de la forma de valorar el número de ensayos que se hagan en un emplazamiento, siendo así que no debería valorarse de igual manera un sondeo con un presiómetro que con varios.
- Tampoco hay ninguna indicación sobre la forma de valorar los resultados de los diferentes ensayos realizados en un emplazamiento, en el caso de que haya varios. Así, por ejemplo, no se indica si se debe elegir el valor medio aritmético, el valor mínimo o algún otro intermedio matizado por la experiencia.
- Este procedimiento de determinación de la capacidad portante está basado en formulaciones empíricas (por ejemplo, la que relaciona la presión límite de un ensayo presiométrico con la resistencia por punta) que, de acuerdo al EC-7, no se deben minorar con ningún coeficiente de modelo, a diferencia de lo que ocurre con las fórmulas analíticas, comentadas anteriormente. Se considera que este aspecto es de difícil justificación teórica.

De forma adicional, es interesante destacar, a este respecto, que el Anejo Nacional Alemán no considera que este método sea de uso normal en Alemania, remitiéndose al método analítico de la cláusula 7.6.2.3 (8). En este caso, se considera que se ha introducido un coeficiente de modelo de aproximadamente 1,3, el cual está incorporado en el valor de 1,4 para γ_b , γ_s y γ_t especificado cuando se obtienen las resistencias a partir de los parámetros del terreno (ver Tabla 13).

5.2.4 Capacidad portante última del terreno a partir de ensayos de carga estática

En este procedimiento de cálculo, el valor representativo o característico de la capacidad portan-

te última del terreno será el menor de los dos valores siguientes:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{medio}}{\xi_1}, \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_2} \right\}$$

siendo $(R_{c,m})_{medio}$ y $(R_{c,m})_{min}$, los valores medio y mínimo de los resultados obtenidos en los ensayos de carga, y ξ_1 y ξ_2 unos coeficientes parciales que dependen del número de pilotes ensayados, tal como se refleja en la Tabla 15.

Tabla 15. Valores de los coeficientes parciales de minoración de resistencia para el cálculo de cimentaciones por pilotes a partir de ensayos de carga estática

Número de pilotes ensayados	1	2	3	4	≥5
ξ_1	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
ξ_2	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

Al considerarse que hay menor incertidumbre en la determinación de la resistencia del pilote a partir de los ensayos de carga estática (método priorizado por el Eurocódigo), se han elegido provisionalmente los mismos valores que figuran en el EC-7, valores que disminuyen a medida que se van aumentando el número de ensayos realizados.

Una vez obtenida la capacidad portante característica del terreno, la capacidad portante de diseño se obtiene minorando dicho valor por el coeficiente de minoración de resistencias (γ_t), tal como se indica en la expresión siguiente:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}$$

El valor de este coeficiente de minoración de resistencias total (γ_t) ya se ha indicado anteriormente en la Tabla 13.

La utilización de los valores anteriormente indicados es equivalente a considerar un coeficiente de seguridad global de 2,45, en el caso de que haya una sola prueba de carga, y de 1,75, cuando haya, al menos, 5 pruebas.

5.3 Consideración sobre pilotes hincados y de barrena continua (CFA)

El Anejo A del EC-7 tiene tablas con los valores de los coeficientes parciales γ_b , γ_s y γ_t diferencia-

das para los pilotes hincados, perforados y de barrena continua. Para el Enfoque de Proyecto 2, los valores propuestos en dicho anejo para los tres tipos anteriores de pilotes son iguales.

Por dicha razón, el Anejo Nacional Español ha propuesto también, para los pilotes hincados y de barrena continua, los mismos valores que los indicados anteriormente para los pilotes perforados.

Por su parte, en la Tabla 16 se muestran los valores de los coeficientes parciales de minoración de resistencia para el cálculo de pilotes hincados a partir de ensayos dinámicos de impacto.

Tabla 16. Valores de los coeficientes parciales de minoración de resistencia para el cálculo de cimentaciones por pilotes a partir de ensayos dinámicos de impacto

Número de pilotes ensayados	≥2	≥5	≥10	≥15	≥20
ξ_5	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
ξ_2	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

5.4 Consideración sobre el “tope estructural”

El único comentario sobre el “tope estructural” en relación al dimensionamiento de cimentaciones por pilotes es que este concepto no aparece reflejado expresamente en el EC-7 y que remite su comprobación estructural, a través de la cláusula 7.8 (1), al EC-2 “Proyecto de Estructuras de hormigón”.

6 ESTABILIDAD DE TALUDES Y TERRAPLENES Y ESTADO LÍMITE DE ESTABILIDAD GLOBAL

El Anejo Nacional Español propone que el análisis de la estabilidad de taludes y terraplenes y del estado límite último de estabilidad global de las distintas actuaciones geotécnicas se realice de acuerdo con el Enfoque de Proyecto 3, en el que se minoran los valores de los parámetros geotécnicos y, para este tipo de cálculos de estabilidad, se mayoran únicamente las acciones variables desfavorables (como pueden ser las sobrecargas de edificación y las cargas de tráfico).

Se ha elegido este Enfoque de Proyecto 3 para realizar estos análisis de estabilidad dado que in-

trínsecamente es idéntico a la forma de abordar estos problemas en la práctica geotécnica habitual española. En ella se utilizan los métodos del equilibrio límite, en los que se determina el coeficiente de seguridad reduciendo la resistencia al corte del terreno mediante la minoración simultánea de los valores de cohesión y ángulo de rozamiento de los materiales implicados en el deslizamiento en estudio.

Además, el Enfoque de Proyecto 3 es el procedimiento adoptado, junto con el Enfoque de Proyecto 1 (semejante a este respecto al Enfoque 3, ya que en su Combinación 2 se minoran también los parámetros geotécnicos y se mayoran las acciones variables desfavorables), por la mayoría de los países para este problema, como puede verse en la Figura 13.

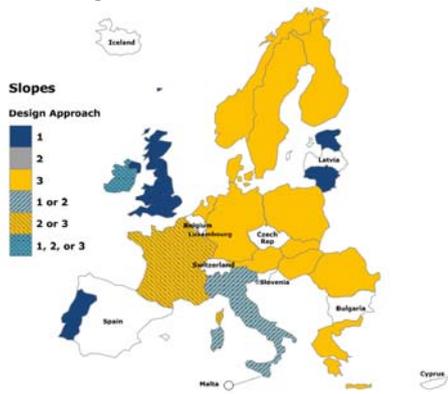


Figura 13: Enfoques de Proyecto elegidos en los Anejos Nacionales de los diferentes países europeos para la estabilidad global y de taludes [Bond, 2010]

Por otra parte, de acuerdo a este Enfoque de Proyecto y a lo indicado en el EC-7, las acciones situadas sobre el terreno, tales como sobrecargas de edificación o de tráfico, se deben mayorar con los valores de los coeficientes parciales de seguridad recogidos en la Tabla 17.

Tabla 17. Valores de los coeficientes parciales de seguridad para las acciones (γ_F) a utilizar en el Enfoque de Proyecto 3 para el análisis de la estabilidad global y de taludes

Acción	Efecto	γ_F
Permanente	Desfavorable	1,00
	Favorable	1,00
Transitoria	Desfavorable	1,30
	Favorable	0,00

Por su parte, los coeficientes de minoración de los parámetros de resistencia de los materiales que se proponen en el Anejo Nacional son los indicados en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores de los coeficientes parciales de minoración de los parámetros geotécnicos (γ_M) para el análisis de estabilidad global y de taludes de acuerdo al Enfoque de Proyecto 3

Parámetro geotécnico	γ_M
Ángulo de rozamiento (aplicable a $\tan\phi$)	1,50
Cohesión efectiva	1,50
Resistencia al corte no drenada	1,50
Resistencia a compresión simple	1,50
Peso específico	1,00

Se puede ver en la tabla anterior que los valores propuestos en el Anejo Nacional son los valores tradicionalmente utilizados en la práctica geotécnica española y están de acuerdo aproximadamente con los valores indicados en los diferentes documentos españoles de carácter geotécnico, tal como se refleja en la Tabla 19.

Tabla 19. Valores de los coeficientes de seguridad para el ELU de estabilidad global en diferentes documentos españoles

Documento	Combinación de acciones / Situación de dimensionado	FS
ROM 0-5.05	Cuasi-permanente	1,4
	Fundamental	1,3
	Accidental o sísmica	1,1
Guía Cimentaciones Obras de Carreteras	Cuasi-permanente	1,5
	Fundamental	1,3
	Accidental o sísmica	1,1
Código Técnico de Edificación	Persistente o transitoria	1,8
	Extraordinaria	1,2

En las Figuras 14 y 15 se muestra una comparación de los coeficientes parciales de minoración de los parámetros geotécnicos adoptados por diferentes anejos nacionales para el caso de la estabilidad global [Bond (2010)]. Se observa que en la mayoría de los países se adoptan valores semejantes a los recomendados por el EC-7: $\gamma_M = 1,25$, para los parámetros resistentes en condiciones drenadas, y $\gamma_M = 1,40$ para los parámetros resistentes en condiciones no drenadas. Se observa también que algunos países introducen variaciones en el valor de estos coeficientes en función de las situaciones de dimensionado:

permanente, transitoria o accidental y también, en algún caso, en función del tipo de consecuencia que implica la rotura o del nivel de riesgo. El EC-7 permite, en su cláusula 2.4.7.1, la posibilidad de considerar diferentes valores de los coeficientes parciales en función de las situaciones de dimensionado o de las clases de riesgo del problema.

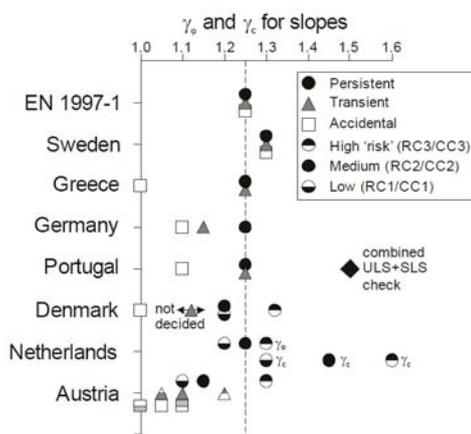


Figura 14: Coeficientes parciales de minoración del ángulo de rozamiento (γ_ϕ) y la cohesión (γ_c) efectivos adoptados por diferentes anejos nacionales europeos. [Bond, 2010]

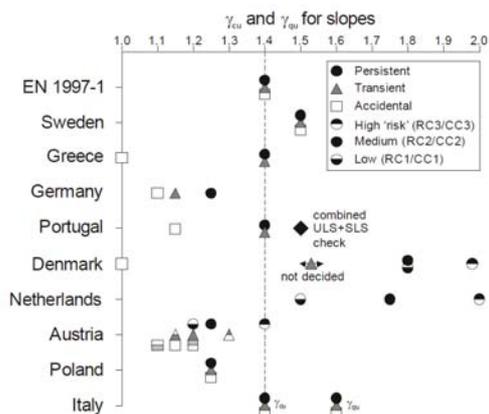


Figura 15: Coeficientes parciales de minoración de la resistencia al corte no drenada (γ_{cu}) adoptados por diferentes anejos nacionales europeos. [Bond, 2010]

En la Tabla 20 se incluyen los valores de los coeficientes de minoración de los parámetros

geotécnicos adoptados en el Anejo Nacional portugués (Enfoque de Proyecto 1, Combinación 2). Es de interés porque se distinguen dos situaciones de dimensionado (permanente y transitoria, por un lado, y accidental o extraordinaria, por otro) tal como en el Código Técnico de la Edificación, pero además, se incluyen valores en concepto de limitación de la resistencia al corte movilizada que sirven para el cálculo del estado límite último de servicio de estructuras e infraestructuras situadas sobre los taludes o en su proximidad. Esta posibilidad también la ofrece el EC-7, concretamente en el epígrafe 11.6 (3).

Tabla 20. Valores de los coeficientes parciales de minoración de los parámetros geotécnicos (γ_M) para el análisis de estabilidad global y de taludes adoptados por el Anejo Nacional portugués

Parámetro geotécnico	Coeficiente de minoración γ_M		
	ELU Situación accidental	ELU Situación permanente o transitoria	ELS Limitación de la resistencia al corte movilizada
$\gamma_{\phi'}$	1,10	1,25	1,50
$\gamma_{c'}$	1,10	1,25	1,50
γ_{cu}	1,15	1,40	---
γ_{qu}	1,15	1,40	---
γ_γ	1,00	1,00	---

7 OTRAS ACTUACIONES GEOTÉCNICAS

El EC-7 también se ocupa, en diferentes capítulos, del dimensionamiento de anclajes (Cap. 8), estructuras de contención (Cap. 9), tanto pantallas como muros y problemas hidráulicos (Cap. 10).

El análisis de esas actuaciones geotécnicas también implica la utilización de otros coeficientes de minoración de resistencias que no se han tratado en este texto puesto que su estudio no se ha terminado en el momento de redactar esta ponencia, aunque evidentemente aparecerán reflejados en el Anejo Nacional Español cuando se dé por finalizado.

8 RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este artículo se han analizado los principales aspectos que se deben tomar en consideración en el Anejo Nacional del Eurocódigo 7 (EC-7).

Dicho Anejo Nacional es un documento que debe definir algunos aspectos que el EC-7 deja abiertos para ser fijados por cada país, principalmente en relación a los dos puntos siguientes:

- El Enfoque de Proyecto que se debe utilizar en cada actuación geotécnica.
- Los valores de los diferentes coeficientes parciales de seguridad.

Los diferentes Enfoques de Proyecto constituyen distintas formas de cuantificar la incertidumbre en el cálculo, mediante una variada ponderación de los coeficientes de seguridad. Estos Enfoques se recogen en el EC-7 con objeto de dar cabida a las distintas formas de abordar el dimensionamiento geotécnico existentes en los países que han aceptado los Eurocódigos como marco de referencia.

Actualmente, el Anejo Nacional español del EC-7 se encuentra en fase de borrador. Está siendo redactado por un Comité técnico en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, apoyado por técnicos de la comunidad geotécnica nacional, tanto del ámbito de la universidad como de las empresas constructoras y consultoras.

Para definir los aspectos citados se está llevando a cabo un estudio mediante el planteamiento y resolución de una serie de casos sencillos de cada una de las diferentes actuaciones geotécnicas definidas en la Tabla 4. Dicho estudio parte de la base de tratar de conseguir un nivel de seguridad similar al que se tiene en la práctica geotécnica española habitual.

En este artículo se recoge un resumen del estudio llevado a cabo, principalmente en relación a las cimentaciones superficiales y profundas.

Como resultado de dicho estudio se ha optado por elegir en el Anejo Nacional español el Enfoque de Proyecto 2 para todas las actuaciones geotécnicas, salvo para el estudio de la estabilidad

global y de taludes, para el que se ha optado por el Enfoque de Proyecto 3.

En el Enfoque de Proyecto 2 se mayoran las acciones (o los efectos de las mismas) y se minoran las resistencias, sin afectar con ningún coeficiente los valores de los parámetros geotécnicos, por lo que resulta el más parecido a la práctica habitual en España. Por su parte, el Enfoque de Proyecto 3 mayoran las acciones y minoran los valores de los parámetros geotécnicos, como normalmente se viene haciendo en los cálculos de estabilidad por equilibrio límite.

Una vez esté redactada la versión final del Anejo Nacional del EC-7 se podrá incorporar al ordenamiento jurídico español mediante su publicación en el BOE, con lo cual el EC-7 adquirirá rango de obligado cumplimiento, por encima de cualquier otra normativa geotécnica existente previamente.

REFERENCIAS

- Bond, A. & Harris, A. (2008). *Decoding Eurocode 7*. Taylor & Francis, 2008.
- Bond, A. (2010). Results of the NDP Survey 2009/10. 2nd International Workshop on Evaluation of Eurocode 7, Pavia, Italia, Abril 2010.
- Bond, A. (2012) Presentation of Chairman. 27th meeting of CEN/TC250/SC7, The Hague Netherlands, Marzo 2012
- Estaire, J. y Perucho, A. (2008). Comparación del dimensionamiento de cimentaciones superficiales aplicando el Eurocódigo 7 y las normativas españolas. *Revista de Ingeniería Civil* 152/2008 (pp. 73-85) y *Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica*, nº 157 – Oct- Dic. 2008, pag 37-49.
- Frank, R., Schuppener, B., Vogt, N. & Weissenbach, A. (2007). Design approaches of Eurocode 7 for the verification of ultimate limit states in geotechnical design in France and Germany. *Revue Européenne de Génie Civil*, vol. 11, nº 5, mai 2007, p. 621-641.
- Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvadas, M., Krebs, N., Orr, T. & Schuppener, B. (2004). *Designers' Guide to EN 1997-1*. Thomas Telford, 2004.
- Orr, T. (2005). *Proceedings of the International Workshop on the Evaluation of Eurocode 7*. Dublin, 2005.
- Rodríguez Ortiz, J.M., Serra, J. y Oteo, C. (1989). *Curso Aplicado de Cimentaciones*. Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
- IAP-11 "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera". Ministerio de Fomento, 2011.