

Bases del Anejo Nacional Español del Eurocódigo EC-7 (proyecto geotécnico)

The Spanish National Annex to Eurocode EC-7 (geotechnical design)

José Estaire Gepp*, Fernando Pardo de Santayana Carrillo y Áurea Perucho Martínez

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Laboratorio de Geotecnia, Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX), Madrid, España
Recibido el 31 de octubre de 2013; aceptado el 7 de enero de 2014

Resumen

Este texto describe el marco normativo desarrollado en el EC-7, basado en el método de los coeficientes parciales, e indica el contenido formal que debe tener el Anejo Nacional, que hace referencia, desde un punto de vista conceptual, a dos aspectos básicos:

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

La elección de los parámetros nacionales se ha hecho con el fin de conseguir un nivel de seguridad similar al que se tiene en la práctica geotécnica española habitual.

Las actuaciones geotécnicas que se contemplan en el Anejo Nacional, a través de la definición de sus coeficientes parciales, son: cimentaciones superficiales, cimentaciones profundas por pilotes, estructuras de contención, anclajes y cálculos de estabilidad global y de taludes y terraplenes.

© 2013, Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Eurocódigo 7; Anejo Nacional; Geotecnia; Cimentaciones; Pantallas

Abstract

This paper describes the normative frame developed in EC7, based on the method of partial factors, and explains the formal content that a National Annex must have, which makes reference, from a conceptual point of view, to two basic aspects:

- Design Approach to be adopted in each geotechnical work.
- Values of the partial factors that affect actions or effects of actions, geotechnical parameters and resistances.

The respective decisions have been made with a view to attaining a safety level similar to the level applied in standard Spanish geotechnical practice.

The geotechnical works analyzed in the National Annex, through the determination of the partial factors, are: shallow and pile foundations, retaining structures, anchorages, and overall stability and stability of slopes and embankments.

© 2013, Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Keywords: Eurocode 7; National annex; Geotechnics; Foundations; Retaining structures

1. Anejo Nacional del Eurocódigo 7

1.1. Ideas básicas

El Eurocódigo 7: Proyecto Geotécnico [1] (EC-7) propugna, en concordancia con los demás Eurocódigos estructurales, la utilización del método de los coeficientes parciales para la ve-

rificación de los diferentes estados límite últimos. A este respecto, el EC-7 distingue los siguientes tipos de estados límite últimos: de equilibrio estático (tipo EQU), de rotura o deformación excesiva de un elemento estructural (tipo STR) o de una sección del terreno (tipo GEO), de comprobación hidráulica de la subpresión (tipo UPL) y de fallo por levantamiento o inestabilidad (tipo HYD).

En el caso de los estados límite últimos de rotura o deformación excesiva (STR y GEO), la verificación se realiza mediante la 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.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: jose.estaire@cedex.es (J. Estaire Gepp).

Por su parte, 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 elegidos 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 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 exigido que debe tener 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.

1.2. El Anejo Nacional Español

1.2.1. Introducción

El Anejo Nacional Español se ha redactado por un comité formado básicamente por personal técnico del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, 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 ha sido definir tanto el enfoque de proyecto a utilizar en cada caso como los valores de los coeficientes parciales para cada una de las actuaciones geotécnicas recogidas explícitamente en el EC-7 [1-3].

La determinación de los valores de los coeficientes parciales se ha realizado teniendo como principio básico que se consiga un nivel de seguridad similar al que se tiene en la práctica geotécnica española habitual.

Sin embargo, el primer problema que se plantea para conseguir dicho objetivo 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 R.O.M. 0.5-05 [4], la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera [5] y el Código Técnico de la Edificación [6], que presentan diferentes formulaciones que conducen, en ocasiones y como es bien sabido, a dimensionamientos dispares.

1.2.2. Enfoque de proyecto

El análisis de los diferentes Enfoques de Proyecto existentes en el EC-7 ha hecho que el Anejo Nacional Español haya optado 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 ha optado por el Enfoque de Proyecto 3.

Cabe recordar que, con objeto de dar cabida a las diferentes maneras de abordar el dimensionamiento geotécnico existentes en los distintos países, el EC-7 define tres Enfoques de Proyecto distintos que 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 simplificadamente en la tabla 1.

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.

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 este 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, siguiendo los criterios emanados en el Eurocódigo 1 de «Acciones en estructuras».

Como referencia de lo preconizado en el Anejo Nacional Español, en la tabla 2 y en la figura 1 se recogen los Enfoques de Proyecto elegidos por el resto de países que han adoptado los Eurocódigos como marco normativo.

Tabla 1

Uso de los coeficientes parciales de seguridad en los diferentes Enfoques de Proyecto

| Enfoque de Proyecto | Mayoración de acciones | Minoración de parámetros geotécnicos | Minoración de resistencias |
|---------------------|------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 1 | X | | |
| Combinación 1 | | | |
| Combinación 2 | | | |
| 2 | X ^b | X | X ^a |
| 3 | X ^b | X | X |

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

Tabla 2
Enfoques de Proyecto elegidos por los diferentes países europeos

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

Nota: El Enfoque de Proyecto 2* es una variante del Enfoque de Proyecto 2.

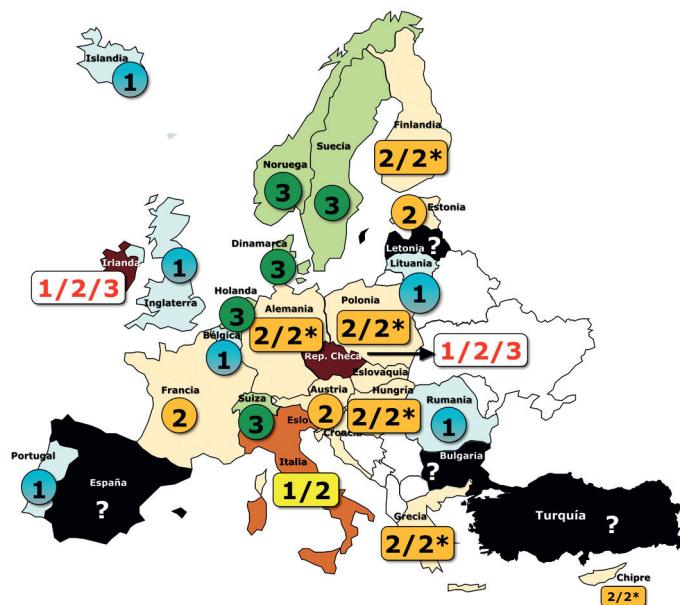


Figura 1. Enfoques de Proyecto elegidos en los Anejos Nacionales de los diferentes países europeos (Tomada de [7]).

Nota: El enfoque de proyecto 2* es una variante del enfoque de proyecto 2.

1.2.3. Valores de los coeficientes parciales de mayoración de acciones o de efecto de acciones

Una vez optado por el Enfoque de Proyecto 2, el siguiente paso fue determinar los valores de los coeficientes parciales de mayoración de acciones o de efecto de acciones. Para ello, primordialmente, 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 Ecuación 1, tomada del EC-0 «Bases de cálculo de estructuras»:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

donde γ_G , γ_p y 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.

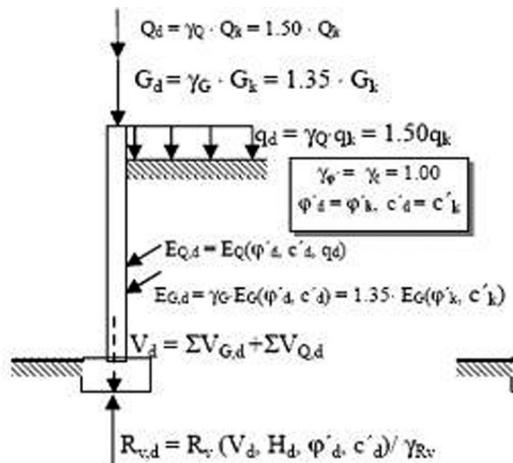


Figura 2. Método de mayoración de acciones para la verificación del estado límite de hundimiento de una cimentación superficial (por simplicidad, solo se muestran las acciones verticales desfavorables) (Tomada de [8]).

En la figura 2 se muestra esquemáticamente esta forma de cálculo, considerando únicamente por simplicidad las cargas verticales, donde V_d es el efecto de las acciones y $R_{v,d}$ es la resistencia de cálculo del terreno frente a las acciones verticales.

En el Anejo Nacional se ha optado por considerar que los valores de los coeficientes parciales para las acciones deben ser los recogidos en el Anejo Nacional Español del Eurocódigo EC-1 «Acciones en estructuras».

Esta elección se ha realizado para cumplir fielmente la filosofía de los Eurocódigos, en el sentido de considerar toda la estructura, incluida la cimentación, como un todo único 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.

1.2.4. 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 consistió en determinar los valores de los coeficientes de minoración de resistencias (γ_R) para las diferentes actuaciones geotécnicas recogidas explícitamente en el EC-7 que son las

siguientes: cimentaciones superficiales y profundas, taludes y estabilidad global, estructuras de contención tipo pantallas y anclajes.

Este paso es el que se desarrolla más pormenorizadamente en los siguientes apartados.

2. Cimentaciones superficiales

2.1. 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, junto con el correspondiente al deslizamiento por la base.

Por su parte, el estado límite de vuelco rígido es un estado límite de equilibrio (tipo EQU) en el que las resistencias de los materiales no intervienen, 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» [9].

2.2. Estado límite último de hundimiento

2.2.1. Determinación de la capacidad portante a partir de fórmulas analíticas

El estudio del estado límite de hundimiento se realizó mediante el análisis de las expresiones contenidas en la figura 3, 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[1-3] con el Enfoque de Proyecto 2.

El esquema comparativo de ambos métodos de dimensionamiento lleva a la conclusión de que el coeficiente global (FS) habitualmente utilizado, es, en realidad, equivalente al producto del coeficiente parcial de acciones (γ_F) y de resistencias (γ_R). Esto

implica que la incertidumbre con la que se plantea habitualmente el dimensionamiento con el método de los coeficientes globales se debe considerar dividida, al aplicar el EC-7, en dos partes: una parte que afecta a la cuantificación de las cargas y otra parte que se refiere a la determinación de las resistencias del terreno. Por tanto, el uso de la expresión anterior [FS = $\gamma_R \gamma_F$] permite determinar el coeficiente parcial de minoración de resistencias si se tienen en cuenta los valores de los coeficientes parciales de mayoración de acciones y del FS utilizado normalmente.

A este respecto y a efectos cuantitativos globales, se puede hacer la suposición de que, en general, las cargas permanentes suponen 2/3 del total, teniendo el tercio restante carácter variable, por lo que, en ese caso, el coeficiente parcial de acciones γ_F toma un valor medio de 1,40, ya que las acciones variables se mayoran por 1,35 y las permanentes por 1,50. Por otra parte, las normas y guías españolas de carácter geotécnico, en particular la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera [5], aboga por un factor de seguridad frente al hundimiento de 2,60 para la combinación de acciones características, que se puede asimilar a las situaciones persistentes y transitorias.

Por lo tanto, teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, el coeficiente parcial de resistencia se puede obtener tal y como se muestra a continuación:

$$FS = \gamma_R \cdot 1,40 = 2,60 \Rightarrow \gamma_R = 1,85$$

Un esquema semejante de comparación fue el utilizado en la determinación de los coeficientes parciales del Anejo Nacional de Alemania [8]. Este mismo resultado fue obtenido por Estaire y Perucho [10] en un estudio en el que se calcularon unos 60.000 casos diferentes de cimentaciones superficiales de diferentes geometrías y sometidas a distintos sistemas de cargas.

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 1,85.

En la tabla 3 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.

Es conveniente señalar que el valor indicado de este coeficiente en el Anejo Nacional de Alemania es bajo (1,40), comparado con el propuesto en España (1,85), debido a que en ese país el coeficiente de seguridad global utilizado para el estado límite de hundimiento de cimentaciones superficiales era habi-

Tabla 3

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

| País | γ_R |
|--------------------------|------------|
| España | 1,85 |
| EC-7 (valor recomendado) | 1,40 |
| Alemania | 1,40 |
| Francia | 1,40 |
| Chipre | 1,40 |
| Finlandia | 1,55 |
| Italia | 2,30 |

Figura 3. Esquema comparativo del análisis del estado límite último de hundimiento por el sistema habitual español y por el EC-7.

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

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

tualmente de 2,0, tal como puede verse en los valores de la DIN 1054, mostrados en la figura 4. Por su parte, Francia utiliza en el cálculo de hundimiento de cimentaciones superficiales, además de este coeficiente parcial de resistencias, un coeficiente de modelo de valor 1,20, lo que hace que, a efectos comparativos, pueda equipararse a un coeficiente parcial de 1,70.

2.2.2. Determinación de la capacidad portante basada en ensayos geotécnicos de campo

El EC-7 [1-3], 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 cálculo (p_{le}^*) obtenida en un ensayo presiométrico, para obtener la capacidad portante de cálculo (R_d) tal como se recoge a continuación:

$$\frac{R_d}{A} = \sigma_{v,0} + k \cdot p_{le}^* \quad (2)$$

La ecuación 2 implica que no se utiliza ningún coeficiente parcial de resistencias o de materiales en la estimación de la capacidad portante de cálculo.

Esta forma de abordar el cálculo no es equiparable a la práctica geotécnica española, en la que la carga que se estima con esas expresiones se minora posteriormente con un coeficiente de seguridad global que, en muchos casos, toma valor de 3,0. Este aspecto se ha 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 otros ensayos de campo, como pueden ser los ensayos de penetración estática.

2.3. Estado límite último de deslizamiento

El análisis del estado límite de deslizamiento por la base se ha realizado de manera análoga al estado límite de hundimiento, lo que implica la comparación del dimensionamiento de una cimentación superficial frente a dicho estado límite por el método habitual en España y el preconizado en el EC-7, tal como se recoge en la figura 5.

Como puede verse, la comparación lleva a la misma expresión indicada anteriormente para el estado límite de hundimiento. Por

lo tanto, teniendo en cuenta la expresión anterior, los valores del coeficiente parcial de las acciones, indicados anteriormente, y que el coeficiente de seguridad global que se utiliza normalmente en la práctica geotécnica española para este estado límite tiene un valor de 1,50, para las situaciones permanentes y transitorias, el coeficiente parcial de la resistencia (γ_R) toma un valor de 1,10, que es igual al valor recomendado en el Anexo A del EC-7.

2.4. 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.

3. Cimentaciones por pilotes

3.1. Introducción

El tema de las cimentaciones por pilotes se aborda, de manera muy amplia, en el Capítulo 7 del EC-7 [1-3], que comienza con la definición de los estados límite a considerar y con los métodos y consideraciones de cálculo, 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.

| | 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 4. Coeficientes de seguridad DIN 1054 (Nov. 1969) (Tomada de [11]).

| ESPAÑA | EC-7 |
|--|--|
| $FS = \frac{F_{estabilizadoras}}{F_{desestabilizadoras}} \geq 1,5$ | $E_d \leq R_d$ |
| | $E_d = E \cdot \gamma_F$ |
| | $R_d = \frac{W \cdot \lg \delta}{\gamma_R}$ |
| $FS = \frac{W \cdot \lg \delta}{E} \geq 1,5$ | $E_d = R_d \Rightarrow E \cdot \gamma_F = \frac{W \cdot \lg \delta}{\gamma_R}$ |
| | $\frac{W \cdot \lg \delta}{E} = \gamma_F \cdot \gamma_R$ |

Figura 5. Esquema comparativo del análisis del estado límite último de deslizamiento por el sistema habitual español y por el EC-7.

Los diferentes estados límite últimos relativos a cimentaciones por pilotes comprenden 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 6 se muestran esquemáticamente algunos de estos estados límite últimos.

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» [9].

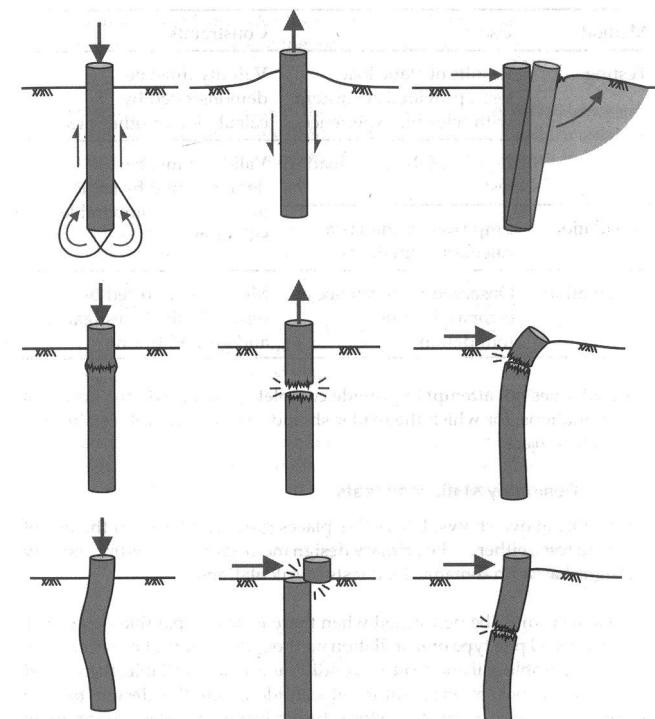


Figura 6. Algunos estados límite de cimentaciones por pilotes (Tomada de [12]).

En lo que respecta a los métodos de cálculo, el dimensionamiento de las cimentaciones por pilotes, de acuerdo con el EC-7, puede realizarse, en términos generales, siguiendo los diferentes métodos recogidos en la tabla 4.

Como se puede deducir de la tabla 4, 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 para la validación del dimensionamiento realizado por métodos empíricos o analíticos, o a partir de ensayos dinámicos de carga. Solo 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 utilizado, 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).

3.2. Estado límite último de hundimiento

3.2.1. Ideas básicas

El estado límite de hundimiento implica la verificación de la 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. La determinación del valor de cálculo de los efectos de las acciones (E_d) ya se ha comentado en el Apartado 1.2.3 de este artículo. Por su parte, el valor de cálculo de la resistencia del terreno que, en este caso, es la capacidad portante de cálculo del terreno ($R_{c,d}$), se obtiene de la suma de la resistencia de cálculo por punta ($R_{b,d}$) y por fuste ($R_{s,d}$), tal como se recoge en la ecuación 3:

$$R_{c,d} = R_{b,d} + R_{s,d} \quad (3)$$

Las resistencias de cálculo por punta y por fuste se obtienen a partir de los valores característicos minorados por el coeficiente parcial de resistencia correspondiente (γ_b para la resistencia por punta y γ_s para la resistencia por fuste), tal como se indica en las expresiones de la ecuación 4:

$$R_{b,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_b}; \quad R_{s,d} = \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} \quad (4)$$

Esta resistencia de cálculo del terreno se puede determinar, de acuerdo con el EC-7, a partir de fórmulas analíticas, de ensayos geotécnicos de campo, de ensayos de carga estática o de

Tabla 4

Métodos de cálculo de las cimentaciones por pilotes

| Método 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 in situ |

ensayos de impacto dinámico, como se desarrolla en los apartados siguientes.

3.2.2. Resistencia última del terreno a partir de fórmulas analíticas

Se debe destacar en primer lugar que este procedimiento de cálculo se considera en el EC-7 un «procedimiento alternativo» que se desarrolla únicamente en la cláusula 7.6.3.2 [8]. Sin embargo, en España es el procedimiento más utilizado para el dimensionamiento de pilotes.

En este método de cálculo, los valores representativos o característicos de las resistencias por punta y fuste se pueden obtener de las formulaciones analíticas que se consideren convenientes, ya sean las indicadas en la Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera [5] en la ROM 0.5-05 [4], en el Código Técnico de la Edificación [6] o en cualquier otro texto, dado que el EC-7 no fija ninguna referencia en este aspecto.

Además, se deberá, de acuerdo con 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 de cálculo por punta y por fuste se obtienen a partir de las expresiones siguientes:

$$R_{b,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_b \cdot \gamma_{R,d}}; \quad R_{s,d} = \frac{R_{s,k}}{\gamma_s \cdot \gamma_{R,d}} \quad (5)$$

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:

$$R_{b,k} = A_b \cdot q_{b,k}; \quad R_{s,k} = \sum_i A_{s,i} \cdot q_{s,i,k} \quad (6)$$

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 ecuaciones 7 y 8, similares a la ecuación anteriormente deducida para las cimentaciones superficiales:

$$\text{Resistencia por punta} \Rightarrow FS_b = \gamma_F \cdot \gamma_b \cdot \gamma_{R,d} \quad (7)$$

$$\text{Resistencia por fuste} \Rightarrow FS_s = \gamma_F \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{R,d} \quad (8)$$

Tabla 5

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

| Concepto | Símbolo | Pilotes hincados | Pilotes perforados | Pilotes de barrena continua con control de parámetros | Pilotes de barrena continua sin control de parámetros |
|-----------------------|----------------|------------------|--------------------|---|---|
| Resistencia por punta | γ_b | 1,25 | 1,35 | 1,45 | 1,50 |
| Resistencia por fuste | γ_s | 1,05 | 1,10 | 1,15 | 1,20 |
| Modelo | $\gamma_{R,d}$ | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,40 |
| Resistencia total | γ_t^* | 1,15 | 1,25 | 1,30 | 1,35 |

Nota: *Coeficiente de minoración de resistencia total, comentado posteriormente y utilizado en el método de cálculo basado en ensayos geotécnicos de campo.

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.

El uso de estas expresiones permite determinar los coeficientes parciales de resistencia por punta y por fuste, si se realizan las siguientes consideraciones:

- Los valores de los coeficientes parciales de mayoración de acciones son los recogidos en el Anejo Nacional del EC-1 [13].
- En la práctica geotécnica habitual española se suelen utilizar valores distintos para el factor de seguridad global de resistencia por punta y por fuste, aunque existen argumentos para considerar que estos valores, en un estado límite último, deberían ser iguales.
- Unos valores de coeficientes de seguridad global que se pueden derivar de lo indicado en la Guía de Cimentaciones de Obras de Carreteras, para pilotes perforados, serían: 2,60 para la resistencia por punta y de 2,15 para la resistencia por fuste.
- Se ha elegido para el coeficiente de modelo un valor de 1,40 para que coincida con los valores de los coeficientes de correlación ξ_3 y ξ_4 , comentados posteriormente y, de esta forma, haya una cierta continuidad entre los resultados obtenidos mediante el método de cálculo a partir de fórmulas analíticas y a partir de ensayos geotécnicos de campo.

Teniendo en cuenta las observaciones anteriores, en el Anejo Nacional Español se proponen, para los pilotes perforados, unos coeficientes parciales de resistencia por punta y por fuste de 1,35 y 1,10 respectivamente.

Por otra parte, con objeto de tener en cuenta el diferente grado de incertidumbre asociado a la ejecución de los distintos tipos de pilotes (pilotes hincados y pilotes barrenados con y sin control de parámetros de ejecución), el Anejo Nacional ha optado por dar valores diferentes de los coeficientes parciales para dichos tipos de pilotes, tal como se recoge en la tabla 5.

Como se puede comprobar, los coeficientes parciales para los pilotes hincados son menores que los de los pilotes perforados dado que se consideran más seguros por su método de ejecución mientras que los correspondientes a los pilotes barrenados son mayores por su mayor incertidumbre en la ejecución.

Por último, con objeto de comparar la propuesta española con las de otros países, en la tabla 6 se recogen los valores indicados en los anejos nacionales de países que han elegido el Enfoque de Proyecto 2.

Tabla 6

Valor del coeficiente parcial de resistencias en el dimensionamiento del estado límite de hundimiento de pilotes perforados

| País | γ_b | γ_s | γ_t^a | $\gamma_{R,d}$ |
|--------------------------|--|--|--|--|
| España | 1,35 | 1,10 | 1,25 | 1,40 |
| 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 |
| Francia | 1,60 | 1,30 | 1,45 | $\geq 1,00$ |
| Chipre | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,25 |
| Finlandia | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,60 ^f 1,95 ^g |
| Italia | 1,35 | 1,15 | 1,25 | 1,00 1,40 ^h |

^aCoeficiente de minoración de resistencia total, comentado posteriormente; ^buso de ensayos estáticos y dinámicos de carga; ^cen base a parámetros del terreno; ^del EC-7 indica que podrán ser necesarios valores superiores a 1,00 cuando la resistencia se obtenga a partir de parámetros del terreno; ^ea partir de ensayos dinámicos, $\gamma_{R,d} = 0,85 \times 1,20$; ^fpara pilotes a fricción; ^gpara pilotes en terrenos cohesivos a corto plazo; ^hpara pilotes en terrenos cohesivos a largo plazo.

3.2.3. 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 [14,15].

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:

$$R_{c,k} = R_{b,k} + R_{s,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{\text{medio}}}{\xi_3}, \frac{(R_{c,cal})_{\text{min}}}{\xi_4} \right\} \quad (9)$$

siendo $(R_{c,cal})_{\text{medio}}$ y $(R_{c,cal})_{\text{min}}$ 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 «perfils de terreno» que se hayan obtenido con los ensayos, tal como se refleja en la tabla 7.

Dada la falta de experiencia en España de esta forma de cálculo, el Anejo Nacional ha optado por mantener los valores propuestos en el Anexo A del EC-7. Como puede verse en la

Tabla 7

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

| Número de perfils de ensayos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | > 10 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| ξ_3 | 1,40 | 1,35 | 1,33 | 1,31 | 1,29 | 1,27 | 1,25 |
| ξ_4 | 1,40 | 1,27 | 1,23 | 1,20 | 1,15 | 1,12 | 1,08 |

tabla 7, los coeficientes de correlación van disminuyendo a medida que se va aumentando el número de ensayos realizados.

A efectos comparativos, en la figura 7 se muestran los valores del coeficiente de minoración ξ_3 preconizados por distintos países en sus anejos nacionales.

Una vez obtenida la capacidad portante característica del terreno, la capacidad portante de cálculo se obtiene minorando dicho valor por el coeficiente de minoración de resistencias (γ_t), tal como se indica en la ecuación 10:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} \quad (10)$$

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, varía entre 1,15 y 1,35 para los diferentes tipos de pilotes, tal como se indicaba en la tabla 5. Estos valores se han adoptado como valores intermedios entre los correspondientes a la resistencia por punta y fuste. En la tabla 6, recogida anteriormente, figuran los valores de este coeficiente de minoración de resistencias total 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 «perfils de terreno» no se relaciona con las dimensiones del solar en el que se im-

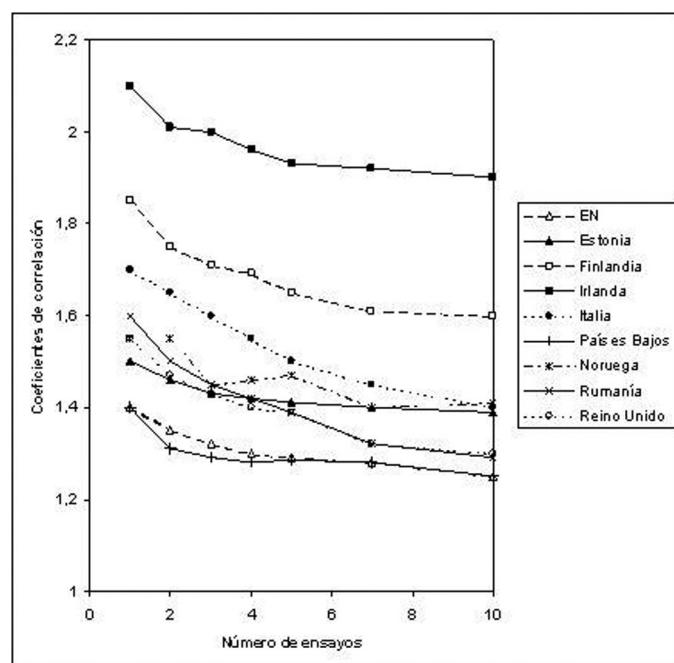


Figura 7. Valores del coeficiente de correlación ξ_3 preconizados por distintos países en sus anejos nacionales [16].

planta 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 con el 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.

3.2.4. Resistencia del terreno a partir de ensayos de carga estática

En este procedimiento de cálculo, el valor representativo o característico de la capacidad portante última del terreno será el menor de los dos valores siguientes:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{\text{medio}}}{\xi_1}, \frac{(R_{c,m})_{\text{min}}}{\xi_2} \right\} \quad (11)$$

Tabla 8

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 |

siendo $(R_{c,m})_{\text{medio}}$ y $(R_{c,m})_{\text{min}}$ 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 8.

Al igual que anteriormente, dada la falta de experiencia en España con este método de dimensionamiento, se han elegido los mismos valores que figuran en el EC-7, valores que disminuyen a medida que se va aumentando el número de ensayos realizados.

Una vez obtenida la capacidad portante característica del terreno, la capacidad portante de cálculo se obtiene dividiendo dicho valor por el coeficiente de minoración de resistencias (γ_r), cuyo valor ya se ha indicado anteriormente en la tabla 5.

La utilización de los valores anteriormente indicados es aproximadamente equivalente, en función de la distribución de cargas permanentes y transitorias, en cada caso, 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.

Por último, en la figura 8 se muestran los valores de los coeficientes de minoración ξ_1 y ξ_2 preconizados por distintos países en sus anejos nacionales.

3.2.5. Resistencia del terreno a partir de ensayos de impacto dinámico

El EC-7 también permite determinar el valor representativo o característico de la capacidad portante última del terreno a partir de ensayos dinámicos de impacto, de acuerdo con la ecuación 12:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{\text{medio}}}{\xi_5}, \frac{(R_{c,m})_{\text{min}}}{\xi_6} \right\} \quad (12)$$

siendo $(R_{c,m})_{\text{medio}}$ y $(R_{c,m})_{\text{min}}$ los valores medio y mínimo de los resultados obtenidos en los ensayos, y ξ_5 y ξ_6 unos coeficientes parciales que dependen del número de pilotes ensayados, tal como se refleja en la tabla 9.

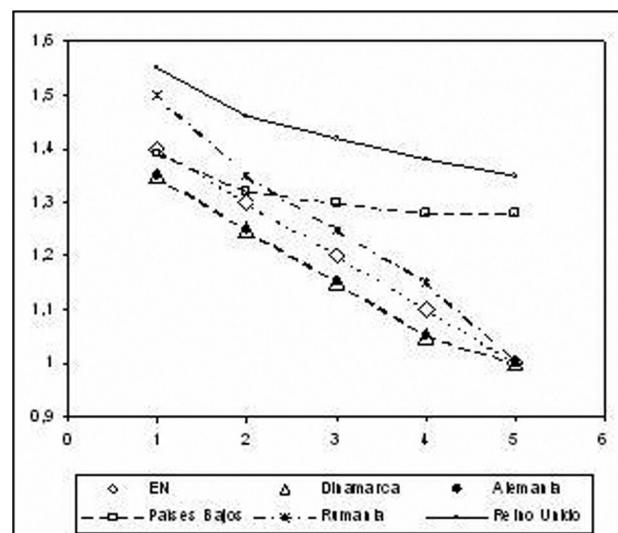
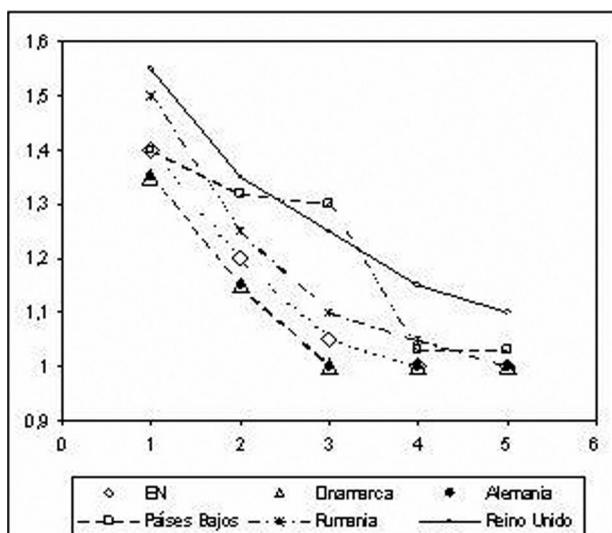


Figura 8. Valores de los coeficientes de minoración ξ_1 y ξ_2 preconizados por distintos países en sus anejos nacionales [16].

Tabla 9

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_6 | 1,50 | 1,35 | 1,30 | 1,25 | 1,25 |

Al igual que en el método anterior, se ha considerado conveniente utilizar los mismos valores que figuran en el EC-7, que van disminuyendo con el número de ensayos realizados.

Una vez obtenida la capacidad portante característica del terreno, la capacidad portante de cálculo se obtiene dividiendo dicho valor por el coeficiente de minoración de resistencias (γ_r).

3.3. Estado límite último de arrancamiento (pilotes a tracción)

El estado límite último de arrancamiento está basado en la resistencia de un pilote a tracción, la cual se debe únicamente a su resistencia por fuste, tal como se indica en la cláusula 7.6.3.3.(3), por lo que todo lo indicado anteriormente sobre la determinación de la resistencia por fuste es aplicable.

La única variación es el coeficiente parcial de resistencia por fuste que para pilotes a tracción pasa a ser el factor $\gamma_{s,t}$ cuyos valores se recogen en la tabla 10.

Respecto al cálculo de la resistencia a tracción, hay que tener en cuenta, como indica la Guía de Cimentaciones de Obras de Carreteras (Cap. 5.11), que «la resistencia por fuste en condiciones de tiro es claramente menor que en condiciones de compresión», por lo que limita dicha resistencia por fuste al 70% de su valor. Por su parte, la ROM 0.5-05 la limita al 50%.

3.4. Estado límite último de capacidad portante por rotura horizontal del terreno

El estado último de capacidad portante por rotura horizontal del terreno está tratado en el EC-7 en el apartado 7.7, titulado «Pilotes cargados lateralmente», en el que se indica que se deben tener en cuenta dos posibles mecanismos de rotura: para pilotes cortos se debe analizar la rotura del terreno, mientras que para pilotes largos, el mecanismo de fallo básico es la capacidad estructural del pilote.

La verificación de este estado límite último para pilotes cortos debe hacerse mediante la expresión $F_{tr,d} \leq R_{tr,d}$, donde $F_{tr,d}$ es el valor de cálculo de la carga transversal aplicada al pilote y $R_{tr,d}$ es el valor de cálculo de la carga que agota la resistencia horizontal del terreno. El valor característico de esta carga ($R_{tr,k}$) puede determinarse utilizando los conocidos ábacos de

Broms [17,18] o el método recogido en la figura 9, procedente de la Guía de Cimentaciones de Obras de Carreteras.

El único elemento que quedaría por determinar, para adecuar este método de cálculo al marco normativo del EC-7, sería el valor del coeficiente parcial de resistencia para esta situación de cálculo ($\gamma_{R,tr}$). Este paso podría hacerse aplicando un esquema similar al planteado para el estado límite de hundimiento en cimentaciones superficiales que da lugar a la siguiente expresión:

$$FS_{tr} = \gamma_F \cdot \gamma_{R,tr} \quad (13)$$

Por una parte, el coeficiente parcial de acciones γ_F toma un valor medio de 1,40, como se exponía anteriormente. Por otra parte, las normas y guías españolas de carácter geotécnico abogan por un factor de seguridad a la rotura horizontal del terreno muy variable: Código Técnico de Edificación: 3,50; Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras: 2,60 y ROM 0.5-05: 1,60. Teniendo en cuenta dichos valores, se ha considerado adecuado que el coeficiente parcial de resistencia ($\gamma_{R,tr}$) para este estado límite tome un valor de 2,0, independientemente del tipo de pilote que se esté analizando.

Por lo que respecta a los pilotes largos, dado que el mecanismo de fallo suele ser la capacidad estructural del pilote, el problema se transforma en la determinación de la ley de momentos flectores actuantes. Para ello se puede utilizar el método de la longitud equivalente tal como se indica, por ejemplo, en la figura 10 tomada de la Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras.

3.5. Comentario sobre el cálculo estructural de los pilotes

El cálculo estructural de los pilotes se comenta en un anexo (del tipo NCCI, acrónimo, en terminología inglesa, de «Información Complementaria, No Contradicatoria») en el que lo primero que se indica es que «el proyecto, la ejecución, la supervisión y el control de los pilotes se deben hacer de acuerdo con la norma UNE-EN 1536 “Ejecución de trabajos especiales de geotecnia: Pilotes perforados” y al EC-2 “Proyecto de Estructuras de hormigón”».

Posteriormente se recoge la expresión procedente del EC-2 que se utiliza para determinar 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 de hormigón:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c \cdot k_f} \cdot f_{ck} \quad (14)$$

Tabla 10

Valores de los coeficientes parciales de minoración de resistencia para el cálculo de pilotes a tracción

| Concepto | Símbolo | Pilotes hincados | Pilotes perforados | Pilotes de barrena continua con control de parámetros | Pilotes de barrena continua sin control de parámetros |
|---|----------------|------------------|--------------------|---|---|
| Resistencia por fuste en pilotes a tracción | $\gamma_{s,t}$ | 1,05 | 1,10 | 1,15 | 1,20 |

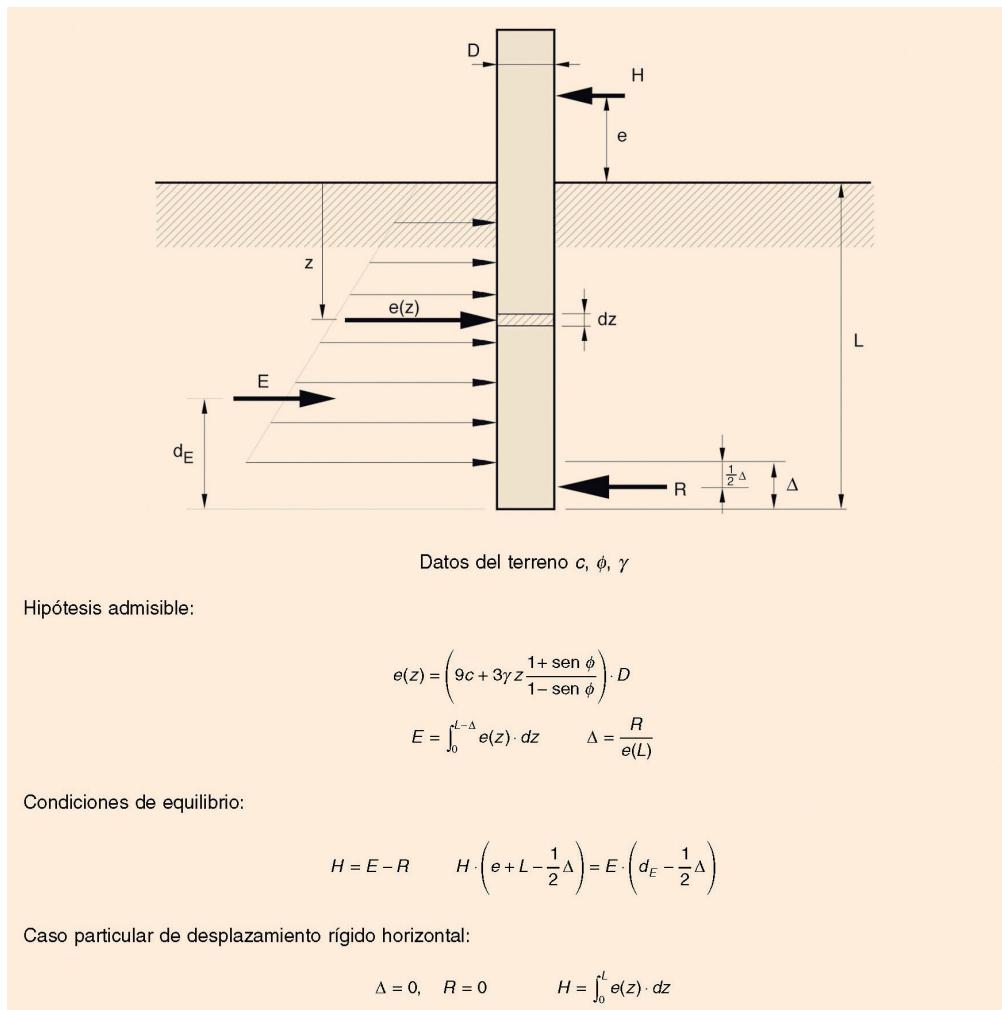


Figura 9. Determinación de la rotura horizontal del terreno causado por una fuerza horizontal actuando sobre un pilote [Tomada de la Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras].

siendo α_{cc} un 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; γ_c el coeficiente parcial de resistencia del hormigón; f_{ck} el valor característico de la resistencia a compresión del hormigón y k_f un coeficiente que multiplica al coeficiente parcial de seguridad del hormigón para la obtención de la resistencia de pilotes hormigonados in situ sin encamisado permanente (apdo. 2.4.2.5 de la UNE-EN 1992-1-1). Se ha establecido que el valor de k_f debe ser igual a 1,25.

Por último, se han incluido unas notas aclaratorias sobre la forma de interpretar el concepto de «topo estructural» en el marco conceptual de los Eurocódigos. A este respecto, el valor del «topo estructural» se puede equiparar al límite que se puede imponer a la «tensión media de compresión que actúa sobre la sección del pilote para la combinación casi-permanente de acciones», lo que representa una verificación en Estado Límite de Servicio. Se indica que queda al criterio del proyectista la posible limitación de dicha tensión media de compresión, aunque se recogen los valores habitualmente utilizados en España para los diferentes tipos de pilotes.

4. Estructuras de contención tipo pantalla

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 las pantallas, que son los siguientes: la estabilidad propia de la pantalla, la estabilidad del fondo de la excavación, la estabilidad global y la estabilidad estructural.

El estado límite último correspondiente a la estabilidad propia de la pantalla es, en general, el más determinante y específico de esta actuación geotécnica.

Por su parte, el estado límite correspondiente a la estabilidad del fondo de la excavación es un estado límite hidrodinámico (tipo HYD) originado por las filtraciones de agua. El estado límite de estabilidad global se debe analizar con el Enfoque de Proyecto 3, como se decía anteriormente; mientras que el estado límite de estabilidad estructural se debe analizar como una estructura bien de hormigón armado, mediante el EC-2 «Pro-

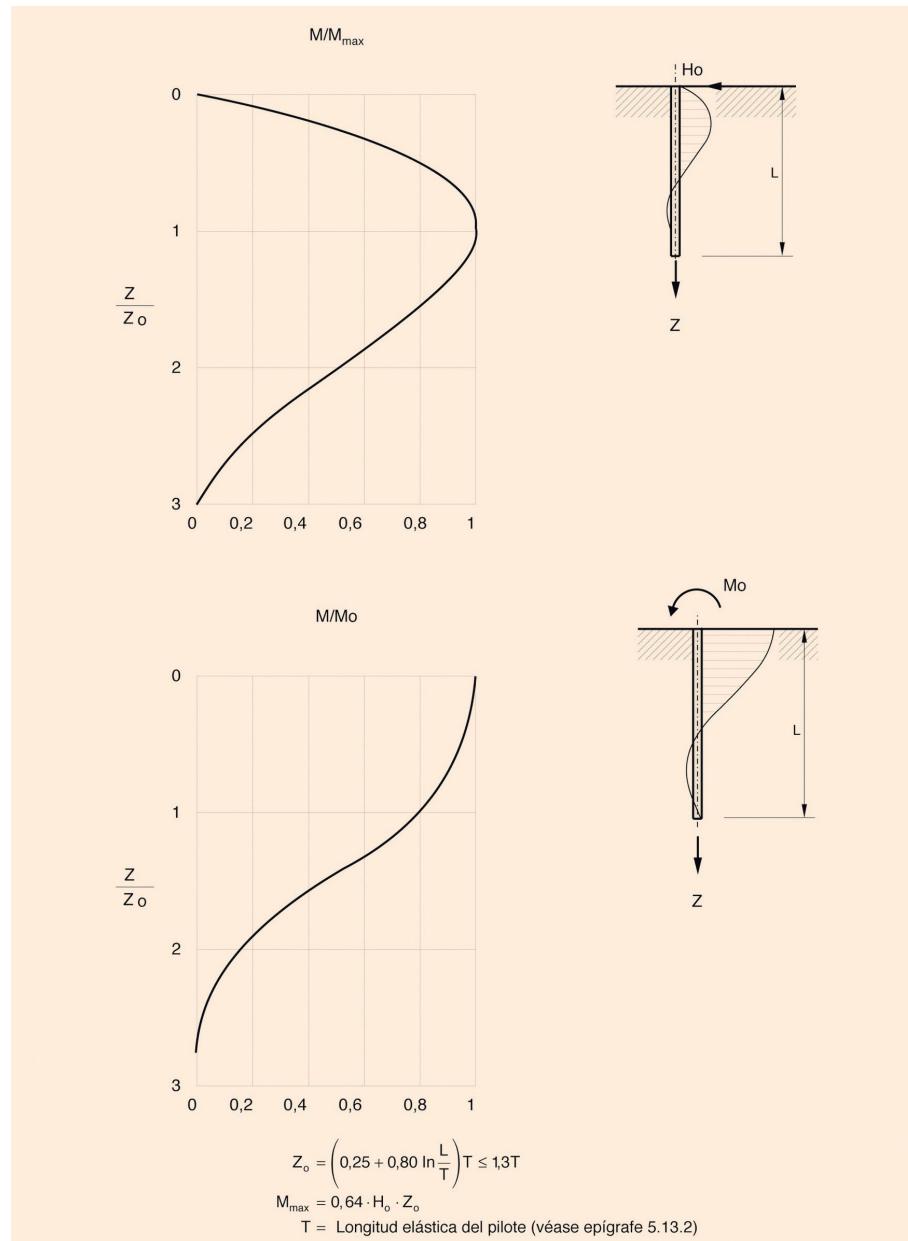


Figura 10. Determinación de las leyes de momentos flexores actuantes a lo largo del pilote debidas a una carga horizontal y un momento aplicado en la cabeza del pilote. [Tomada de la Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras].

yecto de estructuras de hormigón» [9], o bien de acero, mediante el EC-3 «Proyecto de estructuras de acero».

4.2. Estado límite de estabilidad propia de la pantalla

4.2.1. Introducción

En el cálculo de pantallas, el coeficiente parcial de resistencia (γ_R) que se debe utilizar es el aplicable a la minoración del empuje pasivo que aparece en la zona empotrada de la pantalla.

La determinación de dicho coeficiente parcial se ha realizado mediante el análisis de tres situaciones diferentes de una pantalla en voladizo que se pueden resolver analíticamente con

facilidad: sin sobrecargas y con nivel freático profundo; con sobrecargas permanentes o variables y nivel freático profundo, y sin sobrecargas y con nivel freático somero.

En estos tres casos sencillos se determina analíticamente la longitud de la pantalla aplicando equilibrio de momentos respecto al pie teórico de cálculo de la pantalla. El resultado del cálculo, además de dicha longitud, es la ley de momentos flexores y esfuerzos cortantes con los que se debe dimensionar estructuralmente la pantalla. Hay que recordar que la longitud que se haya obtenido en el cálculo se debe incrementar en un 20% para que se cumpla el equilibrio de fuerzas horizontales, aspecto este que debe realizarse también en los cálculos basados en el modelo de cálculo del EC-7 [1-3].

4.2.2. Pantalla en voladizo sin sobrecargas y con nivel freático profundo

En la figura 11 se muestra el esquema de la situación de cálculo así como las ecuaciones correspondientes de acuerdo con la práctica geotécnica habitual española y al método del EC-7.

Cabe destacar que en la práctica geotécnica habitual española el concepto de seguridad es diferente del empleado en el EC-7. En la normativa española la seguridad se incorpora en los cálculos minorando el empuje pasivo por un coeficiente generalmente de 1,50 que se constituye como el factor de seguridad del cálculo. Por su parte, el marco conceptual del EC-7 implica que hay que realizar una mayoración del empuje activo por un coeficiente (γ_G) de valor igual a 1,35, dado que se considera dicho empuje como una acción permanente desfavorable. Simultáneamente, se debe realizar una minoración del empuje pasivo por un coeficiente (γ_R) que se deja a elección en cada país para ser recogido en su Anejo Nacional

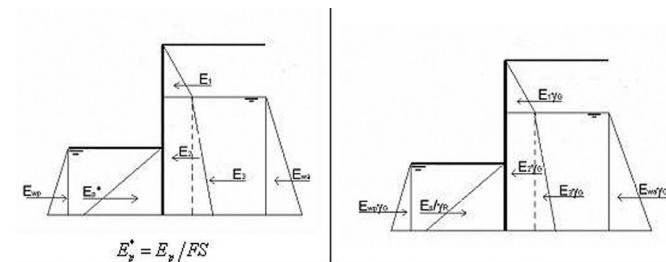


Figura 11. Expresiones de cálculo de la estabilidad de una pantalla en voladizo, sin sobrecarga y con el nivel freático somero según la práctica geotécnica habitual española y según el método del EC-7.

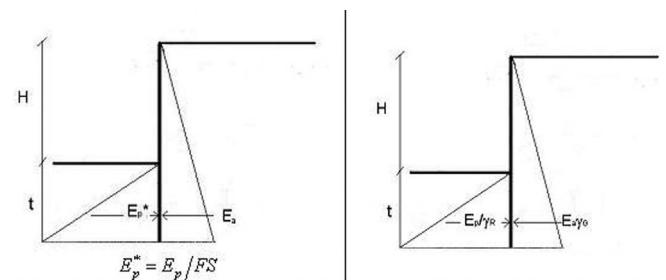


Figura 12. Expresiones de cálculo de la estabilidad de una pantalla en voladizo sin sobrecarga y con el nivel freático profundo según la práctica geotécnica habitual española y según el método del EC-7.

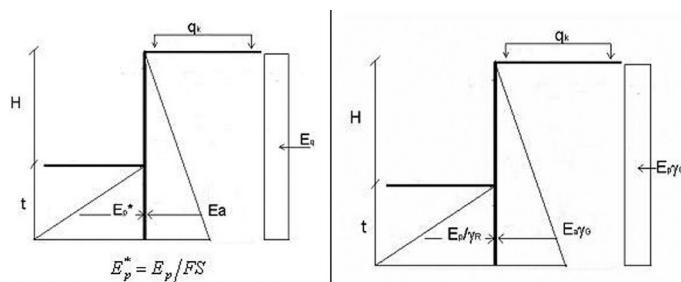


Figura 13. Expresiones de cálculo de la estabilidad de una pantalla en voladizo con sobrecarga y con el nivel freático profundo según la práctica geotécnica habitual española y según el método del EC-7.

y cuyo valor se ha deducido de las expresiones recogidas en la figura 12.

Como puede apreciarse, al igualar las profundidades teóricas de la pantalla de acuerdo con la práctica geotécnica española y con el EC-7, se obtiene que el valor del coeficiente parcial de resistencia, aplicable al empuje pasivo, toma el valor de 1,10.

4.2.3. Pantalla en voladizo con sobrecargas permanentes o variables y nivel freático profundo

En la figura 13 se muestra un esquema de la situación de cálculo junto con las ecuaciones correspondientes aplicables de acuerdo con la práctica geotécnica habitual española y con el marco conceptual del EC-7.

La diferencia con el caso anterior radica en la existencia adicional de un empuje activo debido a las sobrecargas. En el caso del EC-7, este empuje debe mayorarse, al ser una acción desfavorable, por un coeficiente parcial de acciones que toma el valor de 1,35 ó 1,50 en función del carácter permanente o variable, respectivamente, de dicha sobrecarga.

Como puede apreciarse, en el caso de una sobrecarga permanente, el coeficiente parcial de resistencia que se deduce de las expresiones toma el valor de 1,10.

Sin embargo, en el caso de una sobrecarga variable, la comparación de las expresiones recogidas en la figura indica que existe una relación entre el valor que debe adoptar dicho coeficiente parcial y el valor de la sobrecarga, de tal manera que se puede deducir que cuanto mayor es el valor de la sobrecarga q , más pequeño debería ser el valor del coeficiente parcial para que los cálculos efectuados por ambos métodos (español y EC-7) den lugar a los mismos resultados.

Una serie de cálculos realizados por los autores permite afirmar que el considerar un coeficiente parcial de resistencia de valor 1,10 en los casos de sobrecarga variable conduce a longitudes de pantalla alrededor de un 5% superior, en el caso de los cálculos de EC-7, para una pantalla de 5 m de voladizo y sobrecargas de hasta 250 kPa.

4.2.4. Pantalla en voladizo sin sobrecargas y con nivel freático somero

En la figura 11 se muestra un esquema de la situación de cálculo junto con las ecuaciones a utilizar según la práctica geotécnica habitual española y el método del EC-7.

El aspecto más destacable de este caso es la forma de ponderar los empujes debidos a la presencia de agua, tanto en el trasdós como en el intradós de la pantalla. Esta ponderación debe hacerse de acuerdo con el principio denominado «single-source-principle» (Ap. 2.4.2.9 del EC-7), que establece que todas las acciones que tengan un mismo origen deben ser afectadas por el mismo coeficiente parcial, independientemente de si son favorables o desfavorables. Por lo tanto, de acuerdo con dicho principio, como el empuje del agua en el trasdós y en el intradós tienen el mismo origen, deben ponderarse de igual manera por lo que, dado su carácter global desfavorable y permanente, ambos se ponderan por el mismo coeficiente de mayoración de acciones (γ_G), tal y como aparece en el esquema de cálculo.

Como resumen de los esquemas anteriores se puede establecer que, para que los cálculos realizados según la metodología

de coeficientes parciales propuesta por el EC-7 proporcionen los mismos resultados que los cálculos hechos de acuerdo con la práctica geotécnica habitual española, el coeficiente parcial para la resistencia (γ_R), referente al empuje pasivo, a utilizar en los cálculos de pantalla, debe tomar valor de 1,10, a pesar de la pequeña diferencia que se ha constatado en el caso de existencia de una sobrecarga variable situada en coronación de la pantalla.

5. 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 se mayoran, para este tipo de cálculos de estabilidad, únicamente las acciones variables desfavorables, como pueden ser las sobrecargas de edificación y las cargas de tráfico, mediante el coeficiente parcial de acciones que toma, para estos casos, un valor de 1,30.

Se ha elegido este Enfoque de Proyecto 3 para realizar estos análisis de estabilidad dado que intrínsecamente 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 14.

Los coeficientes parciales de acciones para los cálculos de estabilidad de taludes y estabilidad global de estructuras, realizados de acuerdo con el Enfoque de Proyecto 3, toman los siguientes valores:

- 1,00 para las acciones permanentes, tanto favorables como desfavorables, estructurales o geotécnicas, incluyendo las cargas gravitacionales debidas al peso del terreno o al agua.
- 1,30 para las acciones transitorias desfavorables como son, por ejemplo, las acciones situadas sobre el terreno, tales como las sobrecargas de tráfico o las debidas a las estructuras.
- 0,00 para las acciones transitorias favorables.

Este sistema de mayoración de acciones facilita enormemente los cálculos al hacerlos muy parecidos a la práctica habitual española.

Por su parte, la elección de los valores de los coeficientes parciales en el Anejo Nacional, que afectan a la cohesión, ángulo de rozamiento, resistencia al corte sin drenaje y peso específico aparente, se ha realizado con el criterio general de mantener el mismo nivel de seguridad que se tiene actualmente con la práctica geotécnica habitual. Por esta razón es conveniente, en primer lugar, tener presentes los valores de los factores de seguridad preconizados en los diferentes documentos españoles de carácter geotécnico, tal como se hace en la tabla 11.

La comparación de la tabla 11 y de los parámetros geotécnicos relacionados anteriormente (cohesión, ángulo de rozamiento, resistencia al corte sin drenaje y peso específico aparente) permite comprobar que los valores incluidos en ella no corresponden a los mismos conceptos, por lo que no se pueden equiparar fácilmente. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, dado que el cálculo del factor de seguridad es un cálculo lineal, se obtiene el mismo resultado minorando los parámetros geotécnicos por un determinado valor (por ejemplo: 1,5) y obligando a que el factor de seguridad mínimo sea superior a la unidad

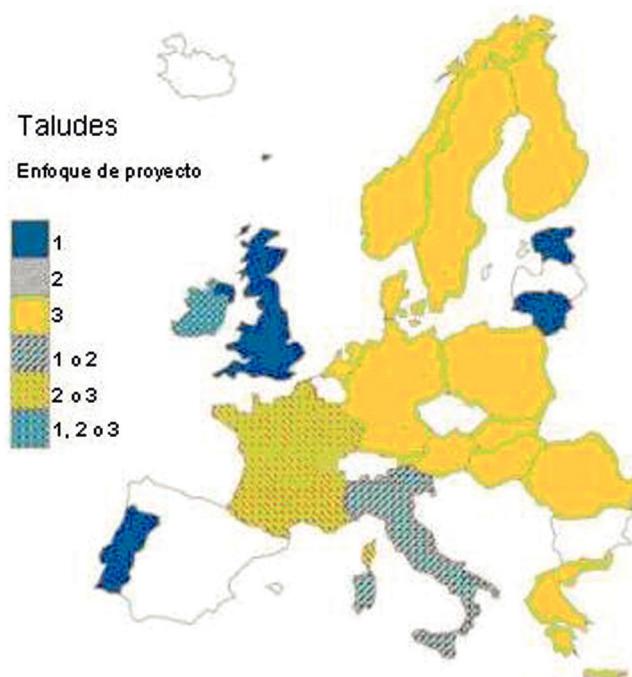


Figura 14. Enfoques de Proyecto elegidos en los Anejos Nacionales de los diferentes países europeos para la estabilidad global y de taludes (Tomada de [16]).

Tabla 11

Valores del factor de seguridad para el ELU de estabilidad global en diferentes documentos españoles de carácter geotécnico

| Combinación de acciones | ROM 0.5-05 | Guía Cimentaciones Obras de Carreteras | Código Técnico Edificación |
|-------------------------|------------|--|----------------------------|
| Quasi-permanente | 1,4 | 1,5 | 1,8 |
| Fundamental | 1,3 | 1,3 | (1) |
| Accidental o sísmica | 1,1 | 1,1 | 1,2 |

Nota 1: El Código Técnico de la Edificación distingue únicamente entre situaciones persistentes o transitorias ($FS = 1,8$) y situaciones extraordinarias ($FS = 1,2$).

que no minorando los parámetros geotécnicos y obligando a que el factor de seguridad obtenido sea superior a ese mismo determinado valor (por ejemplo: 1,5).

Este hecho hace que los cálculos de estabilidad global de estructuras y de estabilidad de taludes y terraplenes se puedan seguir haciendo por el mismo procedimiento que habitualmente, es decir, sin minorar los parámetros resistentes y obligando a que el factor de seguridad que se obtiene de los cálculos de equilibrio límite realizados con un cualquier programa informático sea superior al valor del coeficiente parcial correspondiente.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, en la tabla 12 se recogen los valores de los coeficientes parciales de minoración de parámetros geotécnicos propuestos en el Anejo Nacional para el caso de los cálculos de estabilidad global y de taludes, en función del caso en estudio y de la situación de proyecto que se esté considerando en el cálculo.

El análisis de los valores recogidos en la tabla 12 permite realizar los siguientes comentarios:

- Se puede comprobar que estos valores son prácticamente iguales a los recogidos en la tabla 10, presentada anteriormente, en la que se muestran los factores de seguridad utilizados en la práctica habitual española. Este hecho hace que la utilización del EC-7 vaya a conducir a unos resultados muy parecidos a los obtenidos actualmente.
- La diferencia con los valores recogidos en los documentos geotécnicos existentes radica en las situaciones accidentales. En el caso del Anejo Nacional, los valores son superiores dado que, en el marco de cálculo del EC-7, la situación accidental no incluye la situación de sismo.
- Los valores indicados para el caso general se refieren a taludes de desmontes y a rellenos compactados, por lo que suponen una novedad en el ámbito de la normativa geotécnica española.
- Los valores recogidos en la tabla hace solo referencia a tres parámetros geotécnicos específicos (cohesión, ángulo de rozamiento y resistencia al corte sin drenaje). En el caso de

que se pretenda utilizar otro criterio de rotura diferente al de Mohr-Coulomb, el coeficiente parcial debe entenderse que afecta directamente a la resistencia al corte movilizable (τ).

- Se ha optado por mantener el mismo valor del coeficiente parcial para los parámetros en la situación con drenaje ($c' - \varphi'$) y sin drenaje (c_u) a diferencia de lo preconizado en los Anexos Nacionales de otros países, como se puede apreciar en los valores mostrados en la figura 15. En esos países el coeficiente parcial para minorar la resistencia al corte sin drenaje es mayor que el correspondiente a la pareja ($c' - \varphi'$) debido a la mayor incertidumbre en su determinación y su mayor influencia en los resultados de los cálculos. Sin embargo, como contrapartida a ese hecho, hay que tener en cuenta que la situación sin drenaje se puede considerar con frecuencia una situación transitoria.
- 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, tal como permite el EC-7 en la cláusula 2.4.7.1.

Por otra parte, es importante resaltar que los cálculos retrospectivos de estabilidad se realizan, de acuerdo con el EC-7, con una metodología diferente. Este aspecto está contemplado en la cláusula 11.5.1(8) en la que se indica que «*los coeficientes parciales utilizados normalmente para el análisis de estabilidad global pueden no ser apropiados en estos casos*».

De acuerdo con la interpretación dada por [14] a esta cláusula, en estos casos todos los coeficientes parciales (γ_F , γ_M y γ_R) deben tomar valor unidad ya que el objetivo es determinar los valores reales de resistencia al corte movilizada a lo largo de la

Tabla 12

Valores de los coeficientes parciales de minoración de parámetros geotécnicos (γ_M) a utilizar en el análisis de la estabilidad global y de taludes

| Comprobación | Situación de proyecto | γ_M | | | |
|---|-----------------------|-------------------|--|---------|---------------|
| | | c' ^c | $\operatorname{tg}\varphi'$ ^c | c_u^e | γ_{ap} |
| Caso general ^a | Persistente | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,00 |
| | Transitoria | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,00 |
| | Accidental | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,00 |
| Obra de fábrica o estructura de retención en infraestructura viaria ^b | Persistente | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,00 |
| | Transitoria | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 1,00 |
| | Accidental | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,00 |
| Obra de fábrica o estructura de retención en infraestructura marítima o portuaria | Persistente | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,00 |
| | Transitoria | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 1,00 |
| | Accidental | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,00 |
| Estructura de edificación ^b | Persistente | 1,80 | 1,80 | 1,80 | 1,00 |
| | Transitoria | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,00 |
| | Accidental | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 1,00 |

^aIncluye, entre otros, los casos de talud de desmonte de nueva ejecución (sin estructura en coronación o talud), los rellenos compactados tipo terraplén, pedraplén y todo-uno e infraestructuras hidráulicas de menor importancia, tipo balsas.

^bEl equilibrio global de una obra o estructura situada sobre una ladera natural que tenga condiciones de estabilidad precaria debe considerarse una actuación de Categoría Geotécnica 3 por lo que estos valores pueden no ser de aplicación [Cláusula 2.1.(21) del EC-7].

^cLos valores de los coeficientes parciales γ_M correspondientes a c' , $\operatorname{tg}\varphi'$ y c_u podrán reducirse hasta un 7%, cuando se considere que las repercusiones sociales, ambientales y económicas de la rotura sean reducidas.

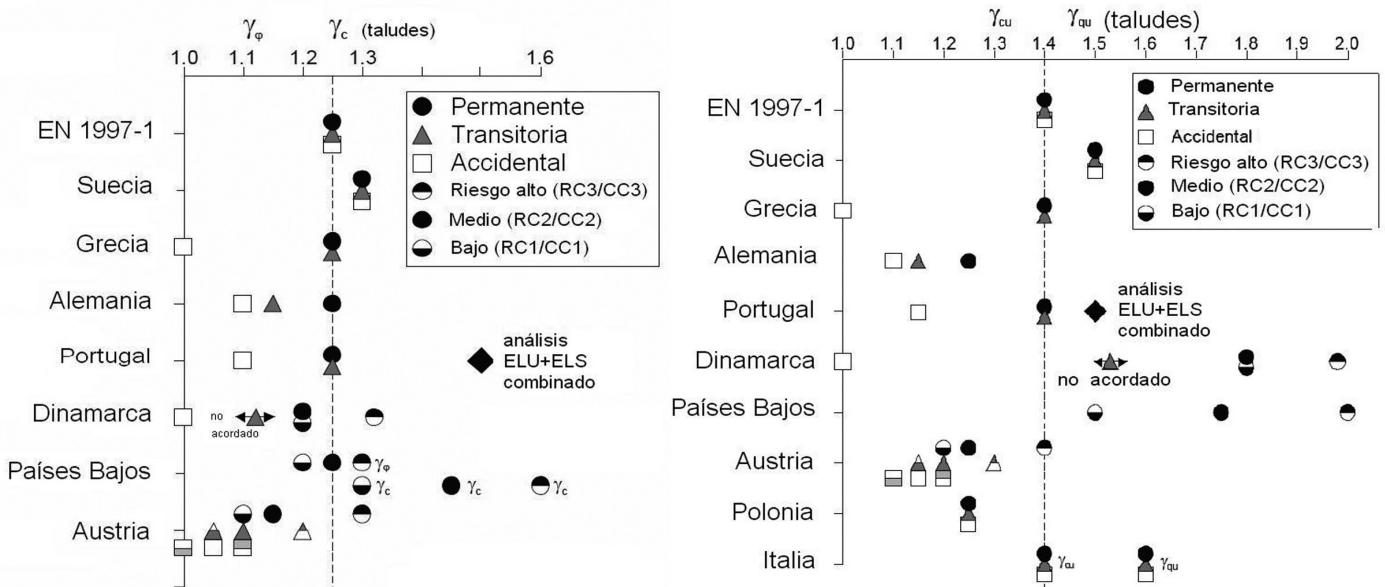


Figura 15. Coeficientes parciales de minoración del ángulo de rozamiento (γ_ϕ) y la cohesión (γ_c) efectivos (fig. 10A) y de la resistencia al corte no drenada (γ_{cu}) (fig. 10B) adoptados por diferentes anejos nacionales europeos [16].

superficie de rotura. Además, dado que el nivel de confianza en estos valores es superior al que se obtiene normalmente con las campañas de reconocimiento, los cálculos posteriores se pueden realizar con unos valores inferiores de los coeficientes parciales que, en este caso, quedan sujetos al criterio del proyectista.

6. Consideraciones sobre la situación sísmica de cálculo

España es un país con un cierto riesgo sísmico por lo que, para completar todas las situaciones de cálculo, se debe abordar, en el proyecto, la situación sísmica. Este aspecto se debe analizar a través del EC-8 «Proyecto de estructuras sismorresistentes» [19] ya que, en la cláusula 1.1.1 (7) del EC-7 [1-3], se dice textualmente que «el EC-7 no trata los requisitos particulares del proyecto sísmico».

Dentro del EC-8, los temas de contenido geotécnico se desarrollan más pormenorizadamente en la Parte 5 «Cimentaciones, estructuras de contención y aspectos geotécnicos», por lo que quedan fuera del ámbito de este texto referido al Anejo Nacional del EC-7.

Sin embargo, es interesante indicar que se está analizando la posibilidad de incorporar los aspectos geotécnicos relacionados con la situación sísmica de cálculo en la futura versión del EC-7 que se está empezando a gestar dentro del Mandato de la Unión Europea para evolucionar el sistema de los Eurocódigos, proceso que podría estar terminado en el año 2020.

7. Agradecimientos

Los autores de este artículo quieren agradecer el trabajo realizado por Gracia Olivenza durante la elaboración del Anejo Nacional y la preparación de este artículo.

Bibliografía

- UNE EN 1997-1: 2010. Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales. Madrid: AENOR; 2010.
- EN 1997-1: 2004. Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1: General rules. Brussels: Comité Europeo de Normalización (CEN); 2004.
- EN 1997-2:2007. Eurocode 7: Geotechnical design. Part 2: Ground investigation and testing. Brussels: Comité Europeo de Normalización (CEN); 2007.
- ROM 0.5-05.: Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. Madrid: Ministerio de Fomento, Puertos del Estado; 2005.
- Guía de cimentaciones en obras de carreteras. Madrid: Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras; 2003.
- Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C (Seguridad estructural - Cimentación). Ministerio de la Vivienda; 2006.
- Bond A. Presentation of Chairman. 27th Meeting of CEN/TC250/SC7, The Hague (Netherlands), marzo 2012.
- Frank R, Schuppener B, Vogt N, Weissenbach A. Design approaches of Eurocode 7 for the verification of ultimate limit states in geotechnical design in France and Germany. Revue Européenne de Génie Civil. 2007;11: 621-41.
- UNE-EN 1991-1-1:2013. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. Madrid: AENOR; 2013.
- Estaire J, Perucho A. Comparación del dimensionamiento de cimentaciones superficiales aplicando el Eurocódigo 7 y las normativas españolas. Revista de Ingeniería Civil. 2008;152:73-85.
- Rodríguez Ortiz JM, Serra J, Oteo C. Curso aplicado de cimentaciones. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos, Servicio de Publicaciones; 1989.
- Bond A, Harris A. Decoding Eurocode 7. London: Taylor & Francis; 2008.
- UNE-EN 1991-1-1:2003. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-1. Acciones generales. Pesos específicos, pesos propios y sobrecargas de uso en edificios. Madrid: AENOR; 2003.
- Frank R, Bauduin C, Driscoll R, Kavvadas M, Krebs N, Orr T, et al. Designers' guide to EN 1997-1. London: Thomas Telford; 2004.
- Orr T. Proceedings of the International Workshop on the Evaluation of Eurocode 7. Dublín; 2005.
- Bond A. Results of the NDP Survey 2009/10. 2nd International Workshop on Evaluation of Eurocode 7, Pavia (Italia), abril 2010.
- Broms B. Lateral resistance of piles in cohesive soils. JSMFE. 1964;90: 27-63, SM2.
- Broms B. Lateral resistance of piles in cohesionless soils. JSMFE. 1964; 90:123-56, SM3.
- UNE-EN 1998-1:2011. Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación. Madrid: AENOR; 2011.