

Normativa europea para el estudio del comportamiento estático y dinámico de los suelos ⁽¹⁾

V. CUÉLLAR (*)

RESUMEN En este documento se analiza la interrelación de tres diferentes Eurocódigos relacionados con la estimación de los parámetros de resistencia del terreno y de los efectos de inercia del suelo en los fenómenos sísmicos. Se muestra asimismo que el Método del Coeficiente de Resistencia, considerado en la nueva versión del Eurocódigo 7, parece ser el más adecuado para estimar las consecuencias reales de la aplicación separada de diversos factores parciales de seguridad, y para ser utilizado como método de referencia en el análisis de otras posibilidades ofrecidas por los Eurocódigos para el estudio de los estados límites últimos del terreno bajo condiciones estáticas y dinámicas.

EUROPEAN CODES FOR THE STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOR OF SOILS

ABSTRACT *In this paper the interrelation among three different Eurocodes for estimating ground strength parameters and soil inertia effects in seismic situations is analysed. It is also shown that in order to estimate the real consequences of partial factors being applied separately, the Resistance Factor Approach considered in the new version of Eurocode 7 appears to be the most realistic and perhaps a reference approach to other possibilities offered by the Eurocodes for the analysis of ground ultimate states under static and dynamic conditions.*

Palabras clave: Normativa; Suelos; Comportamiento estático y dinámico.

1. INTRODUCCIÓN

Desde 1963, la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica viene recopilando un conjunto de normas sismo-resistentes de aplicación en los distintos países afectados por los terremotos. La última versión, publicada en 1992, contiene los códigos sísmicos de 37 países, varios de ellos europeos. El análisis de dichas normas pone de manifiesto que, incluso dentro de Europa, existen grandes diferencias entre las directrices dadas, para paliar el efecto de los terremotos, en los diferentes países. Consciente de este tipo de problemas, la Comisión de la Comunidad Europea (CCE) inició la tarea de establecer un conjunto de normas técnicas armonizadas, conocidas como "Eurocódigos Estructurales", para el cálculo estructural y geotécnico de edificios y obras de ingeniería civil. El objetivo final es el de proporcionar una alternativa común que sustituya a las diferentes normas actualmente en vigor en los distintos estados miembros.

El programa para la aplicación práctica a nivel nacional de los Eurocódigos es el siguiente: Los Eurocódigos se publican primero como Propuestas de Normas Europeas (ENV),

con una vigencia de tres años (mínimo) o cinco años (máximo), con el objeto de que se apliquen experimentalmente y den lugar a comentarios. Después de ello, tras una votación formal, las ENV se convierten en Normas Europeas (EN) o bien se suprimen. En el caso de que se aprueben, cada Norma Europea (EN) será puesta en práctica a nivel nacional, en paralelo con la Norma Nacional previamente existente, por un periodo de cinco años, después del cual las Normas Nacionales sólo serán aplicables en aquellos casos en que las Normas Europeas no incluyan directrices específicas sobre los métodos de cálculo contemplados en las Normas Nacionales.

Un aspecto importante de los Eurocódigos es que ofrecen la oportunidad de incorporar criterios locales. Es decir, contemplan "valores entre corchetes" de los coeficientes de seguridad que afectando a las cargas y a los parámetros de los materiales, pueden ser fijados por las autoridades de cada país, a fin de tener en cuenta las condiciones económicas, sociales y de seguridad de cada uno de ellos.

Actualmente se están preparando, bajo los auspicios del Comité Técnico CEN/TC 250 del CEN (Comité Europeo de Normalización), los diez Eurocódigos Estructurales siguientes:

EN 1990, Eurocódigo 0: Bases de cálculo.

EN 1991, Eurocódigo 1: Acciones.

EN 1992, Eurocódigo 2: Cálculo de estructuras de hormigón.

⁽¹⁾ Conferencia pronunciada en 1999 en la sede del Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa con motivo de la 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering.

(*) Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Ministerio de Fomento).

- EN 1993, Eurocódigo 3: Cálculo de estructuras de acero.
- EN 1994, Eurocódigo 4: Cálculo de estructuras mixtas de acero y hormigón.
- EN 1995, Eurocódigo 5: Cálculo de estructuras de madera.
- EN 1996, Eurocódigo 6: Cálculo de estructuras de ladrillo.
- EN 1997, Eurocódigo 7: Cálculo geotécnico.
- EN 1998, Eurocódigo 8: Cálculo de estructuras resistentes a los terremotos.
- EN 1999, Eurocódigo 9: Cálculo de estructuras de aluminio y de aleaciones.

En relación con este artículo, presentan un interés especial el Eurocódigo 0, la Parte 1 (Normas generales) del Eurocódigo 7 y la Parte 5 (Cimientos, Estructuras de Contención y Aspectos Geotécnicos) del Eurocódigo 8, que complementa la Parte 1 del Eurocódigo 7 relativa al cálculo geotécnico en ausencia de terremotos.

En los párrafos siguientes se comenta la interrelación existente entre estos tres Eurocódigos, en su formulación actual, para estimar la resistencia del terreno bajo cargas sísmicas y para evaluar el efecto que puede tener la inercia del suelo en el cálculo de cimentaciones directas.

2. BASES DE PROYECTO

Uno de los aspectos innovadores de los Eurocódigos consiste en que, al contrario de lo que sucede con el enfoque determinista de los cálculos geotécnicos, (en los que se utilizan valores característicos tanto de las cargas como de los parámetros del material y se aplica un factor global de seguridad al resultado del cálculo), todos los Eurocódigos se basan en los llamados factores de seguridad parciales para la estimación de los valores de cálculo de las cargas, de los parámetros de los materiales y de la resistencia.

Para entender la filosofía general de los coeficientes parciales de seguridad de los Eurocódigos es necesario distinguir entre los "valores característicos" de las acciones F_{rep} , los efectos de las acciones E_k , las propiedades de los materiales X_k y la resistencia R_k por un lado; y por otro lado los "valores de cálculo" de las acciones F_d , de los efectos de las acciones E_d , de las propiedades de los materiales X_d y de la resistencia R_d .

La Parte 1 del Eurocódigo 7 considera el valor característico X_k de un parámetro de un suelo o una roca como una estimación prudente del valor necesario para el análisis de un determinado estado límite. La selección de estos valores debe basarse en los resultados de ensayos de laboratorio y de campo complementados, siempre que sea posible, con experiencia previa contrastada. Si se utilizan métodos estadísticos el valor característico del terreno necesario para el estudio de un determinado problema debe deducirse de tal manera que la probabilidad calculada de que un valor peor rijan la aparición del estado límite considerado no supere el 5%.

El Eurocódigo 0 define los efectos de las acciones (E) como respuestas de la estructura considerada a las acciones que actúan sobre ella. Una vez que se conocen los valores característicos de los parámetros del material que constituye la estructura X_k y de las acciones F_{rep} , los valores característicos de los efectos de las acciones E_k pueden determinarse como:

$$E_k = E(F_{rep}, X_k) \quad [1]$$

Los valores de proyecto de los parámetros del terreno (X_d) se evalúan directamente o bien se deducen a partir de los valores característicos mediante la ecuación:

$$X_d = X_k / \gamma_M \quad [2]$$

donde γ_M es el coeficiente de seguridad parcial de las propiedades del terreno.

Los valores de proyecto de las acciones F_d se definen como:

$$F_d = \gamma_F F_{rep} \quad [3]$$

donde γ_F es el coeficiente de seguridad parcial aplicable a las acciones.

A partir de los valores de cálculo de F_d y X_d se determinan los valores de cálculo de los efectos de las acciones E_d de la siguiente forma:

$$E_d = E(F_d, X_d) \quad [4]$$

Finalmente, deben diferenciarse también los valores característicos de la resistencia R_k y los valores de cálculo de la resistencia R_d . Mientras que la resistencia característica se define como $R_k = R(X_k)$, la resistencia de cálculo R_d puede definirse a través de una de las dos fórmulas siguientes:

$$R_d = R\left[\frac{X_k}{\gamma_M}\right] \quad \text{si se utiliza el Método del Coeficiente de los Materiales (MCM)} \quad [5]$$

$$R_d = \frac{R(X_k)}{\gamma_R} \quad \text{si se utiliza el Método del Coeficiente de la Resistencia (MCR)} \quad [6]$$

donde γ_R es el factor de seguridad parcial de la resistencia.

En los métodos deterministas convencionales, después de determinar los valores característicos de las propiedades del terreno X_k y los valores característicos de los efectos de las acciones en el terreno E_k , se aplica un factor de seguridad γ_0 que proporciona un margen de seguridad entre la resistencia calculada del terreno R_k y los efectos de las acciones E_k , de tal modo que:

$$E_k \leq \frac{R_k}{\gamma_0} \quad [7]$$

Cuando se utiliza el método de los coeficientes parciales de seguridad, se comprueba que en todos los casos nunca se excedan los estados límites cuando se utilizan los valores de cálculo tanto de las acciones como de las propiedades de los materiales. Es decir, se comprueba que los valores de cálculo de los efectos de las acciones E_d no superan la resistencia de cálculo R_d correspondiente al estado límite último que se considere, tal y como se indica a continuación:

$$E_d \leq R_d \quad [8]$$

En el Eurocódigo 7 se consideran cinco casos de adopción de cargas para el cálculo: A, B, C y D (D_1 o D_2) y se deberá demostrar que se evitan los estados límites definidos por la ecuación (8) en una cualquiera de las dos siguientes combinaciones de casos:

- a) Casos A, B y C considerados separadamente.
- b) Casos A y D (D_1 o D_2) considerados separadamente.

El caso A está pensado para asegurar que el cálculo geotécnico es seguro frente a la pérdida de equilibrio estático.

El caso B está enfocado a asegurar el dimensionamiento de cimentaciones y el cálculo estructural frente a posibles desviaciones desfavorables de las acciones respecto a sus va-

lores representativos (ver Tabla A.1) manteniendo las propiedades del terreno en sus valores característicos. De acuerdo con estas consideraciones, el caso B será crítico en el estudio de los estados límites últimos de los elementos estructurales que intervienen en los cimientos o estructuras de contención de tierra, en los que sí deben considerarse posibles desviaciones de los parámetros de los materiales que constituyen la cimentación respecto a sus valores característicos.

El caso C pretende proporcionar un dimensionamiento de la cimentación y un cálculo estructural seguros frente a posibles desviaciones desfavorables de las propiedades del terreno respecto a sus valores característicos. Las acciones permanentes se adoptan con sus valores característicos y las acciones variables se incrementan (ver Tabla A.1), aunque menos que en el caso B, por encima de sus valores representativos. No se consideran desviaciones en los parámetros de los materiales que constituyen la cimentación respecto a sus valores característicos.

El caso D incorpora simultáneamente incertidumbres asociadas a las acciones y a las resistencias: el caso D₁ utiliza el Método del Coeficiente de la Resistencia (MCR) en el que se aplican coeficientes de seguridad parciales a los valores característicos de los efectos de las acciones y a los valores característicos de la resistencia. El caso D₂ utiliza el Mé-

todo del Coeficiente de los Materiales (MCM) en el que se aplican coeficientes de seguridad parciales a los valores característicos de las acciones y de las propiedades del material.

3. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL TERRENO

Para estimar los parámetros efectivos de resistencia del terreno, con objeto de utilizarlos en el cálculo sismo-resistente, la Parte 5 del Eurocódigo 8 hace referencia a las cláusulas 2.4.2 (Valores característicos) y 2.4.3 (Valores de cálculo) de la Parte 1 del Eurocódigo 7.

En la Tabla A.3. se presentan los valores de los coeficientes de seguridad parciales aplicables a las propiedades de los materiales que relacionan los valores característicos y de cálculo de los parámetros de resistencia del terreno, de acuerdo con el estado actual de la versión revisada de la Parte 1 del Eurocódigo 7.

4. ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE INERCIA DEL SUELO

En lo que se refiere al efecto que puede tener la inercia del suelo bajo el efecto de las solicitaciones sísmicas, Pecker (1998) demostró que, para cimentaciones directas con un factor de seguridad frente al hundimiento superior a 2, el

Parámetro	Símbolo	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D1*	Caso D2
Permanente, desfavorable	γ_G	1,0	1,35	1,0	1,35	1,0
Variable, desfavorable	γ_Q	1,5	1,5	1,3	1,5	1,2
Accidental	γ_A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Permanente, favorable	$\gamma_{G,fav}$	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0
Variable, favorable	$\gamma_{Q,fav}$	0	0	0	0	0

* Estos coeficientes se deben aplicar al efecto de cualquier acción que se calcule con los valores característicos de las acciones sobre la estructura y a los resultados de los cálculos realizado con las propiedades característicos del terreno.

TABLA A.1. Coeficientes de seguridad parciales (γ_F) aplicables a las cargas.

Parámetro	Símbolo	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D1	Caso D2
$tg\phi'$	γ_ϕ	1,25	1,0	1,2	1,0	1,2
Cohesión en presiones efectivas c'	γ_c	1,25	1,0	1,2	1,0	1,2
Cohesión en presiones totales c_u	γ_{c_u}	1,4	1,0	1,4	1,0	1,4
Resistencia a la compresión q_u	γ_{q_u}	1,4	1,0	1,4	1,0	1,4
Tensión límite del presiómetro	γ_{plim}	1,4	1,0	1,4	1,0	1,4
Peso unitario del terreno	γ_g	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Resistencia CPT q_c		1,4	1,0	1,4	1,0	1,4

TABLA A.3. Coeficientes de seguridad parciales (γ_M) aplicables a las propiedades de los materiales.

TABLA A.4. Coeficientes de seguridad parciales (γ_R) aplicables a la resistencia del terreno.

Parámetro	Símbolo	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D1	Caso D2
Coficiente de modelo	γ_{rd}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,4
Hundimiento	γ_{Rv}	1,0	1,0	1,0	1,4	1,0
Deslizamiento	γ_{Rh}	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0
Resistencia global del terreno	γ_{Re}	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4

efecto de las fuerzas de inercia del suelo puede despreciarse en los cálculos cuasi-estáticos de la cimentación, por lo que la comprobación y dimensionamiento de la misma pueden llevarse a cabo utilizando las fórmulas del Anexo 2 del Eurocódigo 7, teniendo en cuenta la inclinación de la carga y la excentricidad derivadas de las fuerzas inerciales de la estructura.

A continuación se demostrará que, siguiendo el procedimiento identificado en el Eurocódigo 7 como Método del Coeficiente de la Resistencia (MCR), la influencia de la inercia del suelo en el análisis de la cimentación puede estimarse directamente utilizando el criterio de Pecker, mientras que si se usa el Método del Coeficiente de los Materiales (MCM) el procedimiento resulta muy tedioso.

En efecto, cuando se escoge el primer método, la utilización de las Tablas A.1. y A.4. del Eurocódigo 7, conjuntamente con el caso D1, permite una estimación razonable de los dos coeficientes de seguridad aplicables a los efectos de la carga (γ_E) y a la resistencia (γ_R), así como del producto de ambos que proporciona el factor global de seguridad γ_0 . Si dicho valor es mayor que 2, la conclusión de Pecker sobre los efectos de la inercia del suelo sería directamente aplicable.

Por otra parte, si se utiliza el Método del Coeficiente de los Materiales (MCM) puede observarse, teniendo en cuenta las expresiones de los factores de capacidad de carga N_q , N_c y N_γ incluidas en el Anexo 2 del Eurocódigo 7, en las que $\text{tg}\phi'$ aparece en forma lineal, en forma cuadrática, y en forma exponencial respectivamente, que el efecto del coeficiente de seguridad parcial aplicable a $\text{tg}\phi'$ (ver Tabla A.3.) es amplificado sucesivamente por dichas funciones, lo que conduce a un coeficiente de seguridad parcial de la resistencia que no está directamente relacionado con el coeficiente de seguridad parcial inicial aplicado a $\text{tg}\phi'$. Esto complica enormemente la estimación del coeficiente de seguridad global de la cimentación y por tanto del efecto que la inercia del suelo puede tener en el análisis. De hecho el análisis de la estructura y el análisis de la resistencia del terreno deberían llevarse a cabo sin coeficientes parciales de seguridad, y tanto el efecto de las cargas como la resistencia del terreno obtenidos con estos cálculos deberían compararse con los efectos de las cargas y la resistencia del terreno obtenidos utilizando en el cálculo los coeficientes de seguridad parciales aplicables a las cargas sobre la estructura y a los parámetros resistentes del terreno. De esta manera se podrían obtener los coeficientes de seguridad de los efectos de la carga y de la resistencia del terreno que, multiplicados uno por otro, darían por este procedimiento el coeficiente de seguridad global de la cimentación.

5. CONCLUSIONES

Actualmente existe un alto grado de incertidumbre en el uso de los coeficientes de seguridad parciales para el análisis del comportamiento mecánico del terreno bajo cargas estáticas y dinámicas.

Se ha demostrado que en el caso muy sencillo de una cimentación directa, en el que se dispone de fórmulas analíticas que permiten estimar su resistencia al hundimiento, el coeficiente de seguridad parcial de resistencia del terreno guarda poca relación con el coeficiente de seguridad parcial aplicable al rozamiento interno de las partículas del terreno, debido a la complejidad de las funciones implicadas en el cálculo.

Entre las posibilidades que ofrece la nueva versión del Eurocódigo 7 para comprobar los estados límites últimos del terreno, el caso D1 parece ser el más realista, siendo éste el que debería servir de referencia para valorar otras alternativas del Eurocódigo y para estimar las consecuencias reales que tiene, en el cálculo estático y dinámico de las cimentaciones, aplicar por separado factores parciales de seguridad a las cargas sobre la estructura y a los parámetros de resistencia del terreno.

Dado que los Eurocódigos ofrecen una amplia variedad de métodos para permitir que los distintos países establezcan sus propios márgenes de seguridad en la edificación y otras construcciones industriales, se considera de vital importancia mantener "entre corchetes" los coeficientes de seguridad parciales, de modo que se puedan fijar sus valores en los diferentes Documentos Nacionales, y se pueda, además, elegir el método que cada país considere más adecuado para el análisis de los estados límites últimos de las cimentaciones.

REFERENCIAS

- Eurocódigo 1. *Bases de cálculo y acciones en estructuras. Parte 1: Bases de cálculo* (Propuesta de norma europea 1991-1), CEN (Comité Europeo de Normalización)/ Comité Técnico (CT) 250.
- Eurocódigo 7. *Cálculo Geotécnico. Parte 1. Normas generales* (Propuesta de norma europea 1997-1), CEN (Comité Europeo de Normalización) / CT-250/SC 7, 1998.
- Eurocódigo 8. *Disposiciones para el proyecto de estructuras resistentes a los terremotos. Parte 5. Cimientos, estructuras de contención y aspectos geotécnicos*, CEN (Comité Europeo de Normalización)/CT-250/SC 8, 1994.
- PECKER, A., 1996. *Cimentaciones Directas en Comportamiento Sísmico y Cálculo de Cimentaciones y Estructuras de Contención*. PREC 8-2. Faccioli & Paolucci, Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil, Lisboa.