



Bases de cálculo del Eurocódigo 7. Un cambio en la metodología para el proyecto de cimentaciones

Calculation criteria in Eurocode 7. A methodological change in foundation design

Pilar Crespo Rodríguez^a, Alvaro Parrilla Alcaide^a, José Estaire Gepp^{b,c},
Miguel Ortega Cornejo^{d,e,*} y Alejandro Pérez Caldentey^{f,c}

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos, Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Madrid, España

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX),
Ministerio de Fomento, Madrid, España

^cDepartamento de Ingeniería y Morfología del Terreno. Grupo de investigación: Mecánica de Rocas, Universidad Politécnica de Madrid,
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (ETSICC y P), Madrid, España

^dIngeniero de Caminos Canales y Puertos, IDEAM, S.A., Madrid, España

^eEscuela Politécnica, Universidad Europea de Madrid, Madrid, España

^fDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Fhecor Ingenieros Consultores, Madrid, España

Recibido el 25 de julio de 2013; aceptado el 31 de octubre de 2013

Resumen

El Eurocódigo 7 supone un importante cambio en la forma de abordar el proyecto de las cimentaciones, respecto a la práctica tradicional en Europa, ya que implica pasar de los métodos basados en tensiones admisibles, a los métodos de cálculo basados en los estados límite y la introducción de los coeficientes parciales en el ámbito de la ingeniería geotécnica, de forma que las bases de cálculo del proyecto geotécnico sean acordes con las establecidas en los demás Eurocódigos para el proyecto del resto de la estructura.

En el artículo se describen con detalle los diferentes estados límite, tanto últimos como de servicio, que el Eurocódigo 7 establece que hay que verificar en el proyecto de las cimentaciones, explicando la forma de aplicar en cada caso los coeficientes parciales que afectan a las acciones, a los materiales del terreno y a las resistencias.

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

Palabras clave: Eurocódigo 7; Geotecnia; Cimentaciones; Estados Límite; Estado Límite Último GEO; Estado Límite Último STR; Estado Límite Último EQU

Abstract

Eurocode 7 has ushered in a substantial change in the traditional approach to foundation design in Europe, from calculation methods based on allowable stress to others based on limit states and the use of partial factors in geotechnical engineering. These new premises bring the criteria for geotechnical design into line with the criteria established in other Eurocodes for calculating the rest of the structure.

The article provides a detailed description of the various ultimate and service limit states established in Eurocode 7 for application to foundation design. It also explains how the partial factors affecting actions, soil materials and strength values are to be used in each case.

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

Keywords: Eurocode 7; Geotechnics; Foundations; Limit States; GEO Ultimate Limit State; STR Ultimate Limit State; EQU Ultimate Limit State

1. Introducción

En los últimos años se ha producido en Europa un hecho de gran relevancia en el panorama normativo relativo a las estructuras: la paulatina sustitución, en la mayor parte de los países, de los códigos técnicos y normativas nacionales por los Euro-

códigos estructurales, como herramienta para el proyecto de estructuras en el ámbito de la ingeniería civil.

Si bien existe en España una cierta tradición en el empleo de los Eurocódigos de Bases de Cálculo (UNE-EN 1990 [1,2]), de acciones (Eurocódigo 1 UNE-EN 1991, partes 1-1, 1-3 a 1-7 y 2 [3-9]) y de materiales (Eurocódigo 2 de estructuras de hormigón UNE-EN 1992 [10,11], Eurocódigo 3 de estructuras de acero UNE-EN 1993 [12,13] y Eurocódigo 4 de estructuras mixtas UNE-EN 1994 [14,15]), al ser bastante similares a

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: miguel.ortega@ideam.es (M. Ortega Cornejo).

las instrucciones españolas de acciones en puentes (IAP-11 [16] ó IAPF-07 [17]) o a las instrucciones o recomendaciones nacionales de materiales (hormigón EHE-08 [18], acero EAE-11 [19], o estructuras mixtas RPM-95 [20]), el Eurocódigo 7, dedicado al proyecto geotécnico de las cimentaciones, ha sido hasta el momento, mucho menos utilizado.

El Eurocódigo 7 (UNE-EN 1997 partes 1 y 2) [21,22] (en adelante denominados EC 7-1 y EC 7-2 respectivamente) supone un importante cambio en la forma de abordar el proyecto de las cimentaciones, respecto a la práctica tradicional en España [23-25] y en muchos otros países europeos, al adoptar el método de los estados límite e introducir los coeficientes parciales en el ámbito de la geotecnia, de forma que las bases de cálculo del proyecto geotécnico sean acordes con las establecidas en los demás Eurocódigos para el proyecto del resto de la estructura.

Se produce por lo tanto un cambio, análogo al que ya ocurrió hace décadas en el ámbito de las estructuras, pasando de los métodos basados en tensiones admisibles a los métodos de cálculo basados en los estados límite con coeficientes parciales.

Si bien el EC 7-1 establece un nuevo marco general para el proyecto geotécnico, contrariamente a otros Eurocódigos no define con detalle los métodos de cálculo para las verificaciones de los diferentes estados límite que pueden afectar a una cimentación, dejando bastante abierto a la interpretación ingenieril y a la experiencia no solo los métodos para definir los parámetros del terreno (definidos de forma general en el EC 7-2 [22]), sino también la aplicación práctica de los métodos de cálculo propuestos en sus anexos informativos. Este hecho queda patente en el gran número de guías o manuales de aplicación que se han publicado a nivel europeo [26-29], en las que no solo se explica el Eurocódigo 7, sino que se proponen métodos de cálculo geotécnico alternativos que se desarrollan mediante ejemplos.

La aplicación de cualquier Eurocódigo en un país miembro de la UE no puede entenderse sin su correspondiente Anejo Nacional, en el que cada país define los parámetros de determinación nacional.

En este artículo se resume parte del trabajo realizado por la UTE IDEAM S.A.-Fhecor Ingenieros Consultores S.L. para la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, bajo la dirección de Álvaro Parrilla, Jefe de área de Geotecnia, y Pilar Crespo, Jefa de Área de Estructuras, en relación con el Eurocódigo 7.

2. El método de los estados límite y su aplicación a la geotecnia

La comprobación de la seguridad de una actuación geotécnica se hará, en general y siempre que sea posible, mediante el método denominado «proyecto geotécnico mediante cálculos» (apdo. 2.4 del EC 7-1 [21]) aunque también son admisibles otros procedimientos en determinadas circunstancias, como se expondrá más adelante.

El «proyecto geotécnico mediante cálculos» se basa en el método de los «estados límite». En un «estado límite», la cimentación alcanzaría una situación no deseada que debe evitarse.

Atendiendo a la gravedad de sus consecuencias, los estados límite se clasifican en dos grupos: estados límite últimos (ELU) y estados límite de servicio (ELS).

El concepto de seguridad se introduce mediante la incorporación de los coeficientes parciales aplicados a las acciones, a los parámetros geotécnicos y a las resistencias del terreno, los cuales en general serán diferentes para cada estado límite. El EC 7-1 [21] propone unos valores para dichos coeficientes parciales en su Anexo A, siendo el Anejo Nacional de cada país el encargado de establecer los valores definitivos a emplear [30].

2.1. Estados límite últimos

Los estados límite últimos (ELU) en el proyecto de una cimentación se clasifican en los siguientes tipos (identificados por sus iniciales en inglés), acordes con el apartado 2.4.7.1 del EC 7-1 [21]:

- *Estado Límite Último EQU*: pérdida de equilibrio de la estructura o del terreno, considerado como un sólido rígido, en el que la estructura y el terreno proporcionan una resistencia despreciable. El ejemplo clásico de pérdida del equilibrio es el vuelco como sólido rígido de una estructura, considerando la estructura y el terreno indeformables, lo que implica que en este estado límite no fallan ni la estructura, ni el terreno propiamente dichos sino que se produce la pérdida del equilibrio estático. En la figura 1 se representan dos ejemplos de vuelco rígido.
- *Estado Límite Último STR*: fallo interno o deformación excesiva de la estructura o los elementos estructurales, incluyendo zapatas, pilotes o muros en el que la resistencia de los materiales estructurales proporciona una resistencia significativa. Se trata de los estados límite último de rotura por, entre otros, flexión, cortante y punzonamiento, y son los que se emplean para realizar el dimensionamiento de los elementos estructurales, incluyendo el armado de las cimentaciones, y verificar su resistencia.

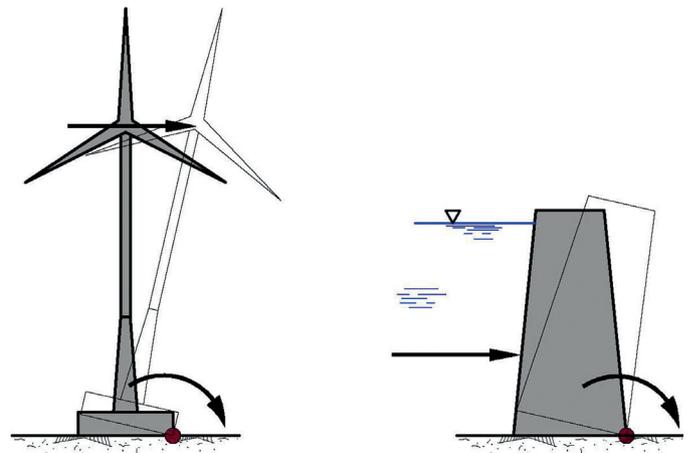


Figura 1. Ejemplos de estado límite de pérdida de equilibrio EQU con el vuelco rígido de una estructura.

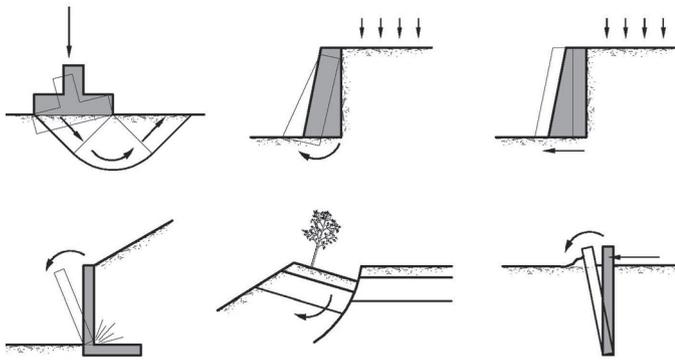


Figura 2. Ejemplos de diferentes estados límite último STR y GEO.

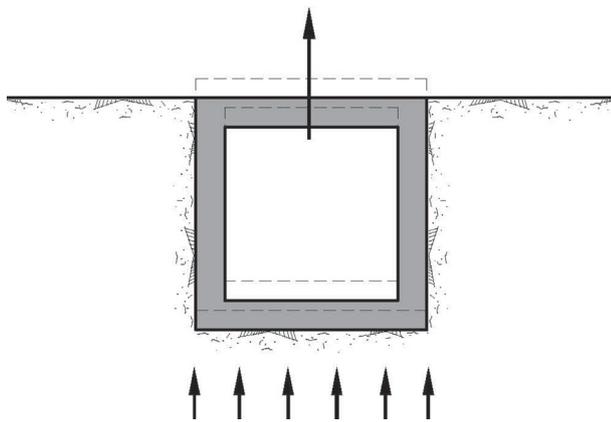


Figura 3. Ejemplo de estado límite último UPL.

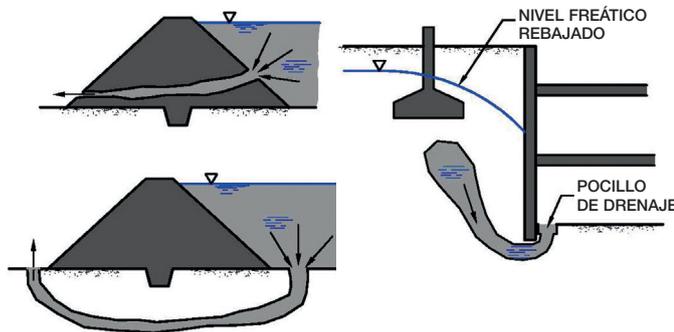


Figura 4. Ejemplos de situaciones HYD en las que la tubificación o el sifonamiento pueden ser críticos.

Tabla 1
Resumen de los diferentes estados límite últimos GEO y EQU a verificar en las diferentes estructuras de cimentación

Caso	ELU Descripción	Tipo de ELU
Cimentación Superficial (Cap. 6)*	Hundimiento (6.5.2)	GEO
	Deslizamiento (6.5.3)	GEO
	Vuelco rígido (2.4.7.2 y 6.5.4)	EQU
Cimentación Profunda (Cap. 7)*	Hundimiento (compresión) (7.6.2)	GEO
	Arranque (tracción) (7.6.3)	GEO
	Rotura horizontal (7.7)	GEO
Estructuras de contención (Cap. 9)*	Deslizamiento (9.2 y 6.5.3)	GEO
	Hundimiento (9.2 y 6.5.2)	GEO
	Vuelco rígido (9.2, 2.4.7.2 y 6.5.4)	EQU
Estabilidad de taludes (Cap. 11)	Estabilidad global (11.5)	GEO

Los capítulos y apartados se refieren al EC 7-1 [21].

* En todas las cimentaciones deberá comprobarse la estabilidad global (GEO).

Estos estados límite son los clásicos desarrollados por los Eurocódigos de materiales [10-15] y al no tratarse de estados límite específicos geotécnicos no desarrollados en el EC 7-1 [21], no se profundizará en ellos en este artículo.

- **Estado Límite Último GEO:** fallo o deformación excesiva del terreno, en el que el terreno proporciona una resistencia significativa. Posibles fallos de rotura tipo GEO serían, entre otros, el deslizamiento de un muro o cimentación, el hundimiento de una cimentación o el fallo general por inestabilidad de la zona de apoyo de la estructura. La figura 2 ilustra distintos tipos de fallo tipo GEO o STR. Así, en orden de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se tiene: hundimiento de una zapata (GEO); hundimiento del terreno de la cimentación de un muro (GEO); deslizamiento de un muro (GEO); rotura estructural del alzado de un muro por flexión (STR); inestabilidad global de un talud o ladera (GEO); rotura lateral del terreno (pilotes o pantallas) (GEO).
- **Estado Límite Último UPL:** pérdida de equilibrio de la estructura o del terreno por levantamiento debido a la presión de agua (subpresión) u otras acciones verticales (fig. 3).
- **Estado Límite Último HYD:** implica un fallo ocasionado por la filtración de agua en el terreno. Ejemplos de este tipo de ELU son la inestabilidad hidráulica por sifonamiento (flotación de partículas de suelo) y la erosión interna o tubificación (arrastre de partículas), provocadas por gradientes hidráulicos suficientemente elevados (fig. 4).

La tabla 1 resume los posibles estados límite último de tipo GEO y EQU que hay que considerar en las cimentaciones superficiales, cimentaciones profundas y en muros de contención [26]. Entre paréntesis se indica el apartado del EC 7-1 [21] que define el correspondiente estado límite. No se han incluido los diferentes estados límite últimos estructurales (STR), que sería también necesario comprobar en cada elemento estudiado.

2.2. Estados límite de servicio

Los estados límite de servicio (ELS) son aquellos estados que, de ser excedidos, pueden dar lugar a una pérdida de la funcionalidad para la que la estructura fue proyectada, aunque ello no conlleve un fallo inminente de la misma (acorde con la cláusula 1.5.2.14 de UNE-EN 1990 [1]).

En la figura 5 se incluyen algunos ejemplos de estados límite de servicio: asentamientos por deformaciones excesivas del terreno, asentamientos diferenciales entre apoyos contiguos, deformaciones excesivas de una pantalla de contención, vibraciones, capacidad insuficiente de bombeo y flujo excesivo a través de una estructura de tierras.

Las estructuras podrían dejar de cumplir el cometido para el que se proyectan por razones vinculadas al normal funcionamiento de la misma, de durabilidad o estéticas.

En general, los estados límite de servicio que se consideran habitualmente en los procesos de cálculo de las cimentaciones son los provocados por los movimientos o asentamientos excesivos.

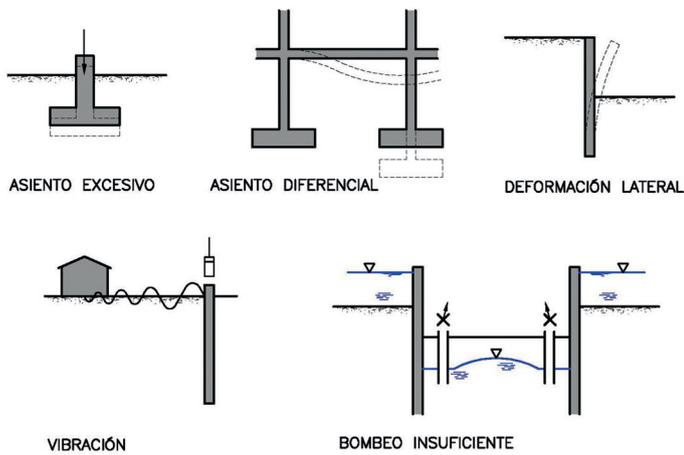


Figura 5. Ejemplos de estado límite de servicio ELS.

Otros estados límite de servicio, que no sean susceptibles de un cálculo específico, deben evitarse tomando medidas preventivas.

3. Requisitos de proyecto

3.1. Procedimientos para verificar los estados límite

Las verificaciones de los diferentes estados límite en una cimentación pueden realizarse, de acuerdo con la cláusula 2.1 (4) del EC 7-1 [21], mediante uno o varios de los siguientes procedimientos, que se describen en los apartados 5 a 8 de este artículo:

- Mediante cálculos: según el apartado 2.4 del EC 7-1 [21]. Los métodos mediante cálculo podrán ser directos o indirectos empleando modelos de cálculo que podrán ser analíticos, semi-empíricos o modelos numéricos.
- Mediante la adopción de medidas prescriptivas: según el apartado 2.5 del EC 7-1 [21].
- Mediante el empleo de modelos experimentales y ensayos de carga: según el apartado 2.6 del EC 7-1 [21].
- Mediante un método observacional: según el apartado 2.7 del EC 7-1 [21].

A la hora de definir las situaciones de proyecto y los estados límite a verificar, se deben considerar los siguientes aspectos descritos en la cláusula 2.1 (1) del EC 7-1 [21].

3.2. Categorías geotécnicas

En función de la complejidad de cada proyecto geotécnico y de los riesgos asociados, la cláusula 2.1 (10) del EC 7-1 [21] establece tres Categorías geotécnicas.

Los diferentes elementos de cimentación de una misma estructura, obra o proyecto, se pueden clasificar en diferentes categorías geotécnicas de forma independiente, de acuerdo con la cláusula 2.1 (13) del EC 7-1 [21], y por lo tanto no es necesario

considerar todas las cimentaciones de un proyecto con la categoría geotécnica de la más penalizante.

Las tres Categorías geotécnicas en las que se clasifican los proyectos geotécnicos son las siguientes:

- **Categoría 1:**

En ella se incluyen solo las estructuras pequeñas y relativamente simples que cumplen dos requisitos:

- Es posible asegurar que en ellas se satisfacen los requisitos fundamentales en base a la experiencia y a los resultados de ensayos geotécnicos cualitativos.
- Cuentan con un riesgo despreciable en materia de estabilidad global o de los desplazamientos del terreno, cumpliendo también que las condiciones del terreno son suficientemente conocidas y seguras.

Esta categoría debería utilizarse solamente en proyectos que no requieran excavaciones por debajo del nivel freático, o en las que la experiencia local indica que dicha excavación puede realizarse sin dificultades.

- **Categoría 2:**

Comprende los tipos comunes de estructuras y cimentaciones, es decir, aquellas que no cuentan con riesgos anormales ni presentan condiciones del terreno o de las cargas problemáticas.

Los proyectos pertenecientes a esta categoría deben incluir datos geotécnicos cuantitativos, así como un análisis que asegure que se cumplen los requisitos fundamentales. Además, pueden utilizarse los métodos habituales para los ensayos de campo y laboratorio, así como para el dimensionamiento y ejecución de este tipo de proyectos.

Como ejemplos, en esta categoría se incluyen:

- los tipos comunes de cimentación (mediante zapatas, sobre losa y mediante pilotes)
- las estructuras de contención de terreno y agua
- las excavaciones
- las pilas y estribos de puentes
- las obras de tierra
- los anclajes y otros sistemas de fijación

- **Categoría 3:**

Son aquellas estructuras que no pueden incluirse en los otros dos grupos, y que podrían tener que calcularse mediante reglas y disposiciones alternativas a las recogidas en el EC 7-1 [21], tal y como define su cláusula 2.1 [21], y quizás con diferentes exigencias de seguridad.

En esta categoría se incluirían las estructuras grandes o inusuales, aquellas que implican riesgos anormales o situaciones de terreno o cargas no habituales o excepcionalmente difíciles, o que se encuentran en zonas de riesgo sísmico, o las ubicadas en zonas de inestabilidad que requieran medidas especiales.

En general, en condiciones normales, las estructuras de cimentación habituales serán de Categoría geotécnica 2.

A partir de las Categorías geotécnicas se establecen los requisitos mínimos relativos a la amplitud y contenido de

los reconocimientos geotécnicos, los cálculos y los controles de ejecución necesarios.

Las condiciones del terreno y el tipo de estructura, generalmente, condicionarán la asignación de la Categoría geotécnica y, por lo tanto, se debe establecer al inicio del trabajo una Categoría geotécnica de partida, que posteriormente puede cambiar en cada etapa del proyecto y del proceso constructivo.

La tabla 2 [27] resume la magnitud, el alcance de la investigación y los reconocimientos geotécnicos, que serán función de la Categoría geotécnica del elemento de cimentación en cuestión.

4. Situaciones de proyecto

Una situación de proyecto es una representación de ciertas condiciones o realidades de la obra en las que esta se encuentra en diferentes momentos de su vida útil, que deben ser analizadas para determinar las comprobaciones que hay que llevar a cabo en el estudio de la estructura, estableciendo los datos geométricos del cimientado y el terreno de apoyo, así como las características de ese terreno y las acciones que pueden actuar sobre el cimientado.

La cláusula 2.2 (1)P del EC 7-1 [21] diferencia entre situaciones a corto y largo plazo. Esta terminología quizás pueda llevar a confusión en determinadas ocasiones, ya que las verificaciones que se deben realizar en cada tipo de cimentación dependerán más de si se trata de condiciones drenadas o no drenadas.

Igualmente, se deben considerar los aspectos que previsiblemente determinarán las etapas de construcción y uso de la estructura (o vida útil), diferenciando las dos fases y sus particularidades, que darán como resultado hipótesis propias para cada una.

Además, cada proyecto específico debe tener en cuenta de forma detallada las situaciones que correspondan, según lo definido en la cláusula 2.2 (2) del EC 7-1 [21].

Por último, y de acuerdo con la cláusula 3.2 (2) de la UNE-EN 1990 [1], se distingue entre situaciones *persistentes*, *transitorias*, *accidentales* y *sísmicas*, según la configuración geométrica de la estructura, el tipo de acciones solicitantes, las características del terreno y su vida útil, proporcionando unas combinaciones de dichas acciones particularizadas con unos coeficientes determinados para cada situación y estado límite.

El desarrollo de estas diferentes situaciones de proyecto ayuda a determinar el nivel de fiabilidad que se requiere así como las acciones que se deben considerar en cada una.

4.1. Situaciones persistentes

Corresponden a las condiciones de uso normal de la estructura, en las que la geometría de la misma, así como la configuración y propiedades del terreno, representan de forma adecuada las condiciones para las que la cimentación fue proyectada, las cuales deben mantenerse durante la vida útil de la estructura.

4.2. Situaciones transitorias

Son las que se producen cuando las condiciones de uso, el estado de la estructura y sus condiciones geométricas, o incluso las características del terreno, son temporales como, por ejemplo, durante la construcción de obras ejecutadas por fases o en las situaciones de reparación o inspección.

4.3. Situaciones accidentales

Corresponden a condiciones excepcionales, aplicables a la estructura, afectando a la geometría o a las acciones, como, por ejemplo, las provocadas por una avenida, un impacto, una explosión, un incendio, o por el fallo localizado de algún elemento o aquellas que accidentalmente pudieran modificar las características del terreno.

De acuerdo con la UNE-EN 1990 [1] los coeficientes parciales para estas situaciones son más reducidos que para las situaciones persistentes y transitorias, ya que estas últimas presentan condiciones que tienen más probabilidades de ocurrencia.

4.4. Situaciones sísmicas

Corresponden a condiciones excepcionales aplicables a la estructura durante un evento sísmico. La situación sísmica se distingue del resto de situaciones accidentales debido a que en ella se establecen diferentes niveles de la magnitud de la acción, en función de los requisitos de seguridad o de servicio.

5. Proyecto geotécnico mediante cálculos

5.1. Introducción

El proyecto geotécnico mediante cálculos debe ser conforme con los requerimientos de la UNE-EN 1990 [1] y ser acorde con el apdo. 2.4 del EC 7-1 [21]. En general será el método de aplicación para el proyecto de las estructuras habituales de cimentación en los casos en los que exista suficiente información del terreno y se pueda caracterizar con unos parámetros geotécnicos suficientemente fiables.

El proyecto geotécnico mediante cálculos debe incluir los siguientes aspectos:

Tabla 2
Alcance de la investigación geotécnica en función de la Categoría geotécnica

Categoría geotécnica	Riesgo	Requisitos de la investigación geotécnica
1	Despreciable	Normalmente limitada, con verificaciones basadas en la experiencia local
2	No excepcional	Aplicarían las prescripciones del EC 7-2 [22]
3	Excepcional	Nivel de investigación al menos como en la Categoría geotécnica 2; en ocasiones pueden ser necesarias investigaciones adicionales y reconocimientos y ensayos más avanzados

- Acciones, que pueden ser tanto cargas como desplazamientos impuestos
- Propiedades del terreno
- Datos geométricos
- Valores límite de algunos parámetros como deformación, abertura de fisuras, vibraciones, etc.
- Modelos de cálculo

Para ello, son necesarios los valores de cálculo de: las acciones, los parámetros geotécnicos, los datos geométricos y las resistencias del terreno. Debe tenerse en cuenta que los valores de cálculo de las acciones y las resistencias de los materiales, así como sus combinaciones, son diferentes para las situaciones persistentes, transitorias, accidentales y sísmicas correspondientes a estados límite últimos, así como para los estados límite de servicio.

Para alcanzar una correcta precisión de los modelos de cálculo y los coeficientes parciales de seguridad, es importante un conocimiento preciso de las condiciones del terreno, así como un adecuado control de la ejecución de los trabajos.

Los métodos mediante cálculo podrán ser directos o indirectos.

El modelo de cálculo puede enmarcarse en alguno de los siguientes tipos:

- Modelo analítico
- Modelo semi-empírico
- Modelo numérico

Los estados límite que incluyan formación de mecanismos de rotura en el terreno deberían ser comprobados con modelos de cálculo. Lo mismo sucede, en general, con los estados límite definidos por consideraciones de deformación, aunque en algunos casos podría efectuarse una estimación simplificada.

Los modelos numéricos pueden ser los más adecuados si se considera en un estado límite la compatibilidad de las deformaciones (materiales frágiles o con comportamiento pico-residual) o la interacción estructura-terreno (losas, pantallas, esfuerzos horizontales en pilotes...). En los cálculos necesarios para estudiar la compatibilidad de las deformaciones, debe incluirse la rigidez relativa de la estructura y el terreno, si es posible que se produzca un fallo conjunto de ambos. En las situaciones de interacción terreno-estructura, los cálculos deben considerar las relaciones tensión-deformación del terreno y los materiales estructurales, junto con unos niveles de tensión en el terreno adecuados para alcanzar un grado suficiente de seguridad.

Los modelos pueden incluir simplificaciones, así como modificaciones de los resultados que consigan posicionarlos del lado de la seguridad, mediante la utilización de un coeficiente parcial de modelo, considerando el grado de incertidumbre en los resultados y cualquier error sistemático asociado al método. El Anejo Nacional [30] ha definido un coeficiente parcial de modelo diferente de la unidad solamente para el caso de pilotes.

5.2. Comprobación de la resistencia para los estados límite últimos de la estructura en situaciones persistentes y transitorias (STR y GEO)

5.2.1. Enfoques de Proyecto

Las diferentes formas de tener en cuenta las interacciones entre las acciones y sus efectos, las resistencias del terreno y los modos de aplicar los diferentes coeficientes parciales (o lo que es lo mismo, la manera de incluir el concepto de seguridad en el cálculo) con el fin de comprobar los estados límite últimos STR y GEO, han conducido al EC 7-1 [21] a definir tres posibles Enfoques de Proyecto diferentes (en inglés «Design Approach», DA de forma reducida), para así dar cabida a la gran diversidad de tradiciones geotécnicas existentes en Europa.

La potestad de elección del Enfoque de Proyecto para el proyecto geotécnico es una decisión abierta al Anejo Nacional [30], al tratarse de un Parámetro de Determinación Nacional (cláusula 2.4.7.3.4 (1)P Nota 1 del EC 7-1 [21]).

La decisión nacional adoptada en España a este respecto es el empleo del Enfoque de Proyecto 2 (en adelante DA-2), salvo para la estabilidad global, donde se ha elegido el Enfoque de Proyecto 3 (DA-3), pero para comprender mejor los motivos de esta decisión se explica de forma somera el alcance de cada uno de los tres diferentes enfoques, para posteriormente desarrollar con más detalle el Enfoque de Proyecto 2, que es el que será de aplicación para el proyecto geotécnico de las cimentaciones en España.

Con el fin de ayudar a entender la manera de aplicar los diferentes coeficientes parciales en cada situación y Enfoque de Proyecto, el EC 7-1 [21] realiza una simplificación en la nomenclatura utilizando la siguiente simbología (apdo 2.4.7.3.4 del EC 7-1 [21]).

Se denomina combinación de conjunto de coeficientes parciales al conjunto de:

$$A_i "+" M_j "+" R_k \quad (1)$$

Donde:

- El símbolo A representa los coeficientes parciales de las acciones γ_F (o de sus efectos γ_E)
- El símbolo M representa los coeficientes parciales de los parámetros del terreno γ_M
- El símbolo R representa los coeficientes parciales de las resistencias γ_R
- Los índices i (1 ó 2), j (1 ó 2) ó k (1,2,3 ó 4) se corresponden con el número de alternativa definida en el EC 7-1 [21] para ese coeficiente parcial, definido en su Anexo A
- El signo "+" se refiere a la expresión «combinado con» (o sea, que se combinan los coeficientes parciales de las acciones (o de los efectos), con los de los coeficientes parciales del terreno y con los coeficientes parciales de las resistencias)

Así:

- Una acción geotécnica involucrará los conjuntos de coeficientes parciales $A_i "+" M_j$
- Una resistencia geotécnica involucrará los conjuntos de coeficientes parciales $M_j "+" R_k$

En función del Enfoque de Proyecto, los coeficientes parciales de algún conjunto (A, M ó R) podrán ser iguales a la unidad, como se verá más adelante.

El apartado A.3 del Anexo A del EC 7-1 [21] define en las tablas A.3 a A.14 los valores recomendados para cada uno de los diferentes conjuntos de coeficientes (A_i, M_j, R_k) para cubrir los tres Enfoques de Proyecto para los distintos estados límite últimos GEO y STR. Estos coeficientes parciales del Anejo A del EC 7-1 [21] son Parámetros de Determinación Nacional y, por lo tanto, los que se deben aplicar para el proyecto de una cimentación son los definidos en el Anejo Nacional [30].

Dentro de la comprobación de los estados límite últimos STR y GEO se distinguen, además, diferentes tablas de coeficientes parciales de resistencia según la cimentación sea directa o mediante pilotes (hincados, perforados y de barrena continua) así como para anclajes pretensados, estructuras de contención y taludes y estabilidad global.

Los tres diferentes enfoques propuestos en el apdo. 2.4.7.3.4.1 del EC 7-1 [21] son:

- *Enfoque de Proyecto 1 (DA-1)* (apdo. 2.4.7.3.4.2 del EC 7-1 [21]):

Según el Enfoque de Proyecto 1 se debe verificar que no se produce el fallo (estado límite de rotura o deformación excesiva) del terreno ni de la estructura mediando el uso de dos combinaciones de conjuntos de coeficientes parciales.

Combinación 1:

$$A1" + "M1" + "R1 \tag{2}$$

Busca ofrecer un diseño seguro contra desviaciones desfavorables de las acciones, aplicando los coeficientes parciales $\gamma_F \neq 1,0$ a sus valores característicos ($A1$), mientras que los valores de cálculo de las propiedades del terreno ($M1$) se mantienen iguales a sus valores característicos (y por tanto con coeficientes parciales $\gamma_M = 1,0$).

Combinación 2:

$$A2" + "M2" + "R1 \tag{3}$$

Busca ofrecer un diseño seguro contra desviaciones desfavorables de las propiedades del terreno, aplicando los coeficientes parciales $\gamma_M \neq 1,0$ a sus valores característicos ($M2$), y contra incertidumbres en el modelo de cálculo. En esta combinación, se asume que las acciones permanentes (G) están muy cerca de sus valores representativos esperados, y por lo tanto se aplican coeficientes parciales $\gamma_G = 1,0$, mientras que las acciones variables (Q) se asume que pueden desviarse ligeramente de forma desfavorable y por lo tanto se les aplican coeficientes parciales $\gamma_Q > 1,0$.

Para proyecto de pilotes y anclajes es de aplicación la combinación 1 y bajo carga axil, la combinación 2 (ec. 3) se sustituye por la siguiente (ec. 4):

$$A2" + "(M1 \text{ ó } M2)" + "R4 \tag{4}$$

La principal diferencia de la ecuación 4 con las ecuaciones 2 y 3 radica en que los coeficientes parciales de la resistencia de los pilotes (γ_R) en la modalidad $R4$ son superiores a 1,0.

En este caso, los coeficientes parciales $M1$ se emplean para el cálculo de las resistencias de los pilotes o anclajes, y los coeficientes parciales $M2$ se emplean para el cálculo de las acciones desfavorables en pilotes debidas al rozamiento o a las cargas transversales.

- *Enfoque de Proyecto 2 (DA-2)* (apdo. 2.4.7.3.4.3 del EC 7-1 [21]):

Según el Enfoque de Proyecto 2 se debe verificar que no se producirá un estado límite de rotura o deformación excesiva con la siguiente comprobación:

$$A1" + "M1" + "R2 \tag{5}$$

Los coeficientes parciales se aplican a:

- Las acciones o los efectos de las acciones ($A1$, con $\gamma_F \neq 1,0$ ó $\gamma_E \neq 1,0$, respectivamente)
- A las resistencias del terreno ($R2$, $\gamma_R \neq 1,0$)
- Manteniendo los parámetros del terreno de cálculo iguales a los característicos ($X_d = X_k / \gamma_M = X_k$ al ser $M1$, $\gamma_M = 1,00$)

Como ya se ha citado anteriormente, el Anexo Nacional es el encargado de seleccionar el enfoque que se debe seguir para el proyecto de estructuras de cimentación. Dado que el Enfoque de Proyecto 2 es el que se ha elegido en el Anejo Nacional español (salvo para la estabilidad global, en que se ha elegido el Enfoque de Proyecto 3), se describirá con más detalle en apartados posteriores, con la aplicación práctica a una serie de ejemplos.

- *Enfoque de Proyecto 3 (DA-3)* (apdo. 2.4.7.3.4.4 del EC 7-1 [21]):

Según el Enfoque de Proyecto 3 se debe verificar que no se producirá un estado límite de rotura o deformación excesiva con la siguiente comprobación:

$$(A1 \text{ ó } A2)" + "M2" + "R3 \tag{6}$$

Los coeficientes parciales distintos de 1,0 se aplican a las acciones o a los efectos de las acciones sobre la estructura ($A1$ ó $A2$) y a los parámetros de resistencia del terreno ($M2$).

Los coeficientes $A1$ deben aplicarse a las acciones estructurales, y los $A2$ a las acciones geotécnicas, tal y como establece la cláusula 2.4.7.3.4.4 del EC 7-1 [21].

A modo de resumen, se presentan en la tabla 3 las características más importantes de cada Enfoque de Proyecto.

5.2.1.1. Comprobación de los estados límite últimos STR y GEO mediante el Enfoque de Proyecto 2

En general, en la comprobación de los estados límite últimos mediante cálculos se aplican los siguientes principios:

- La identificación de los estados límite últimos que sean de aplicación.

Tabla 3
Resumen de coeficientes parciales según el Enfoque de Proyecto

Combinación	Coefficientes parciales de las acciones γ_F (o sus efectos ^b γ_E) (A)	Coefficientes parciales de parámetros geotécnicos γ_M (M)	Coefficientes parciales de resistencias del terreno γ_R (R)
<i>DA-1</i>			
Comb. 1: A1 "+" M1 "+" R1	Sí	No	No
Comb. 2: A2 "+" M2 "+" R1	Solo a las acciones variables	Sí	No
Comb. 2*: A2 "+" (M1 ó M2) "+" R4	Solo a las acciones variables	Sí ^a	Sí
<i>DA-2</i>			
A1 "+" M1 "+" R2	Sí ^b	No	Sí
<i>DA-3</i>			
(A1 ó A2) "+" M2 "+" R3	Sí ^b : A1 para las acciones estructurales A2 para las acciones geotécnicas (solo acciones variables)	Sí	No ^c

Notas: Se resalta en negrita el Enfoque de Proyecto adoptado por el Anejo Nacional español, salvo para la estabilidad global, donde deberá emplearse el DA-3.

Comb. 2 *: Combinación para pilotes y anclajes con carga axil.

^aEn este caso los coeficientes parciales M1 se emplean para el cálculo de la resistencia de los pilotes o anclajes, y los coeficientes parciales M2 se emplean para el cálculo de las acciones desfavorables en pilotes debidas al rozamiento o a las cargas transversales.

^bAplica a las acciones o a los efectos de las acciones.

^cNo se minoran las resistencias salvo la resistencia por fuste en tracción en pilotes.

- La obtención de los valores de cálculo de las acciones (o sus efectos) desfavorables, de las resistencias y de las acciones favorables, se calculan, en general, como el producto de un coeficiente parcial por su valor característico.
- Para un estado límite último particular, la suma de las acciones desfavorables (o sus efectos) no debe exceder la suma de las resistencias y acciones favorables.

El estudio de los estados límite último GEO y STR se basa en la comprobación de que los valores de cálculo de los efectos de las acciones (E_d) deben ser menores o iguales que los valores de cálculo de las resistencias (R_d):

$$E_d \leq R_d \quad (\text{ec. 2.5 del EC 7-1 [21]}) \quad (7)$$

a) Obtención de los valores de cálculo de los efectos de las acciones

Los valores de cálculo de los efectos de las acciones son función de la propia acción, de las propiedades del terreno (en ocasiones) y de los datos geométricos. Para obtener los valores de cálculo de los efectos de las acciones (E_d), el EC 7-1 [21] proporciona un método en su apartado 2.4.7.3.2:

En el caso de aplicar los coeficientes parciales sobre el valor representativo de la acción en el origen, se tiene:

$$E_d = E \{ \gamma_F \cdot F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \} \quad (\text{ec. 2.6a del EC 7-1 [21]}) \quad (8)$$

Y en el caso de aplicarlos sobre los efectos de la acción y no directamente sobre la acción (en su origen), se tiene:

$$E_d = \gamma_E \cdot E \{ F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \} \quad (\text{ec. 2.6b del EC 7-1 [21]}) \quad (9)$$

Así mismo conviene tener en cuenta que el valor de cálculo de las acciones geotécnicas puede depender del valor de cálculo de los parámetros del terreno (c , ϕ , γ , δ , etc.).

La filosofía de diferenciar entre la ponderación de acciones y efectos de las acciones en el EC 7-1 [21] no busca diferenciar

el resultado final de los efectos de cálculo de las acciones (E_d , primer término de la Ecuación 7) ya que independientemente de que se emplee uno u otro método, el resultado debería ser el mismo.

La diferencia entre ponderar acciones o efectos solo afecta a la forma de obtener el valor de cálculo de la resistencia (R_d , segundo término de la Ecuación 7), tal y como se escribe en el punto b).

b) Obtención de los valores de cálculo de las resistencias

En el Enfoque de Proyecto 2, de aplicación para el proyecto de las cimentaciones en España, el valor de cálculo de la resistencia (R_d) es función de los parámetros geotécnicos del terreno (X), de las acciones (F) y de los datos geométricos (a). Los coeficientes parciales se aplican según la ecuación general 2.7c del EC 7-1 [21] con $\gamma_M=1,0$ (y $\gamma_R > 1,0$).

$$R_d = R \{ \gamma_F \cdot F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \} / \gamma_R \quad (\text{ec. 2.7c del EC 7-1 [21]}) \quad (10)$$

O lo que es lo mismo según la ecuación:

$$R_d = R \{ \gamma_F \cdot F_{rep}; X_k; a_d \} / \gamma_R \quad (\text{ec. 2.7b del EC 7-1 [21]}) \quad (11)$$

Con $\gamma_R > 1,0$ (y $\gamma_M = 1,0$ implícito en la fórmula).

En cualquiera de estas dos expresiones se aplica un coeficiente parcial $\gamma_R > 1,0$ a la resistencia obtenida usando los valores de cálculo de los parámetros geotécnicos iguales a los valores característicos ($X_d = X_k / \gamma_M = X_k$ con $\gamma_M = 1,0$).

Es necesario tener muy en cuenta que el valor de cálculo de la resistencia (R_d) puede depender no solo de los parámetros del terreno y de la geometría, sino también del valor de cálculo de las acciones.

La nota 1 de la cláusula 2.4.7.3.3 del EC 7-1 [21] afirma de forma explícita que, en los procedimientos de cálculo en los que los coeficientes parciales se apliquen a los efectos de las acciones (es decir, al introducir los coeficientes parciales al final del cálculo, justo antes de la verificación del Estado Límite Último, Ecuación 9), la obtención de la resistencia del terreno

se realice empleando $\gamma_F=1,0$ en las ecuaciones 10 y 11 o, lo que es lo mismo, que la resistencia de cálculo se obtenga a partir de la combinación de ELS característica de acciones. Es decir:

$$R_d = R\{F_{rep}; X_k; a_d\} / \gamma_R \quad (12)$$

Aunque el EC 7-1 [21] no diferencia de forma explícita de ninguna manera el Enfoque de Proyecto 2 en función de si se aplican los coeficientes parciales a las acciones o a los efectos de las acciones, por simplicidad, la bibliografía técnica relacionada con el Eurocódigo 7 suele diferenciar entre el Enfoque de Proyecto 2 (en inglés «Design Approach» 2 o de forma reducida DA-2) cuando se aplican los coeficientes parciales a las acciones, antes de obtener la resistencia, y el Enfoque de Proyecto 2* («Design Approach» 2* ó DA-2*), cuando se aplican los coeficientes parciales a los efectos de las acciones, al final del cálculo, justo antes de la verificación del Estado Límite Último GEO, calculando la resistencia con acciones sin ponderar (con la combinación de ELS característica de acciones).

La única diferencia real por tanto entre el DA-2 y el DA-2* es que en el DA-2 se obtiene la resistencia característica (R_k) a partir de los valores de cálculo de las acciones (fig. 6), mientras que en el DA-2* la resistencia característica (R_k^*) se obtiene a partir de la combinación de ELS característica de acciones (fig. 7), pudiendo ser en general R_k (DA-2) \neq R_k^* (DA-2*) y, por tanto, R_d (DA-2) \neq R_d^* (DA-2*).

De acuerdo con el Anejo Nacional español, se adopta el Enfoque de Proyecto 2 (y no el 2*) y, por tanto, la obtención del valor característico de la resistencia debe realizarse a partir de los valores de cálculo de las acciones (fig. 6). Así, únicamente son aplicables las Ecuaciones 10 y 11 pero nunca la Ecuación 12.

c) Resumen

A modo de resumen, el proyecto de una cimentación mediante cálculos para las verificaciones de los estados límite último GEO y STR se llevará a cabo mediante la aplicación del Enfoque de Proyecto 2. Para ello deberán emplearse los coeficientes parciales γ_F , γ_M y γ_R definidos en dicho Anejo Nacional [30], para la combinación de la Ecuación 5:

$$A1 + "M1" + "R2 \quad (5)$$

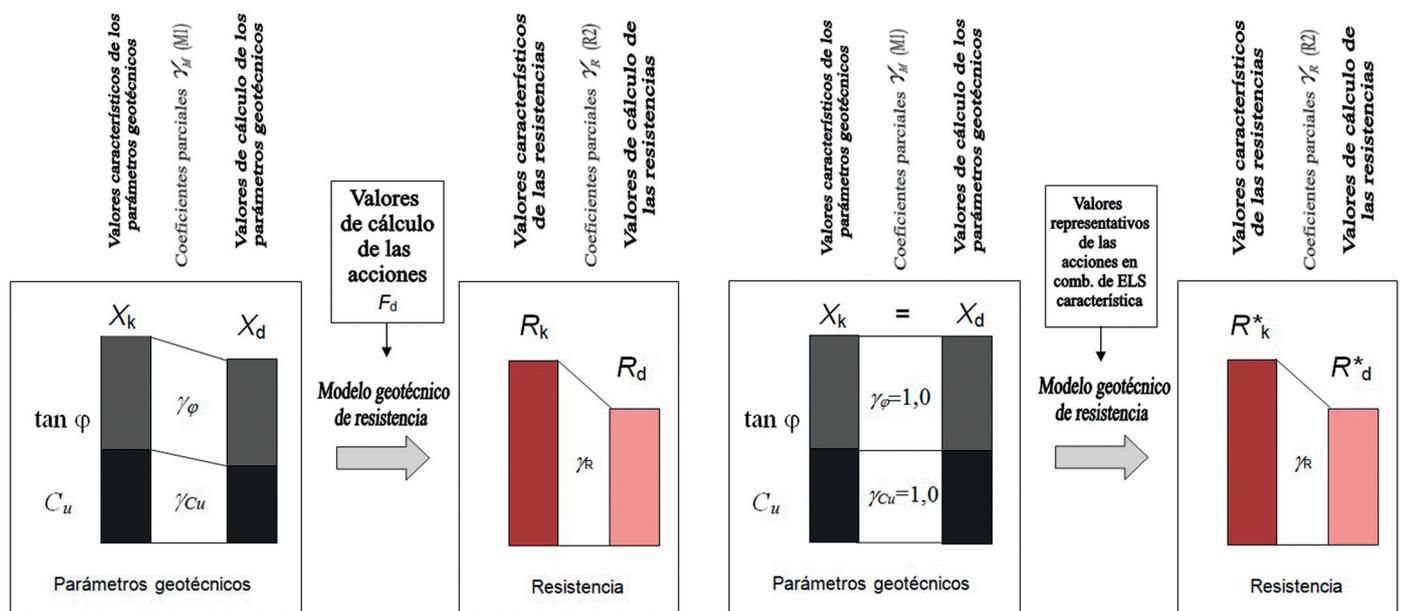
Mediante el Enfoque de Proyecto 2, los coeficientes parciales diferentes de 1,0 se aplican a las acciones (A1), previamente al cálculo de las resistencias, y a la resistencia característica (R2), obtenida a partir de esos valores de cálculo de las acciones, empleando los valores característicos de las propiedades del terreno (ya que sus coeficientes parciales son iguales a la unidad, $\gamma_M = 1,0$ (M1)).

La figura 8 resume, mediante un diagrama de flujo, el proceso a seguir en el caso del Enfoque de Proyecto 2 y 2* (aunque en el caso español el cálculo debe realizarse según el DA-2, se representan ambos para aclarar sus diferencias), y el esquema de la figura 9 aclara el proceso del Enfoque de Proyecto 2 aplicando los coeficientes parciales $\gamma_F \neq 1,0$ a las acciones, previo al cálculo de la resistencia (DA-2).

Las referencias [26 a 29] explican de forma más detallada las diferencias entre el DA-2 y el DA-2*.

5.3. Comprobación del equilibrio estático (EQU)

Tal y como indica el EC 7-1 [21] en su cláusula 2.4.7.1(1)P, el estado límite último EQU implica la pérdida de equilibrio de la estructura o el terreno, considerados ambos como un sólido



Figuras 6 y 7. Esquema de obtención de los valores de cálculo de las resistencias según el Enfoque de Proyecto 2 con $\gamma_M = 1,0$ (M1) y $\gamma_F \neq 1,0$ (A1) (esquema de la izquierda) y según el Enfoque de Proyecto 2* con $\gamma_M = 1,0$ (M1) y $\gamma_F = 1,0$ (A1) (esquema de la derecha).

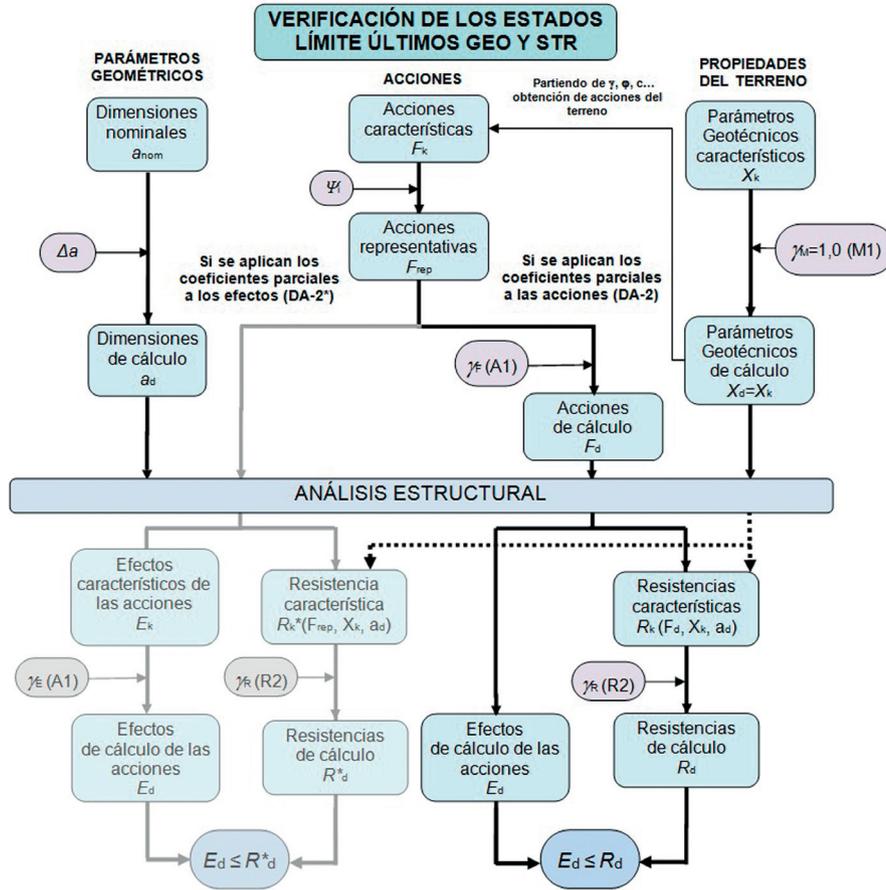


Figura 8. Diagrama de flujo para las verificaciones de los estados límite últimos STR y GEO aplicando el Enfoque de Proyecto 2 (y 2*) mediante cálculos.

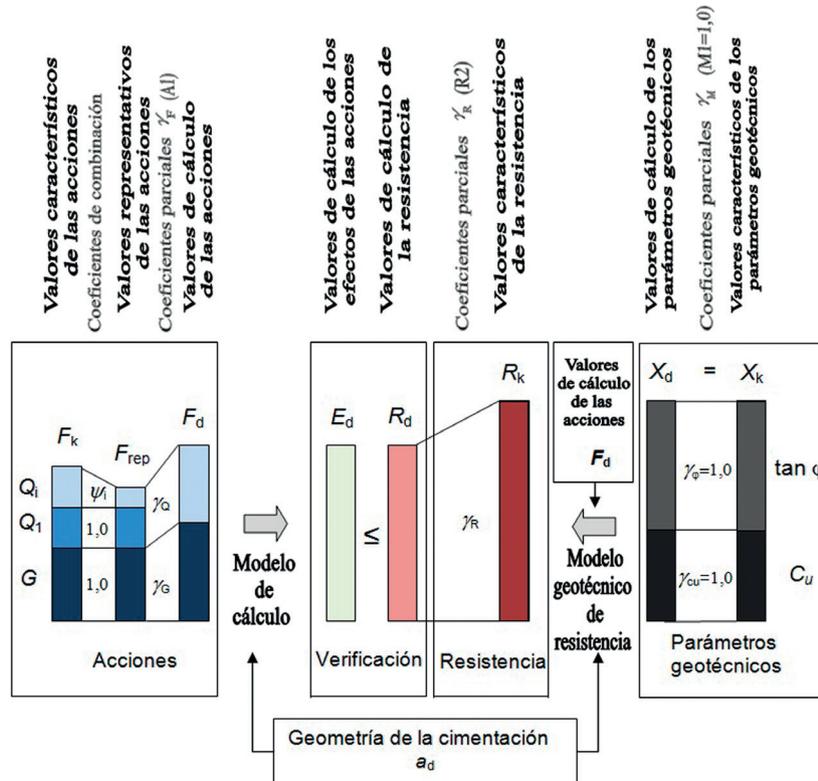


Figura 9. Esquema de aplicación de los coeficientes parciales en el enfoque de proyecto 2 (DA-2).

rígido, «en el que las resistencias de los materiales estructurales y del terreno proporcionan una resistencia despreciable» tal y como cita textualmente dicha cláusula. O sea, que en el caso de las verificaciones del estado límite último EQU, no se deberían considerar los eventuales empujes pasivos del terreno actuando como una resistencia, ya que, si se considera como resistencia, se trataría de un estado límite GEO en lugar de EQU. En caso de que se consideren los empujes pasivos del terreno, estos deberán tenerse en cuenta como una acción, que en general será favorable, pero nunca como una resistencia.

Como ya se adelantó, el ejemplo clásico de pérdida del equilibrio (EQU) es el vuelco como sólido rígido de una estructura, considerando tanto la estructura como el terreno indeformables, o sea que en este estado límite no se produce en ningún caso el fallo ni de la estructura, ni del terreno y solo se considera la pérdida del equilibrio (fig. 1).

Siempre que una cimentación superficial cumpla con el estado límite último GEO de hundimiento de la cimentación y la excentricidad de la resultante de cálculo en la cimentación presente un margen razonable frente al extremo de la cimentación, respetando por ejemplo la recomendación de la cláusula 6.5.4 del EC 7-1 [21], el estado límite último EQU no condicionará nunca [30].

En el estado límite último de pérdida de equilibrio EQU, se debe verificar que el valor de cálculo de los efectos de las acciones desestabilizadoras ($E_{dst,d}$) sea igual o menor que el valor de cálculo de los efectos de las acciones estabilizadoras ($E_{stb,d}$), según la ecuación 6.7 del apartado 6.4.2 de la UNE-EN 1990 [1] y el apartado 2.4.7.2 del EC 7-1 [21]. En este estado límite, si se incluye en el segundo término de la inecuación alguna resistencia a cortante (T_d), esta debe ser de menor importancia, como así aclara la nota 1 del apartado 2.4.7.2 del EC 7-1 [21].

$$E_{dst,d} \leq E_{stb,d} + (T_d) \quad (\text{ec. 2.4 del EC 7-1 [21]}) \quad (13)$$

Donde T_d representa posibles resistencias a cortante, como puede ser la resistencia de algún anclaje para asegurar la estabilidad al vuelco, que deben ser de menor importancia (y en general no se deben considerar).

Con:

$$E_{dst,d} = E \{ \gamma_F \cdot F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \}_{dst} \quad (\text{ec. 2.4a del EC 7-1 [21]}) \quad (14)$$

y

$$E_{stb,d} = E \{ \gamma_F \cdot F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \}_{stb} \quad (\text{ec. 2.4b del EC 7-1 [21]}) \quad (15)$$

En relación a los valores de los coeficientes parciales γ_M para el cálculo de las acciones geotécnicas en el estado límite último EQU de pérdida de equilibrio, no será en general de aplicación la tabla A.2 del anejo A del EC 7-1 [21], siendo los coeficientes parciales $\gamma_M=1,00$. Los valores de la tabla A.2 del Anejo A de la UNE-EN 1997-1 (definidos en el anejo nacional [30]) solo se deben aplicar a las resistencias a cortante (T_d) que, como se ha comentado anteriormente, deben ser de valor menor y por lo tanto suponer una proporción pequeña en el conjunto de las acciones estabilizadoras.

La figura 10 representa mediante un diagrama de flujo el proceso a seguir para verificar un estado límite último de equi-

librio estático EQU y el esquema de la figura 11 aclara el proceso del cálculo a seguir.

5.4. Comprobación para el estado límite último de subpresión (UPL)

Para este estado límite último se debe comprobar que el valor de cálculo de la combinación de las acciones desestabilizadoras permanentes y las acciones verticales variables ($V_{dst,d}$) sea menor o igual que la suma de los valores de cálculo de las acciones verticales permanentes estabilizadoras ($G_{stb,d}$) y el valor de cálculo de cualquier resistencia a la subpresión adicional (R_d) (fig. 12).

$$V_{dst,d} \leq G_{stb,d} + R_d \quad (\text{ec. 2.8 del EC 7-1 [21]}) \quad (16)$$

Donde:

$$V_{dst,d} = G_{dst,d} + Q_{dst,d} \quad (17)$$

Los valores de los coeficientes parciales a aplicar a los parámetros $G_{stb,d}$, $Q_{dst,d}$ y R_d para las situaciones persistentes y transitorias serán los coeficientes definidos en el Anejo Nacional [30] (apartado. A.4, tablas A.15 y A.16 del Anexo A).

La fuerza vertical desestabilizadora ($V_{dst,d}$) es debida básicamente a la subpresión, mientras que la estabilizadora ($G_{stb,d}$) incluye peso propio y cargas exteriores. La resistencia (R_d) en el caso de estructuras enterradas incluye la posible interacción con el terreno en el lateral de la estructura, dando lugar a un rozamiento que colabora frente a este estado límite último.

En aquellos casos en los que el peso propio de la estructura no sea suficiente para equilibrar la acción desestabilizadora de la subpresión, se pueden aplicar las siguientes alternativas.

La primera de ellas consiste en aumentar el valor de $G_{stb,d}$, incrementando el peso de la estructura. Esta opción suele ser la menos económica.

La segunda se trata de disminuir el término desestabilizador $V_{dst,d}$, mediante la colocación de elementos bajo la cimentación que faciliten el drenaje (disminuyendo así la subpresión), como puede ser un enchado de gravas, cuya permeabilidad facilita el flujo de agua hacia determinados puntos en los que ya puede recogerse y expulsarse.

Por último puede incrementarse el valor de la resistencia colaborante R_d introduciendo elementos que produzcan rozamiento con el terreno como pueden ser anclajes o pilotes trabajado a tracción.

5.5. Comprobación de la resistencia al fallo por el levantamiento o inestabilidad hidráulica (sifonamiento) generado por el agua filtrada en el terreno (HYD)

La inestabilidad hidráulica o sifonamiento (fig. 13A) se caracteriza por la anulación de la presión vertical efectiva de las partículas del terreno debido a la fuerza ascendente de filtración causada por el gradiente hidráulico del agua (cuando la presión del agua iguala el peso total saturado de la columna de

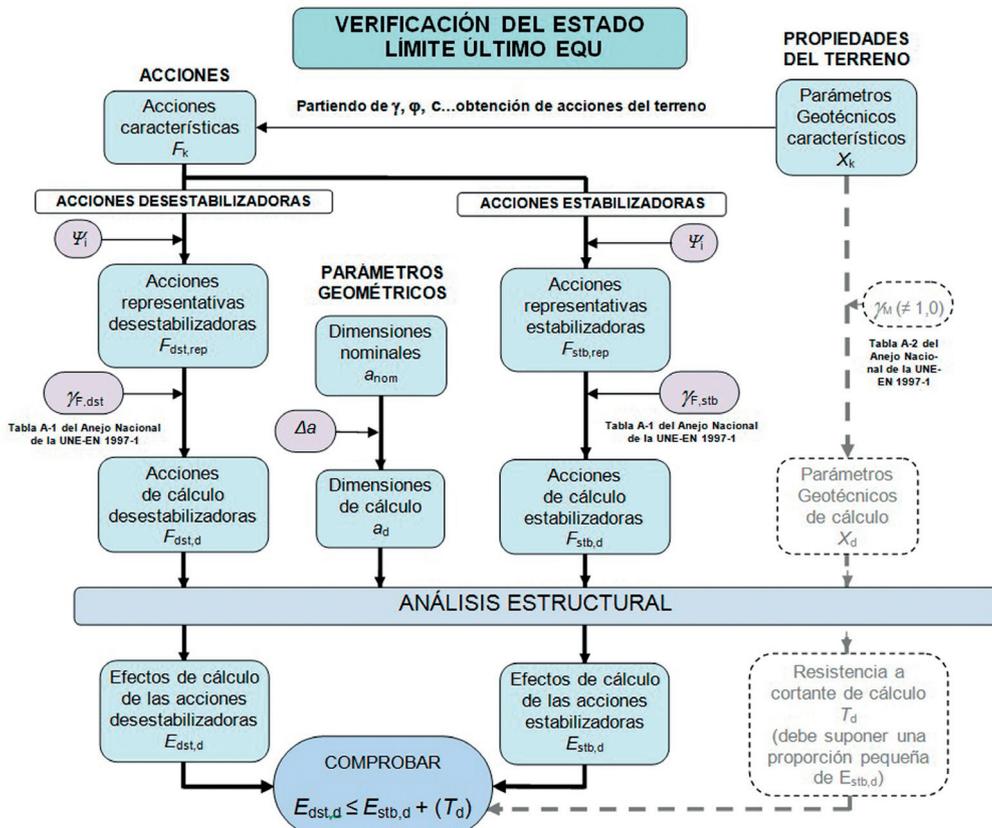


Figura 10. Diagrama de flujo para la verificación del estado límite último de equilibrio estático EQU.

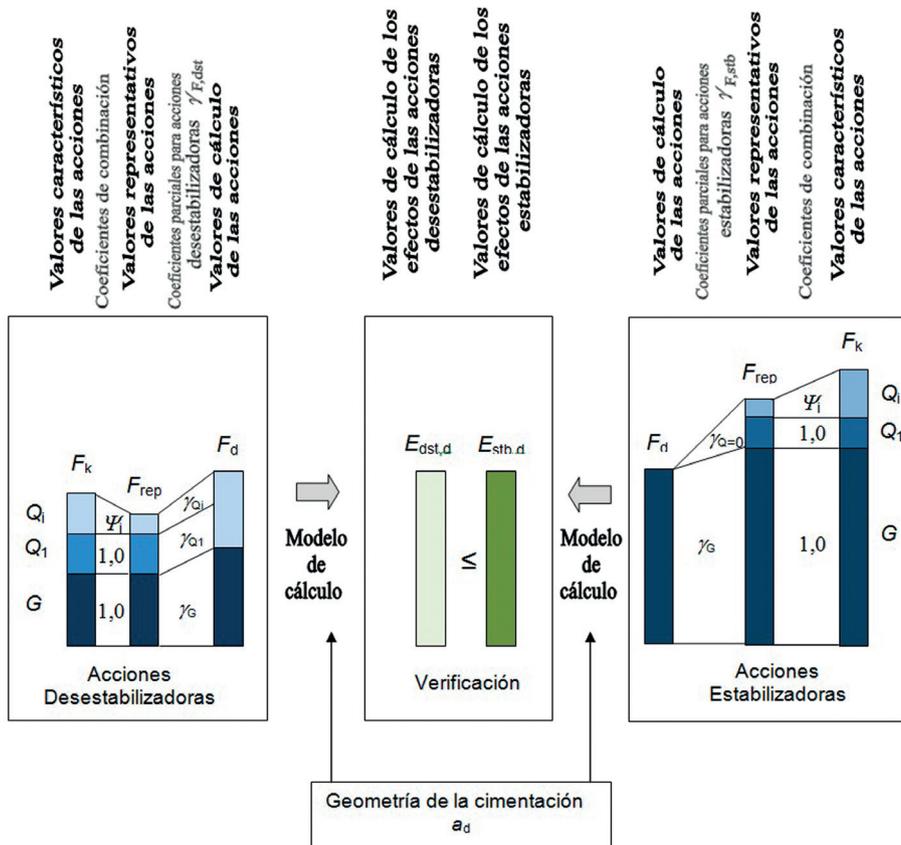


Figura 11. Esquema de aplicación de los coeficientes parciales en el estado límite último de equilibrio estático EQU.

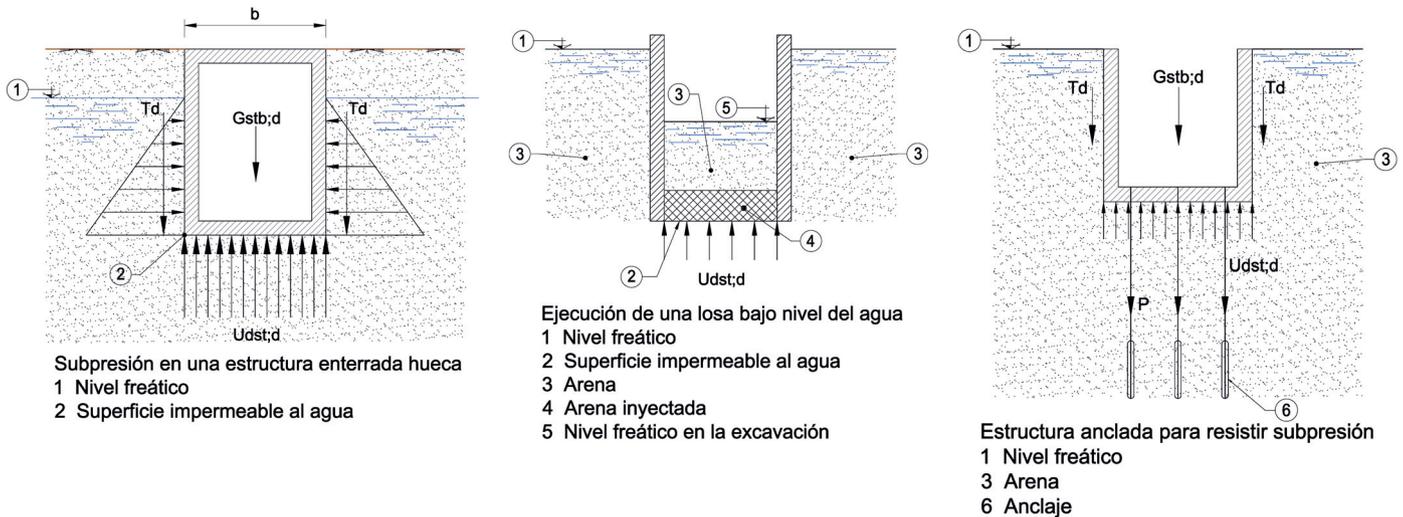


Figura 12. Ejemplos de estado límite último UPL.

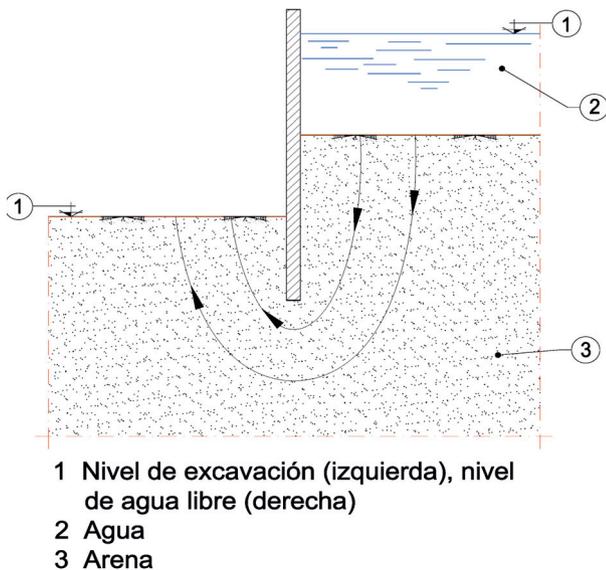


Figura 13A. Ejemplo de estado límite último HYD.

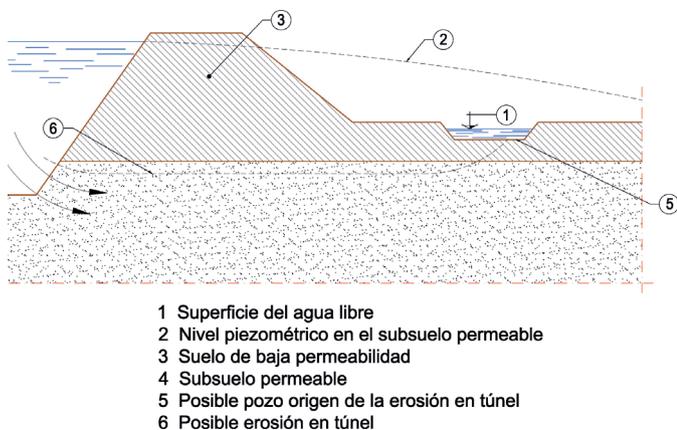


Figura 13B. Ejemplo de estado límite último HYD.

suelo). Esto provoca que dichas partículas se encuentren en un estado de «flotación» (suspensión de partículas en agua), perdiendo toda capacidad de desarrollar mecanismos resistentes de corte. Suele darse en terrenos granulares.

La tubificación (fig. 13B) tiene lugar cuando el gradiente hidráulico es suficientemente elevado como para arrastrar las partículas situadas a la salida de las líneas de flujo del agua (generalmente aguas abajo de un talud o una presa), donde no existe masa alguna que se oponga a la erosión. Este proceso puede progresar, ya que la superficie libre puede ir erosionándose progresivamente, pudiendo llegar a crearse conductos tubulares hacia aguas arriba.

Para este estado límite último relacionado con la filtración del agua en el terreno, se debe comprobar para cualquier columna de suelo relevante, que el valor de cálculo de la presión intersticial desestabilizadora total ($u_{dst,d} = u_k \cdot \gamma_{Q;dst}$) en la base de la columna, es menor o igual a la tensión vertical total estabilizadora ($\sigma_{stb,d} = \sigma_{w,K} \cdot \gamma_{G;stb}$) o bien, que el valor de cálculo de la fuerza de filtración vertical ($S_{dst,d} = S_{dst;k} \cdot \gamma_{Q;dst}$) en la base de la columna es menor que el peso sumergido de cálculo ($G'_{stb,d} = G'_{stb;k} \cdot \gamma_{G;stb}$).

$$u_{dst,d} \leq \sigma_{stb,d} \quad (\text{ec. 2.9a del EC 7-1 [21]}) \quad (18)$$

ó

$$S_{dst,d} \leq G'_{stb,d} \quad (\text{ec. 2.9b del EC 7-1 [21]}) \quad (19)$$

Los valores de los coeficientes parciales a aplicar a los parámetros $u_{dst,d}$, $\sigma_{stb,d}$, $S_{dst,d}$ y $G'_{stb,d}$ para las situaciones persistentes y transitorias serán definidos en el Anejo Nacional del EC 7-1 [21] (apdo. A.5, tabla A.17 del Anexo A).

Para el caso más habitual de levantamiento de fondo en terreno homogéneo, se considera preferible la utilización de la Ecuación 18 en vez de la 19, ya que utiliza conceptos similares a los del estado límite UPL y, además, proporciona resultados más conservadores.

5.6. Estados límite de servicio

Como se adelantó en el apartado 2.2, los estados límite de servicio (ELS), son aquellos estados que corresponden a condiciones más allá de las cuales no se cumplen los requisitos de aptitud al servicio especificados para una estructura o un elemento estructural, tal y como define la cláusula 1.5.2.14 de la UNE-EN 1990 [1].

La verificación de un estado límite de servicio puede realizarse mediante dos opciones:

• *Opción 1:*

Comprobar que el valor de cálculo del efecto de las acciones (p.e., el asiento de una cimentación, E_d), sea menor o igual que su correspondiente valor de cálculo límite (p.e. el valor límite del asiento de la cimentación, C_d), de acuerdo con la ec. 6.13 del apdo. 6.5.1 de la UNE-EN 1990 [1] y con la ec. 2.10 del apdo. 2.4.8 del EC 7-1 [21]):

$$E_d \leq C_d \quad (\text{ec. 2.10 del EC 7-1 [21]}) \quad (20)$$

En general, dentro los estados límites de servicio, los más habituales que se deben considerar en los procesos de cálculo de las cimentaciones son los asientos totales por deformaciones excesivas del terreno y los asientos diferenciales entre apoyos contiguos.

Otros posibles estados límite de servicio menos habituales podrían ser las deformaciones excesivas en alzados de pantallas o muros, vibraciones, capacidad insuficiente de bombeo, etc. Estos últimos y otros estados límite de servicio, que no sean susceptibles de un cálculo específico, deben evitarse adoptando medidas preventivas.

La elección de los valores límite (C_d) de los movimientos o deformaciones de una estructura depende, tal y como define el EC 7-1 [21] en su cláusula 2.4.9(3)P, de factores tales como:

- La confianza del valor del desplazamiento calculado
- La ocurrencia y velocidad de desplazamientos en el terreno
- El tipo de estructura
- El tipo de material de la construcción
- El tipo de cimentación y el tipo de terreno
- El modo de deformación
- El uso previsto de la estructura
- La necesidad de asegurar que no hay problemas con los servicios que entran en la estructura

El Anexo H del EC 7-1 [21] presenta, con carácter informativo, una serie de límites de deformaciones y movimientos para las cimentaciones estructurales.

Los valores de cálculo de las acciones y de las propiedades del material para las verificaciones del estado límite de servicio serán normalmente iguales a sus valores característicos (o sea, los valores de los coeficientes parciales γ_F y γ_M serán iguales a 1,0).

La figura 14 representa el esquema a seguir en el proceso de cálculo de un estado límite de servicio.

• *Opción 2:*

Si se verifica que solamente se moviliza una fracción reducida de la resistencia del terreno puede asumirse que los movimientos no superarán los límites requeridos de comportamiento en servicio, siempre que se disponga de experiencia comparable (de estructuras similares en terreno análogo) que lo justifique.

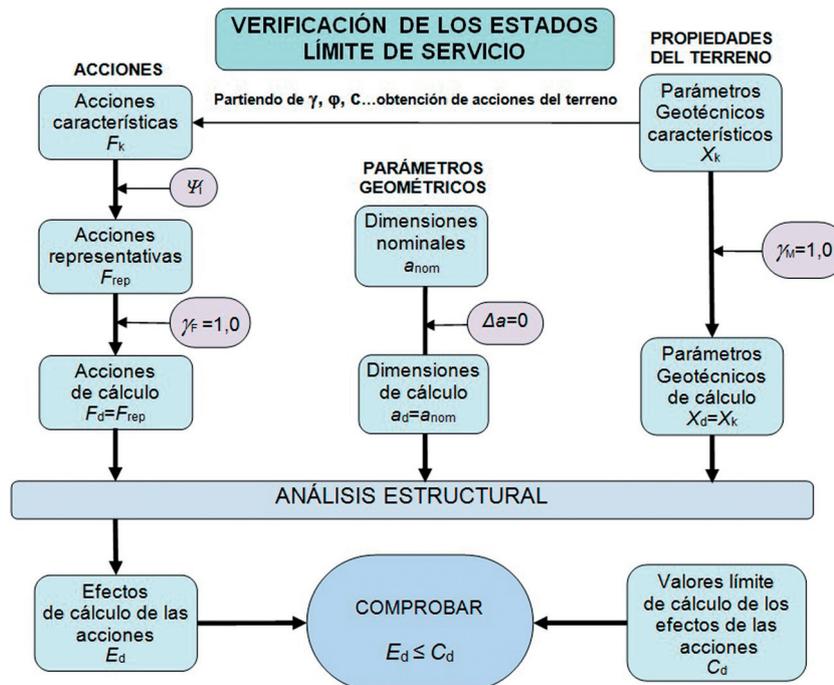


Figura 14. Diagrama de flujo para la verificación de los estados límite de servicio.

Esta opción solo podrá ser empleada si no se requiere un valor concreto del movimiento o deformación para comprobar el estado límite de servicio.

6. Proyecto geotécnico mediante medidas prescriptivas

El proyecto geotécnico mediante la imposición de medidas prescriptivas puede utilizarse en los casos en que no se disponga o no se necesiten modelos de cálculo y, sin embargo, se disponga de experiencia comparable que asegure que, con las medidas establecidas, no se van a superar los estados límite relevantes.

El uso de medidas prescriptivas se aplica usualmente para prevenir problemas de durabilidad de las estructuras, defensa de la agresividad del terreno o de las aguas, etc. Puede emplearse también para decidir la profundidad de los cimientos que evita el efecto de cambio de volumen en terrenos expansivos.

El proyecto geotécnico mediante la imposición de medidas prescriptivas implica los siguientes aspectos:

- Reglas de proyecto clásicas y conservadoras
- Atención a las especificaciones y controles de los materiales
- Calidad de ejecución
- Procedimientos de protección y mantenimiento

Generalmente conlleva la aplicación de tablas, gráficos y procedimientos que se hayan establecido a partir de una *experiencia comparable*, la cual suele incluir sus propios coeficientes parciales de seguridad implícitos.

Este tipo de métodos suelen estar relacionados con los estados límite de servicio, considerando los estados límite últimos cubiertos en general por dichos estados límite de servicio.

7. Proyecto geotécnico mediante ensayos de carga y ensayos con modelos experimentales

El EC 7-1 [21] permite, de acuerdo con el apartado 2.6, la justificación de un proyecto geotécnico basado en los resultados de ensayos de carga o mediante el empleo de modelos experimentales si se consideran los siguientes aspectos:

- Las diferencias entre las condiciones del terreno en el ensayo y en la construcción real.
- Los efectos del tiempo, especialmente si la duración del ensayo es mucho menor que la duración del proceso de carga de la construcción real.
- Los efectos de la escala, especialmente si se han utilizado modelos reducidos. Debe considerarse el efecto de los niveles de tensiones, junto con los efectos del tamaño de las partículas.

Los modelos pueden realizarse tanto con una muestra de la construcción real, como con modelos a escala real o reducida.

8. Proyecto geotécnico mediante el método observacional

Esta alternativa es útil cuando sea difícil predecir el comportamiento geotécnico del terreno, por ejemplo en casos en los que las condiciones del terreno son complejas o no son suficientemente conocidas (por ejemplo, velocidad de asentamiento en una precarga).

Algunos aspectos del proyecto se revisan durante la ejecución, dependiendo de los resultados del control del comportamiento de la obra. Se deja abierto el modo de introducir la seguridad en los cálculos, según el grado de control y las consecuencias de fallo.

Este método requiere que se cumplan los requisitos previos al inicio de la construcción, establecidos en la cláusula 2.7(2) del EC 7-1 [21].

Bibliografía

- [1] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo: Bases de cálculo de estructuras. UNE-EN 1990. 2003.
- [2] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo: Bases de cálculo de estructuras. UNE-EN 1990/A1+AC. 2010.
- [3] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-1: Acciones generales. Pesos específicos, pesos propios y sobrecargas de uso en edificios. UNE-EN 1991-1-1. 2003.
- [4] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-3: Acciones generales. Cargas de nieve. UNE-EN 1991-1-3. 2004.
- [5] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones del viento. UNE-EN 1991-1-4. 2007.
- [6] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-5: Acciones generales. Acciones térmicas. UNE-EN 1991-1-5. 2004.
- [7] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-6: Acciones generales. Acciones durante la ejecución. UNE-EN 1991-1-6. 2010.
- [8] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-7: Acciones generales. Acciones accidentales. UNE-EN 1991-1-7. 2010.
- [9] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 2: Cargas de tráfico en puentes. UNE-EN 1991-2. 2004.
- [10] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1992-1-1. 2010.
- [11] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 2: Puentes de hormigón. Cálculo y disposiciones constructivas. UNE-EN 1992-2. 2010.
- [12] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios. UNE-EN 1993-1-1. 2008.
- [13] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 2: Puentes. UNE-EN 1993-2. 2013.
- [14] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1994-1-1. 2011.
- [15] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Parte 2: Reglas generales y reglas para puentes. UNE-EN 1994-2. 2011.
- [16] IAP-11. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Madrid: Ministerio de Fomento, Secretaría de Estado de Planificación e Infraestructuras, Secretaría de Infraestructuras, Dirección General de Carreteras, 2011. Orden FOM 2842/2011 de 29 de septiembre de 2011.

- [17] IAPF-07. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril. ORDEN FOM 3671/2007 de 24 de Septiembre. BOE 17 diciembre de 2007.
- [18] EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. Madrid: Ministerio de Fomento, Secretaría General Técnica, 2008. Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, BOE número 203, 22-08-2008.
- [19] EAE-11. Instrucción de Acero Estructural. Madrid: Ministerio de Fomento, Secretaría General Técnica, 2011. Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, BOE número 149, 23-06-2011.
- [20] RPX-95. Recomendaciones para el proyecto de puentes Mixtos. Madrid: Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras, 1995.
- [21] AENOR AEN/CTN 140. Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales. UNE-EN 1997-1+AC. 2010.
- [22] EN 1997-2:2007. Eurocode 7: Geotechnical design. Part 2: Ground investigation and testing. Brussels: Comité Europeo de Normalización, CEN, 2007. (Pendiente de publicar en versión UNE-EN).
- [23] Guía de cimentaciones en obras de carreteras. Madrid: Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras; 2003.
- [24] ROM 0.5-05. Recomendaciones geotécnicas para el proyecto de obras marítimas y portuarias. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente - Puertos del Estado; 2005.
- [25] CTE. Código Técnico de la Edificación. DB-SE C. Seguridad Estructural – Cimientos. Madrid: Ministerio de Vivienda, 2006. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. Texto modificado por RD 1371/2007, de 19 de octubre (BOE 23/10/2007) y corrección de errores (BOE 25/01/2008).
- [26] Frank R, Bauduin C, Driscoli R, Kavvadas M, Krebs Ovesen N, et al. Designers' Guide to EN 1997-1. Eurocode 7: Geotechnical design-General rules. London: Thomas Telford Publishing; 2004.
- [27] Bond A, Harris A. Decoding Eurocode 7. London and New York: Taylor & Francis; 2008.
- [28] A designers' simple guide to BS EN 1997. London: Department for Communities and Local Government; 2007.
- [29] Proceedings of JRC Work Shop on Eurocode 7: Geotechnical design with worked examples. Dublin, 13-14 June 2013.
- [30] Anejo Nacional AN/UNE-EN 1997-1. Eurocódigo 7. Proyecto geotécnico Parte 1: Reglas generales. 2004.