

Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7

Designers' Guides, Foundations in Highway Works with Eurocode 7

Álvaro Parrilla Alcaide ^a, Pilar Crespo Rodríguez ^b, Carlos Paradela Sánchez ^c

^aICCP del Estado. Jefe de Área de Geotecnia. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento

^bICCP del Estado. Jefe de Área de Estructuras. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento

^cICCP del Estado. Jefe de Servicio de Puentes. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento

RESUMEN

La Dirección General de Carreteras ha iniciado una serie editorial dedicada a la aplicación de los Eurocódigos estructurales mediante la publicación de Guías. La “Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7” tiene como objetivo servir de ayuda en el uso e interpretación del EC-7 en el proyecto geotécnico de obras de carretera y se divide en una serie de documentos individuales que tratan de abordar otros tantos aspectos del proyecto geotécnico. Los dos primeros documentos, publicados en 2019, se dedican a las *Bases del proyecto geotécnico* y a *Cimentaciones superficiales*.

ABSTRACT

General Directorate of Roads has just begun an editorial series devoted to the use of Structural Eurocodes, by publishing some Guidebooks. “Designers’ Guides, Foundations in Highway Works with Eurocode 7” wishes to help EC-7 use an interpretation in highway geotechnical design, and is divided in several documents dealing a topic each. Two first titles, published 2019, are devoted to Basis on Geotechnical Design and Shallow Foundations.

PALABRAS CLAVE: Eurocódigos, Eurocódigo 7, obras de carretera, proyecto geotécnico, cimentaciones

KEYWORDS: Eurocodes, Eurocode 7, Highway Works, Geotechnical Design, Foundations

1. Introducción al Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico

El Eurocódigo 7 (en lo sucesivo EC7) se dedica a los aspectos geotécnicos del proyecto de estructuras de edificación y obra civil. Establece las reglas para determinar las acciones geotécnicas, así como el planteamiento de las comprobaciones.

La versión vigente a día de hoy (figura 1) consta de dos partes que datan de 2007:

- UNE EN 1997-1 Proyecto geotécnico: Reglas generales.
- UNE EN 1997-2 Proyecto geotécnico: Investigación y ensayos del terreno.

Históricamente ha conocido una versión previa como norma experimental ENV que fue publicada por CEN en 1997.

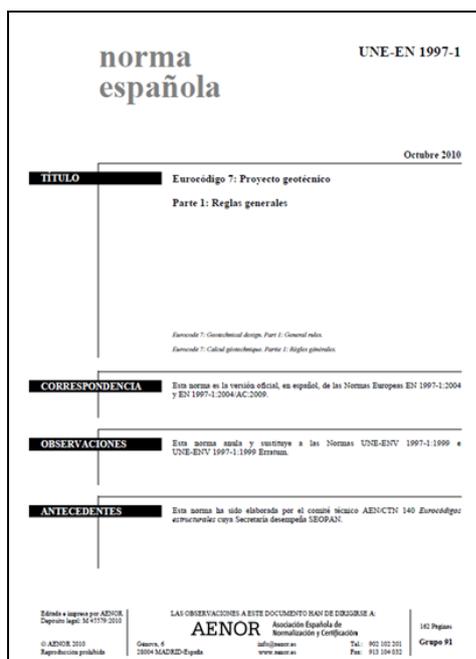


Figura 1. Portada de UNE EN 1997 – 1

UNE-EN 1997 es un caso singular dentro del conjunto de los Eurocódigos pues, a diferencia de lo que ocurre en el resto, apenas recoge métodos y modelos de comportamiento del terreno o procedimientos de cálculo (sólo incluye algunas formulaciones en anejos informativos, sugeridas con carácter de ejemplo). Esta circunstancia, que suele producir un cierto desconcierto entre los usuarios neófitos, se comprende si se tienen en cuenta dos de sus objetivos principales:

- Establecer unas bases de cálculo para las comprobaciones geotécnicas, completamente homogéneas y compatibles con las bases del cálculo estructural, clarificando la aplicación de la teoría de los estados límite en las comprobaciones geotécnicas e introduciendo el uso de los coeficientes parciales
- Dar cabida en esas nuevas bases del proyecto geotécnico a las diferentes particularidades y criterios nacionales

El punto de partida era la geotecnia que podría denominarse *clásica*, con una larga tradición, basada fundamentalmente en el empleo de coeficientes de seguridad globales con valores numéricos relativamente altos que comprenden las incertidumbres derivadas no sólo del comportamiento del terreno frente al modo de fallo analizado, sino incluso de las acciones o de los materiales y de los parámetros del terreno. La empresa era, por tanto, suficientemente compleja como para que todo el contenido del EC7 estuviera dedicado a las bases de cálculo, asumiéndose que los modelos de comportamiento del terreno pueden encontrarse en tratados geotécnicos o bibliografía especializada.

Actualmente el EC7 se utiliza en la práctica totalidad de los países europeos. En todos ha supuesto un cambio en la forma de abordar las comprobaciones geotécnicas; más en unos países que en otros según lo adaptados que sus procedimientos estuvieran al método de los estados límite y a los coeficientes parciales.

Además, hay que señalar que el EC 7 se halla inmerso en una fase de revisión profunda por más de doscientos cincuenta expertos (figura 2) de casi todos los países europeos, que le hará pasar de dos a tres partes y multiplicar la extensión de sus contenidos por dos, o incluso por tres, algo que se espera para dentro de unos cinco años.

Los títulos de los borradores de las partes en que se trabaja son:

- Parte 1 Reglas generales
- Parte 2 Investigación del terreno
- Parte 3 Estructuras (o construcciones) geotécnicas



Figura 2. Algunos de los participantes en la reunión de expertos del EC 7 celebrada en la Universidad de Nápoles en diciembre de 2018

El EC 7 ha supuesto en el mundo de la geotecnia aún más de lo que puede deducirse directamente de los párrafos precedentes que, de por sí, no es poco.

Más allá de limitarse al ámbito de las estructuras, el nuevo enfoque las ha trascendido. Así el deslizamiento de una ladera natural, o la estabilidad de un terraplén sobre un suelo blando (*per se* o con ayuda de técnicas –puramente geotécnicas- de mejora del terreno) se acometen ahora con la misma filosofía, por lo que el EC7 ha trascendido claramente su ámbito de aplicación inicial.

2. Implementación del EC7 en España

Al igual que en los demás países, en España, la completa implementación del EC7 requiere un esfuerzo de adaptación, pues las dificultades que se han indicado son comunes a todo el continente.

Este esfuerzo desarrollado por cada país ha sido tanto menor cuánto más se aproximasen al EC7 sus códigos geotécnicos previos. En España se ha recorrido una parte importante del camino en la última década, pues los

diferentes textos emanados de Centros Directivos relativos al proyecto geotécnico de estructuras han ido evolucionando y aproximándose a la filosofía recogida en el EC7.

Como documentos previos al EC7 hay que considerar fundamentalmente tres textos, emanados de lo que hoy es el Ministerio de Fomento, de ámbito de aplicación y carácter bien diferenciado.

- *ROM 0.5 05 Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias* (2005, como actualización de la versión de 1994), no reglamentario
- *Guía de cimentaciones en obras de carretera* (2004), no reglamentario
- *Código Técnico de la Edificación* (2006), de carácter reglamentario, dividido en una serie de *Documentos Básicos*, uno de los cuales se dedica a cimentaciones

En el ámbito de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento el texto de referencia es el segundo de los citados, la *Guía de cimentaciones en obras de carretera* (2004), que podría considerarse un documento de transición entre los tratados clásicos sobre la materia y la práctica de los Eurocódigos, por cuánto que ya conoce las versiones ENV de estas normas y los borradores (muy avanzados) de las versiones EN vigentes a día de hoy. Así, aunque formula las verificaciones de la seguridad en coeficientes globales, propone diferentes valores numéricos en función de la combinación de acciones que se utilice, establece comprobaciones independientes para cada uno de los ELU y ELS, e incluye un apéndice dedicado a los coeficientes parciales y, en concreto, al EC7, que introduce indicando:

“El procedimiento de los coeficientes de seguridad parciales es una aproximación más lógica al problema de la incertidumbre, pero requiere una experiencia, de la que aún no se dispone, para establecer los valores concretos de cada coeficiente de seguridad para cada tipo de situación”.

Otros textos de la DGC como las guías de *Anclajes* (2001) o *Micropilotes* (2005) presentan una filosofía aún más cercana a la de los EC, toda vez que estas técnicas llevan bastantes años de adelanto en la aplicación de sus principios, respecto a las cimentaciones convencionales por zapatas o pilotes.

Después de estos textos y por orden cronológico, resultaba imprescindible la publicación del Anejo Nacional para poder aplicar el EC en nuestro país.

El *Anejo Nacional Español* al EC 7 constituye una empresa colectiva de la comunidad geotécnica española que ha supuesto un esfuerzo de alrededor de seis años (2010 – 16), liderado por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, que ha contado con el esfuerzo y la participación de administraciones, universidades y empresas constructoras y consultoras.

Partió de las premisas de intentar mantener los mismos niveles de seguridad que con la práctica nacional preexistente y de tratar de que la variación en los métodos/procedimientos de cálculo fuese lo menor posible.

A la vista de todo lo anterior, el resultado final ha sido un documento que goza de un consenso amplio y que, en parte de los NDP, ha necesitado de una doble entrada para distinguir la edificación de la obra civil.

Una vez publicado el Anejo Nacional todo estaba listo para la plena aplicación del EC7 en España si bien, desde la Dirección General de

Carreteras, se consideró oportuno acercar aún más los Eurocódigos al ámbito de la geotecnia vial, para lo que se decidió redactar una Guía de aplicación.

Una vez tomada la decisión, cabía la duda de si acometer la empresa partiendo del texto del EC7 vigente sobre el que se está llevando a cabo una intensa revisión, o si esperar que dicha revisión viese la luz. Se optó por lo primero, dado que la versión vigente del EC7 nos acompañará, al menos, durante cuatro o cinco años más y que los borradores de las nuevas partes –en los que participamos- brotan de los textos actualmente vigentes.

Creímos pues que la comunidad ingenieril española necesitaba los documentos a la mayor brevedad posible, aun a riesgo de que dentro de un lustro puedan requerir una actualización.

3. La serie *Guías Eurocódigos* de la DGC y la *Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con EC7*

Los objetivos y el contenido de la serie completa y, dentro de ella, la ubicación de los textos que nos ocupan como documentos unitarios e independientes se ha detallado en el artículo de Carlos Paradela Sánchez *et al*, dentro de este mismo Congreso, por lo que se remite al lector a dicho artículo. Asimismo, en dicho artículo se menciona a sus autores.

4. Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con EC7: Bases del proyecto geotécnico

La lectura de la obra que nos ocupa debiera ser previa al acometimiento del proyecto geotécnico de cualquier clase de obra, puesto

que se dedica precisamente a las bases del mismo. En el documento se presentan los conceptos y la filosofía de proyecto con EC7, que están introducidos en su capítulo 2 e inspiran todo el contenido de la norma. Hay, lógicamente, una estrecha relación entre el capítulo 2 de UNE-EN 1997-1, titulado *Bases del proyecto geotécnico*, y la norma UNE-EN 1990, en la cual se establecen las bases del cálculo estructural, lo que explica las numerosas referencias que se incluyen a esta norma.

En los primeros capítulos de la Guía, se pasa revista a conceptos básicos del proyecto, enmarcando los aspectos geotécnicos en el contexto general de las estructuras, así el capítulo 1 se dedica a principios generales y comprende las situaciones de proyecto, la definición de tres categorías geotécnicas (CG1 a CG3 ordenadas de menor a mayor complejidad) y los estados límite últimos ELU y de servicio ELS.

Los ELU que se consideran son los de equilibrio EQU, los de tipo estructural STR, los de tipo geotécnico GEO (con intervención de la resistencia del terreno), el de levantamiento UPL y los de tipo hidráulico HYD (sifonamiento, erosión interna y tubificación), que se ilustran en las figuras 3 a 7.

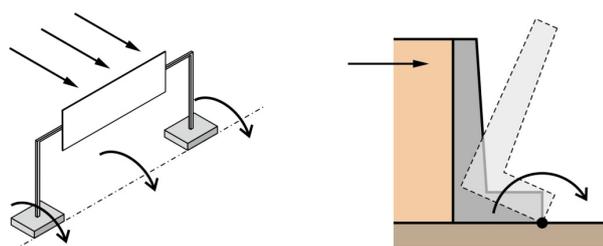


Figura 3. Ejemplos de ELU-EQU

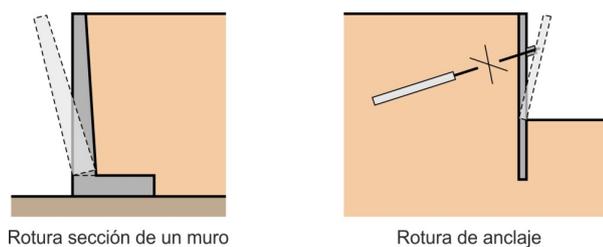


Figura 4. Ejemplos de ELU-STR

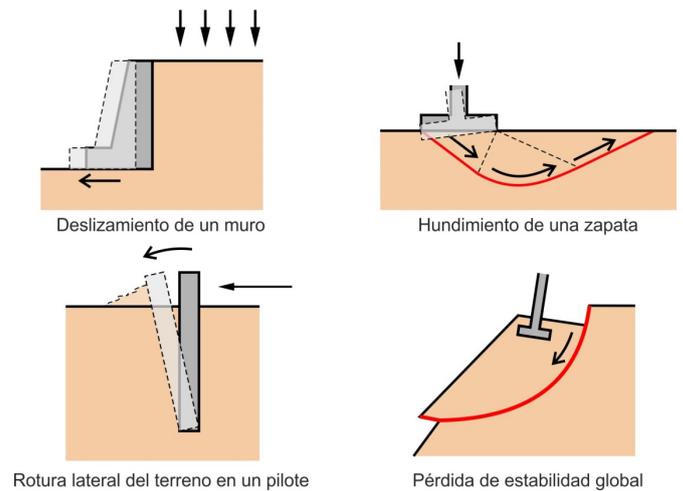


Figura 5. Ejemplos de fallo: ELU-GEO

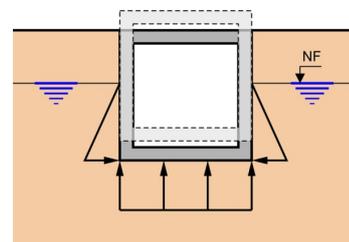


Figura 6. Ejemplo de fallo: ELU-UPL

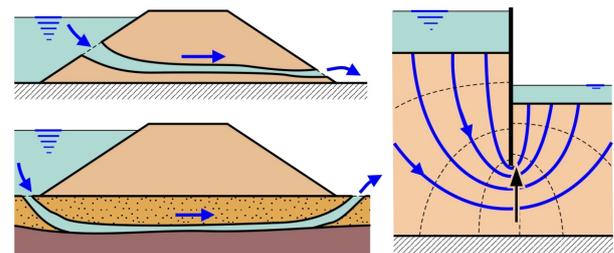


Figura 7. Ejemplos de fallo: ELU-HYD

El capítulo 2 es relativo a las acciones y comprende su clasificación (atendiendo a su origen, variaciones espacial y temporal y efecto estructural), introduce los conceptos de valor característico (con especial incidencia en el del empuje del agua intersticial), representativo y de cálculo, así como las combinaciones y efectos de las acciones. En este sentido conviene hacer notar que, si bien con carácter general, los efectos de las acciones que intervienen en la verificación de los ELU-STR son independientes de la resistencia de los materiales estructurales, en algunas verificaciones geotécnicas, los efectos de las acciones dependen de la resistencia del terreno (ejemplo en la figura 8).

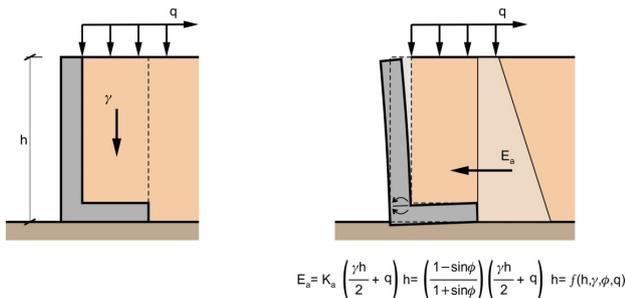


Figura 8. Acciones y efectos de las acciones en un muro de gravedad

El capítulo 3 trata las propiedades del terreno, que concreta en sus valores característico y de cálculo y el capítulo 4 hace un planteamiento similar en relación con los datos geométricos.

El proyecto geotécnico mediante cálculos -el procedimiento más habitual de abordar las verificaciones- es objeto del capítulo 5, que es el más extenso del documento. En él se explican y plantean las comprobaciones correspondientes a cada uno de los estados que puede ser necesario verificar en el proyecto de una cimentación, tanto las relativas a ELU como a ELS.

Los modelos de cálculo empleados en el proyecto de cimentaciones pueden ser analíticos, semiempíricos o numéricos.

También se analizan las diferencias entre los tres posibles enfoques de proyecto (abreviados por el acrónimo del término en lengua inglesa como DA) recogidos en el EC7 y de libre elección en cada país, para abordar las verificaciones de los ELU cuando intervienen acciones geotécnicas o participa en las verificaciones la resistencia del terreno; en el caso español, el Anejo Nacional ha optado por el DA-2 (figura 9), salvo para el ELU de estabilidad global en que se ha elegido el DA-3.

Por último, se plantea la comprobación de los ELS (figura 10).

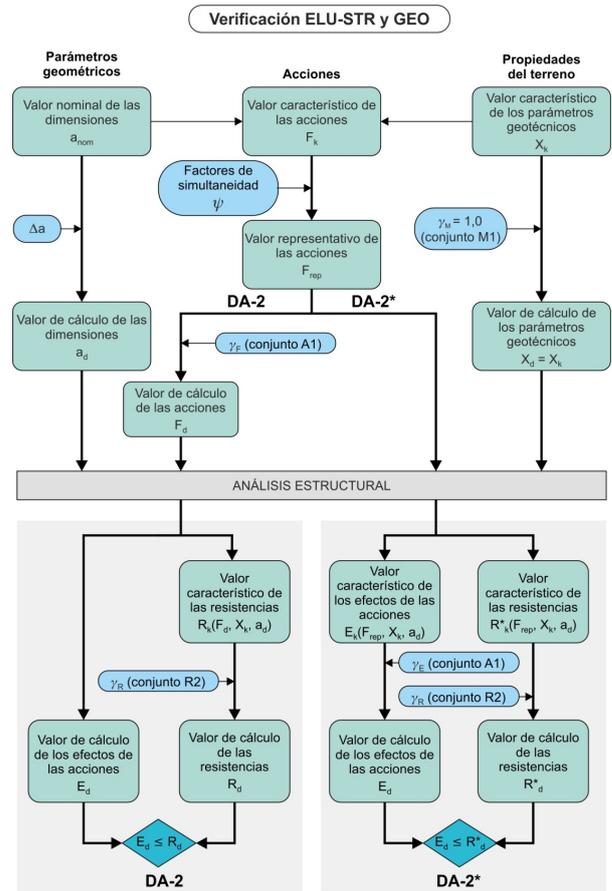


Figura 9. Diagrama de flujo para las verificaciones ELU-STR y GEO con DA-2 y con la variante denominada DA-2*

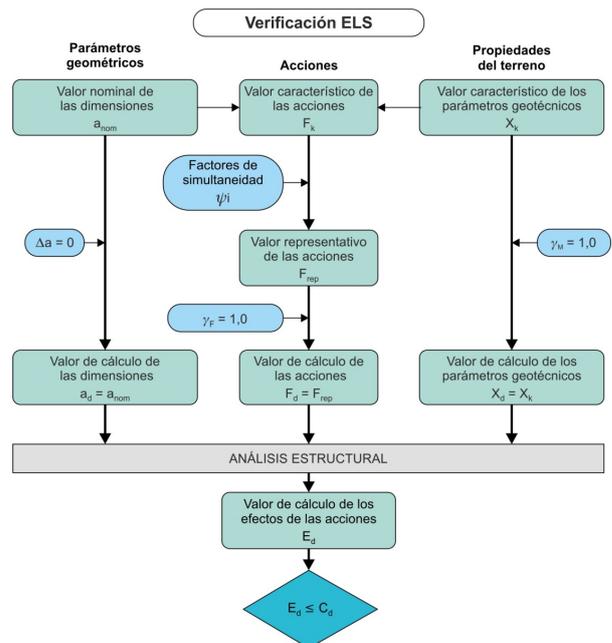


Figura 10. Diagrama de flujo para la verificación de los ELS

Los capítulos 6, 7 y 8 tratan de otros métodos de comprobación recogidos por el EC7.

El capítulo 6 se dedica a las medidas prescriptivas, que son una combinación de reglas de proyecto conservadoras avaladas por la práctica y de una detallada especificación y estricto control de materiales, ejecución y comportamiento en servicio. En general, las reglas de proyecto citadas suelen estar limitadas a un ámbito local. Pueden utilizarse cuando la *experiencia comparable* haga innecesarios los cálculos, así como en otras comprobaciones en que los cálculos no resulten apropiados.

El capítulo 7 introduce la posibilidad de considerar verificados los estados límite de una cimentación mediante en ensayos de carga o modelos experimentales

El capítulo 8 se dedica al método observacional, cuya esencia está en la planificación precisa de la monitorización y de las acciones a tomar como resultado de las observaciones. Deben estar previstos los requisitos mínimos a alcanzar en las diferentes etapas de la construcción; de esta manera, es posible efectuar hipótesis de comportamiento optimistas y pesimistas que se contrastan con el comportamiento real.

En el capítulo 9 se incluyen las indicaciones del EC7 relativas al alcance y contenido de los dos documentos principales en los que debe quedar recogida la información geotécnica de un proyecto, así como su encaje en la organización de la información que habitualmente se emplea en los proyectos de la Dirección General de Carreteras.

Por último, este documento incluye apéndices que reproducen totalmente los anejos nacionales de UNE-EN 1997 y parcialmente el de UNE-EN 1990, en lo que resulta de aplicación más inmediata al objeto del documento.

5 Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con EC7: Cimentaciones superficiales

Este documento explica y complementa el capítulo 6 *Cimentaciones superficiales*, de UNE-EN 1997-1, aunque para ello se incluyen también explicaciones relativas a otros capítulos y anejos de la misma norma, a la Parte 2 del mismo Eurocódigo, así como a UNE-EN 1990, *Bases de cálculo estructural*. La obra debe leerse a continuación del documento *Bases del proyecto geotécnico*, recién referido.

En el capítulo 1 de la Guía relativa a *Cimentaciones superficiales*, se incluye una breve introducción al concepto de la cimentación superficial propiamente dicha (canto de hasta dos veces el ancho del cimiento, $D \leq 2B$) y se define la notación, tipología y principales variables geométricas (figuras 11 y 12).

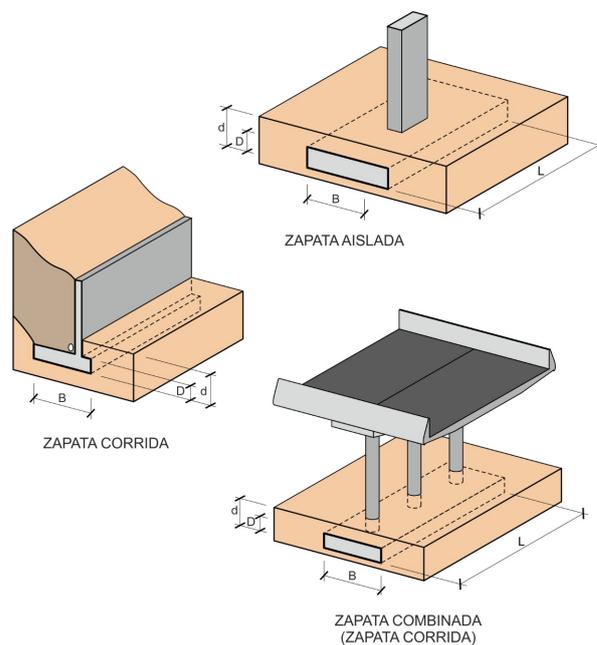


Figura 11. Tipos de cimentación superficial contemplados en la Guía

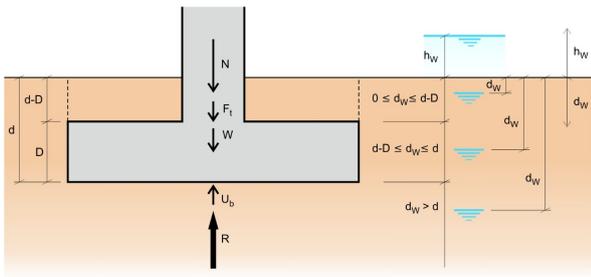


Figura 12. Definición de variables geométricas y acciones sobre una cimentación superficial sometida a carga vertical

El capítulo 2 se dedica a los estados límite y métodos de proyecto.

Los estados límite que se deben verificar en una cimentación superficial son los siguientes:

- Estabilidad global (ELU-GEO)
- Resistencia al hundimiento (ELU-GEO)
- Resistencia al deslizamiento (ELU-GEO)
- Asientos (ELS para la cimentación),
- Estados límite para la verificación estructural del elemento de cimentación (ELU-STR y ELS)

Además, es necesario determinar la excentricidad de la carga con la combinación de acciones correspondiente a ELU. También se refieren brevemente una serie de cuestiones relativas a la verificación del ELU-EQU, la socavación, la cimentación sobre suelos expansivos o solubles, etc.

Respecto a los métodos de proyecto en cimentaciones superficiales, el EC7 los clasifica en método directo, indirecto y prescriptivo.

- Con el método *directo* se verifica de forma independiente cada estado límite. En primer lugar, se verifican los ELU, empleando para ello modelos de cálculo que pretenden representar el mecanismo de fallo que realmente se produce; los modelos de cálculo pueden consistir en formulaciones analíticas o semiempíricas (basadas en correlaciones con ensayos de campo o métodos

numéricos). A continuación, se verifica el ELS de asientos y, si procede, de otros movimientos de la cimentación, mediante una evaluación de los mismos y comparación del resultado con unos valores límite.

- El método *indirecto* se basa en experiencia comparable referida a cargas de servicio, en el cual se utilizan resultados de ensayos de campo o laboratorio, con lo que se considera satisfecha automáticamente la verificación de asientos. Este método también cubre indirectamente los ELU, al menos para estructuras normales sin cargas excepcionales, verificándose la cimentación en ELS y en ELU mediante una única comprobación.
- En el método *prescriptivo* se utilizan reglas de proyecto conservadoras y avaladas por la práctica (basadas en experiencia obtenida de la observación del comportamiento en servicio) que, acompañadas de un estricto control de ejecución, permiten presuponer un comportamiento adecuado de la cimentación (por ejemplo, una determinada resistencia al hundimiento).

El capítulo 3 se dedica al análisis del ELU de estabilidad global (figura 13), que debe abordarse, cualquiera que sea el método de proyecto, con carácter previo a cualquier otra comprobación.

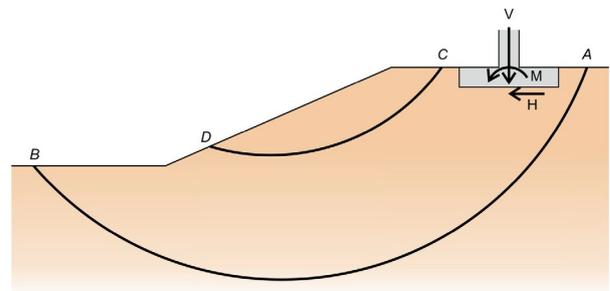


Figura 13. ELU de estabilidad global. Caso general

En los capítulos 4 y 5, se tratan pormenorizadamente cada una de las comprobaciones que es necesario efectuar si la verificación de la cimentación se lleva a cabo por el método directo, en el cual se verifican de forma independiente los ELU y los ELS. El método directo es el que se desarrolla más ampliamente en el EC7 por ser de aplicación general.

Concretamente el capítulo 4 se dedica a los ELU: ELU-GEO de hundimiento, tanto por procedimientos analíticos como semiempíricos (figura 14) y ELU-GEO de deslizamiento (figura 15).

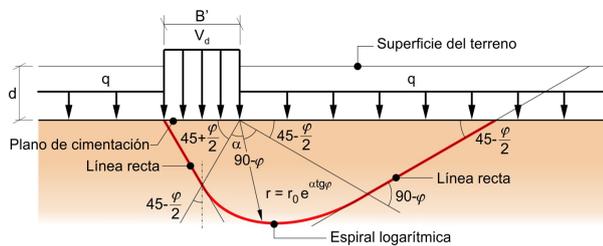


Figura 14. Superficie teórica de rotura por hundimiento en suelo homogéneo

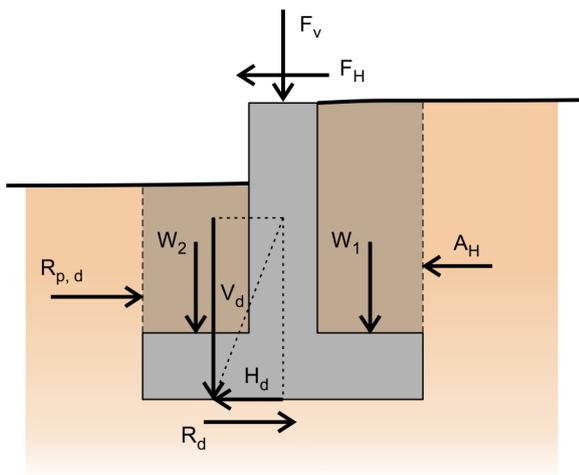


Figura 15. Resistencia frente al deslizamiento. Fuerzas actuantes

El capítulo 5 es relativo a las verificaciones en ELS, dentro de los cuales es la de asientos la que se estudia con mayor atención, según procedimientos analíticos y semiempíricos. Se introducen además propuestas relativas a la

evaluación de la rigidez relativa cimiento-terreno, a valores límite de los asientos y al tratamiento del asiento diferencial en el cálculo estructural (figuras 16 y 17).

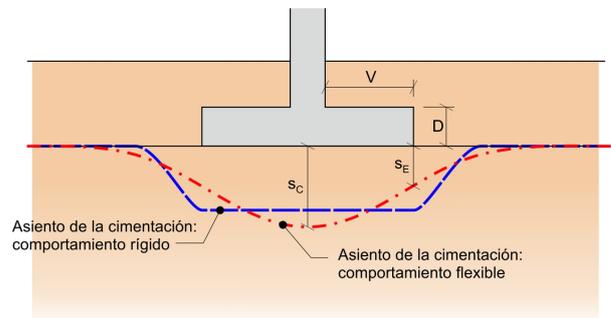


Figura 16. Distribución de asientos en función de la rigidez relativa cimiento-terreno

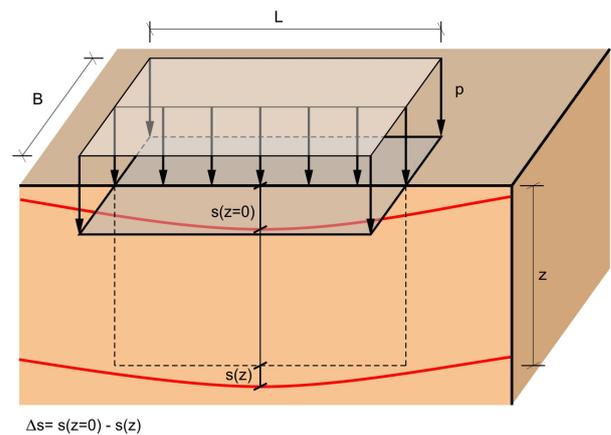


Figura 17. Asiento bajo el centro de cimentación rectangular (procedimiento de Steinbrenner)

A continuación, en el capítulo 6, se aborda el proyecto geotécnico por el método indirecto, cuya aplicación requiere el cumplimiento de una serie de condiciones y que permite efectuar la comprobación de las cimentaciones mediante procedimientos simplificados.

El capítulo 7, se dedica al método prescriptivo, del que constituye un ejemplo el anejo G del EC7 relativo a las cimentaciones superficiales en roca.

Por último, en el capítulo 8, se incluyen algunas consideraciones geotécnicas que deben ser tenidas en cuenta para llevar a cabo el proyecto estructural de la cimentación.

6. Consideraciones finales

Desde estas líneas animamos al lector a la descarga y lectura de las publicaciones de la serie que se acaba de presentar (figura 18), no sólo de estos dos títulos dedicados al EC7, sino de los que, a fecha de redacción de este artículo se encuentran ya disponibles y que abordan de forma integral temas tales como el diseño sísmico de puentes o la fatiga estructural

Como se ha indicado, se trata de una colección bibliográfica de contenido muy amplio y abierto, tanto como la propia familia de Eurocódigos que trata de aproximar a la comunidad ingenieril española.

La serie está planteada como un conjunto abierto de publicaciones que irá creciendo en función de las carencias o inquietudes técnicas que puedan surgir a medida que los Eurocódigos se impongan como código estructural español y se conviertan en textos de uso general.

En la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento se trabaja en nuevos títulos de la serie



Figura 18. Portada de los cuatro textos de la *Serie Guías Eurocódigos* de la DGC publicados en 2019