



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA GEOLÓGICA

Curso 2023-2024

**Comparativa de la verificación de Estado Límite
Último entre las normativas españolas y el
Eurocódigo 7 para cimentaciones superficiales en
distintos tipos de suelos**

*Comparative of the Ultimate Limit State verification between
the Spanish normativas and Eurocode 7 in shallow
foundations and different types of soil*

AMANDA ORTIZ DOMINGO

TUTOR: DAVID JIMÉNEZ MOLINA



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA GEOLÓGICA

Curso 2023-2024

Comparativa de la verificación de Estado Límite
Último entre las normativas españolas y el
Eurocódigo 7 para cimentaciones superficiales en
distintos tipos de suelos

AMANDA ORTIZ DOMINGO

TUTOR: DAVID JIMÉNEZ MOLINA

Fdo.: Amanda Ortiz Domingo

JIMENEZ
MOLINA
DAVID -
00834810W

Firmado digitalmente por
JIMENEZ MOLINA DAVID -
00834810W
Nombre de reconocimiento
(DN): c=ES,
serialNumber=IDCES-00834810
W, givenName=DAVID,
sn=JIMENEZ MOLINA,
cn=JIMENEZ MOLINA DAVID -
00834810W
Fecha: 2024.01.14 18:00:40
+01'00'

Fdo.: David Jiménez Molina



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

D^a Amanda Ortiz Domingo, con NIF 05940223J, estudiante del Máster Universitario en Ingeniería Geológica en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2023-2024, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado "Comparativa de la verificación de Estado Límite Último entre las normativas españolas y el Eurocódigo 7 para cimentaciones superficiales en distintos tipos de suelos" y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo tutor es: David Jiménez Molina.

DECLARO QUE:

El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en las referencias bibliográficas. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 14 de Enero de 2024

Fdo.:

AGRADECIMIENTOS

A David, mi tutor, por haber confiado en mí y haberme brindado toda la ayuda posible.

A Eva, mi madre, que me ha dado hasta lo que no tenía y siempre ha luchado por mí. Es todo un orgullo ser la hija de una persona tan maravillosa.

A Manu, mi novio, por ser mi mayor apoyo, enseñarme a creer en mí misma y mostrarme lo increíble que es día tras día.

A Toñi, mi abuela, por no dejar que me desviara del camino, ser una segunda madre y pensar más en mi futuro que en ella misma.

A Gabi, mi tío, por estar cuando lo he necesitado, demostrarme que con esfuerzo se puede conseguir cualquier cosa y ser el mejor profesor que he podido tener.

A Nala y Arwen, por hacerme mejor persona.

A mis amigos, por estar ahí en las buenas y en las malas.

A mis compañeros de INECO, por darme la oportunidad de poner en práctica todo lo aprendido en estos años de universidad.

A todos los profesores que he tenido en mi vida, por todas sus enseñanzas.

Y, especialmente, gracias a Gabriel, mi abuelo, allá donde esté, por ser la luz que me guía.

RESUMEN

Se ha realizado un estudio comparativo de la verificación de Estado Límite Último utilizando las normativas españolas (CTEC, GCOC y ROM) y el Eurocódigo 7 (EC7), con el fin de comprobar si los resultados obtenidos por esta última normativa difieren mucho de los obtenidos por las normativas españolas.

El análisis se ha realizado sobre cimentaciones superficiales, considerando distintos tipos de suelo, condiciones drenadas y no drenadas, diferentes tamaños de zapata y cargas verticales e inclinadas; de esta forma, se han estudiado un total de 128 escenarios diferentes y se ha calculado la carga de hundimiento y la carga admisible tanto en dimensionado persistente como extraordinario. Además, también se ha comprobado qué combinaciones cumplen las condiciones mínimas de seguridad, pudiendo determinar así cuántos escenarios inestables se obtienen con cada normativa.

En cuanto a la carga de hundimiento, el EC7 ha obtenido valores menores a las normativas españolas en todas las combinaciones posibles, es decir, es la normativa más conservadora; esto se debe a que los valores de los factores de corrección que emplea el EC7 son menores a los de las normativas españolas.

Al estudiar la carga admisible, con dimensionado persistente, el EC7 ha obtenido valores mayores para todas las combinaciones, mientras que, con dimensionado extraordinario, ha obtenido los valores menores de las cuatro normativas. El motivo de esto es que la carga admisible se obtiene dividiendo la carga de hundimiento por un coeficiente de seguridad en las normativas españolas, o aplicando unos coeficientes parciales en el EC7. Para dimensionado persistente, estos coeficientes parciales dividen el valor de carga de hundimiento entre 1,89 frente al valor 3 que usan las normativas españolas, por ello, el EC7 tiene más carga admisible, aunque su carga de hundimiento sea menor. Con dimensionado extraordinario, los coeficientes parciales dividen entre 2,1, que es un valor muy similar al que usan las normativas españolas, de ahí que el EC7 tenga los menores resultados.

Por último, en el análisis de estabilidad, se ha comprobado que las normativas tienen aproximadamente el mismo número de combinaciones inestables: 27 para CTEC, 29 para ROM y EC7 y 30 para GCOC.

Índice

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
2. ANTECEDENTES	2
3. METODOLOGÍA.....	4
3.1 Descripción de cimentaciones superficiales, Estados Límite y Normativas	4
3.2 Metodología ELU	6
3.2.1 Formulación analítica de la carga de hundimiento.....	6
3.2.2 Especificidades de cada normativa.....	8
3.2.3 Análisis de la seguridad	11
4. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO COMPARATIVO	14
4.1 Escenarios de cálculo.....	14
4.2 Obtención de las cargas actuantes	16
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
5.1 Cálculo de las cargas de hundimiento	21
5.2 Análisis de la seguridad.....	28
5.2.1 Cálculo de cargas admisibles	28
5.2.2 Análisis de estabilidad.....	34
6. CONCLUSIONES.....	39
7. BIBLIOGRAFÍA	41
8. ANEXOS	43
8.1 Parámetros utilizados en el cálculo de carga de hundimiento.....	43
8.2 Relación entre valores de carga de hundimiento para las distintas normativas	45
8.3 Gráficas de carga admisible en dimensionado persistente y extraordinario	46

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En España, actualmente, se utilizan distintas normativas para la elaboración de proyectos de diseño geotécnico (Documento Básico SE-C del Código Técnico de la Edificación, Guía de Cimentaciones para Obras de Carretera y las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias) (Estaire & Perucho, 2008), en función del tipo de actuación o situación. Los principales problemas de esto son los distintos procedimientos y criterios de toma de datos de forma nacional, así como la diferenciación metodológica con el resto de Europa, lo que dificulta la cooperación e integración de España en el ámbito internacional.

Esa necesidad de convergencia de la Unión Europea es la que llevó al Comité Europeo de Normalización (CEN) a publicar el Eurocódigo 7 como norma europea EN1997 (Estaire & Bond, 2020); la diferencia del Eurocódigo 7 con el resto de las normativas mencionadas, es que introduce el método de los estados límite con coeficientes parciales, en vez del uso de métodos basados en tensiones admisibles (Crespo *et al.*, 2014).

España no sigue Normas Europeas (EN) como los países miembros del CEN, sino normas UNE, por lo que el uso de Eurocódigos es de índole alternativa; sin embargo, ya se ha implementado La Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7, la cual une conceptos básicos de ambas normativas (Ministerio de Fomento, 2019b), y se espera que para 2025 este Eurocódigo esté aprobado y pueda utilizarse finalmente (Estaire & Bond, 2020).

A priori, esta convergencia podría suponer muchas ventajas en el ámbito internacional, pero, en principio, España decidió mantener su propia normativa, argumentando los siguientes inconvenientes: la complejidad e inconsistencia de los Eurocódigos en otros ámbitos, y el coste y riesgo que supondría hacer un cambio tan grande (Pérez *et al.*, 2008).

El objetivo de este Trabajo es verificar la experiencia de uso y la fiabilidad en los resultados obtenidos al utilizar el Eurocódigo 7 en lugar de otras normativas de cara a su implementación en España. Para ello, se ha realizado una comparativa entre los resultados obtenidos por el Eurocódigo 7 frente a las normativas españolas al hacer la verificación del Estado Límite Último, calculando las cargas de hundimiento y admisibles para cimentaciones superficiales en distintos tipos de suelos y condiciones, comprobando así si existen escenarios o condiciones en los que el Eurocódigo 7 obtiene resultados anormales, o claramente diferenciados de los obtenidos con las normativas nacionales, que permita calibrar en último término las condiciones de seguridad en la optimización del diseño.

2. ANTECEDENTES

En 1975, la Comisión de Comunidades Europeas (CEE), con objeto de establecer unas reglas técnicas armonizadas en la industria de la construcción, se planteó un sistema de especificaciones común para sus Estados miembros (Serra María-Tomé, 1996). De esta manera nacieron los Eurocódigos Estructurales, un conjunto de normas europeas unificadas que desempeñan funciones estructurales y geotécnicas para edificación y obra de ingeniería civil, introduciendo metodología de proyecto basada en los estados límites (Gutiérrez, 1994).

Se estableció un programa inicial de 9 Eurocódigos, que fue desarrollado por el Comité Europeo de Normalización (CEN) en 1990. Estas normas fueron aprobadas primero con carácter experimental (Norma Europea Experimental o ENV) y aplicación provisional en 1993, haciendo su conversión a Norma Europea (EN) dos años después (Gutiérrez, 1994; Serra María-Tomé, 1996).

Actualmente, en España, las normas EN no son de obligado cumplimiento, ya que aquí se rigen por los documentos normativos UNE (acrónimo de Una Norma Española), que son normas e informes creados en los Comités Técnicos de Normalización de la Asociación Española de Normalización. La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), que es miembro del CEN, es el responsable de transponder cada una de las partes de los Eurocódigos (Serra María-Tomé, 1996).

Por su parte, el Eurocódigo 7 fue publicado como norma europea EN1997 en 2004, pero no se espera que esté aprobada formalmente su utilización hasta 2025, ya que tiene que hacerse cumpliendo con los requisitos y recomendaciones básicas, comunes a todos los Eurocódigos, recogidos en el Eurocódigo 0 (“Bases del proyecto estructural y geotécnico”) (Estaire & Bond, 2020).

Los Eurocódigos se publican con la misma redacción EN en cada país, pero estos deben producir anexos nacionales (NA), dando sus propios factores parciales y otros parámetros de seguridad (Parámetros Determinados a Nivel Nacional o NDP) según la construcción que se lleve a cabo (Orr, 2012).

El Anejo Nacional Español, redactado por personal técnico del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, apoyado por profesionales del ámbito geotécnico nacional, es el que define el enfoque de proyecto apropiado a cada situación, además de los valores de los factores parciales para las distintas actuaciones geotécnicas incluidas en el Eurocódigo 7. El principal problema de aunar el Eurocódigo con la normativa española, es que, en España, existen tres documentos con carácter geotécnico que presentan formulaciones distintas, lo que lleva a dimensionamientos dispares: Documento Básico SE-C del Código Técnico de la Edificación

(CTE), Guía de Cimentaciones para Obras de Carretera (GCOC) y las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (R.O.M. 0.5-05) (Estaire *et al.*, 2016).

En 2013 fue publicada la Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7, un documento que constituye un punto de partida en la armonización del proyecto geotécnico entre España y el resto de los países miembros del CEE, enfocado en el uso e interpretación del Eurocódigo 7 para conseguir actuaciones geotécnicas similares a los de la normativa española (Ministerio de Fomento, 2019b).

3. METODOLOGÍA

Se describe a continuación el tipo de obra geotécnica en el que se va a basar el estudio, además de las distintas formulaciones proporcionadas por cada normativa para su dimensionado.

3.1 Descripción de cimentaciones superficiales, Estados Límite y Normativas

Las cimentaciones se clasifican en superficiales/directas, semiprofundas/pozos o profundas/pilotaje según sea el modo de transmisión de la carga al terreno.

Concretamente, una cimentación superficial es aquella que transmite a las capas más superficiales del terreno las cargas de la estructura (Ministerio de Fomento, 2019b), repartiendo la carga vertical sobre una mayor superficie y facilitando así la estabilidad de la cimentación. El plano de contacto entre el terreno y la estructura se encuentra a una profundidad del orden de hasta dos veces el ancho de la cimentación ($D \leq 2B$) (Ministerio de Fomento, 2009). El reparto de cargas se realiza directamente, extendiendo lateralmente las cargas mediante zapatas o losas; las zapatas pueden clasificarse como aisladas, corridas o combinadas (Rodríguez *et al.*, 1993), cada una con una morfología o diseño adaptado a las circunstancias de la estructura que deben soportar (Figura 1).



Figura 1: Breve explicación de los distintos tipos de cimentación superficial y esquema en planta de cada una. Obtenida de Ministerio de Fomento (2019a).

Las cimentaciones superficiales pueden fallar por varios motivos, experimentando distintos tipos de rotura. Estos fallos en la cimentación quedan recogidos en los Estados Límite Último y de Servicio.

El Estado Límite Último (ELU) es aquel cuyo suceso está controlado principalmente por las características del terreno. Son los estados que, mediante rotura o colapso estructural, provocan una situación de ruina en la obra o en parte de ella, cuya reparación requiere prácticamente la reconstrucción del cimiento (Ministerio de Fomento, 2009); para evitar este hecho, se debe hacer una comprobación de la seguridad considerando los siguientes modos de fallo (Ministerio de Fomento, 2019a):

- Pérdida de la capacidad portante del terreno de apoyo de la cimentación por hundimiento, deslizamiento o vuelco, entre otros.
- Pérdida de la estabilidad global del terreno en el entorno próximo a la cimentación.
- Pérdida de la capacidad resistente de la cimentación por fallo estructural.
- Fallos originados por efectos que dependen del tiempo (durabilidad del material de la cimentación, fatiga del terreno sometido a cargas variables repetidas).

El Estado Límite de Servicios (ELS) conlleva distintos movimientos, procesos y asentamientos inadmisibles para la estructura cimentada, así como su evolución a lo largo del tiempo, puesto que estos pueden dar lugar a una pérdida de la funcionalidad para la cual fue creada la estructura, a un defecto en su aspecto o a un problema para el bienestar del usuario, sin que eso suponga el colapso o la rotura de esta (Ministerio de Fomento, 2019b). Su ocurrencia limita su capacidad funcional, pero no la ruina total de la estructura, por lo que tienen consecuencias menos graves que los fallos de los ELU (Ministerio de Fomento, 2009). Deben considerarse los siguientes modos de fallo (Ministerio de Fomento, 2019a):

- Movimientos excesivos de la cimentación
- Vibraciones
- Daños o deterioro de la estructura
- Plastificaciones localizadas

Este trabajo se va a centrar en las verificaciones correspondientes al Estado Límite Último, concretamente, a los fallos debidos al hundimiento de la cimentación.

Vistos los Estados Límite y sus posibles métodos de fallo, a continuación, se describen las normativas que se van a utilizar en este estudio:

- Documento Básico SE-C del Código Técnico de la Edificación (CTE): Este documento está orientado a la Seguridad Estructural de los Cimientos, siendo su ámbito de aplicación el de la seguridad estructural, la capacidad portante y la aptitud al servicio de estos, además de la contención de cualquier tipo de edificios en relación con el terreno.

- Guía de Cimentaciones para Obras de Carretera (GCOC): Guía que explica las normas que deben aplicarse en la construcción, los proyectos y en la conservación de las obras de cimentación en carreteras. Se entiende como “obra de cimentación” aquella parte de una estructura, cuyo objetivo es transmitir al terreno su propio peso, así como el de las cargas soportadas por la misma.
- Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM 0.5-05): Directrices para el cálculo geotécnico de las Obras Marítimas y Portuarias, que consisten en las estructuras, elementos estructurales y movimientos de tierra localizados en el dominio público marítimo-terrestre, siempre que permanezcan en situación estacionaria en Fase de Servicio, tanto en forma fija como flotante.
- Eurocódigo 7 (EC-7): Denominado Proyecto geotécnico dentro del resto de eurocódigos, es el eurocódigo estructural que trata los aspectos geotécnicos del proyecto de estructuras, de edificación y de ingeniería civil. Este eurocódigo establece las normas para determinar las acciones geotécnicas, así como el planteamiento de las comprobaciones de los Estados Límite. Engloba la elección del enfoque de Proyecto a utilizar para cada tipo de actuación geotécnica, además de la determinación de los valores de los factores parciales que afectan a las acciones o a los efectos de las acciones, a los parámetros geotécnicos y a las resistencias.

3.2 Metodología ELU

3.2.1 Formulación analítica de la carga de hundimiento

La carga de hundimiento de una cimentación es aquella que representa la máxima resistencia del terreno y que, de ser superada, produciría una cuña de rotura pudiendo causar el colapso total o parcial de la estructura.

La primera formulación de la carga de hundimiento es creada en 1920 por Prandtl; esta fórmula estaba basada en la teoría de la plasticidad y suponía que el terreno era incompresible en los estados previos a la rotura. Una limitación de la fórmula de Prandtl era que no se tenía en cuenta la influencia del peso del terreno en el cálculo, por lo que Terzaghi, en 1943, modificó la ecuación y obtuvo la conocida expresión general de carga de hundimiento en zapatas corridas, que es la siguiente (Ortega *et al.*, 2014):

$$q_h = c \cdot N_c + q_o \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

Donde:

- q_h es la carga de hundimiento (en kPa)
- c es la cohesión efectiva del terreno (en kPa)
- q_o es la carga en el plano de cimentación (en kPa)
- γ es el peso específico del terreno (en kN/m³)

- B es la dimensión menor de la cimentación (en m)
- N_γ , N_c y N_q son los factores de capacidad de carga

Adicionalmente, la fórmula para condiciones no drenadas, es decir, cuando el ángulo de rozamiento del terreno es 0 ($\varphi' = 0$), es la siguiente:

$$q_h = (\pi + 2) \cdot s_u + q$$

Donde:

- q_h es la carga de hundimiento (en kPa)
- s_u es la resistencia al corte sin drenaje del terreno (en kPa)
- q es la carga en el plano de cimentación (en kPa)

Más adelante, el propio Terzaghi incluyó un factor de corrección que permitía aplicar esta fórmula a cimentaciones teniendo en cuenta zapatas de distintas formas. Meyerhof y Brinch-Hansen continuaron con el desarrollo del cálculo, incluyendo factores de corrección que solucionaban las limitaciones que tenía la expresión de Terzaghi (Ortega *et al.*, 2014):

- Meyerhof, entre 1951 y 1963, añadió los parámetros s_i , i_i y d_i , que permitían considerar zapatas de dimensiones finitas, cargas con componentes horizontales y la contribución del terreno por encima del plano de cimentación, respectivamente. Además, añadió el efecto de las cargas excéntricas, considerando que parte del ancho de cimentación no contribuye a la capacidad resistente cuando se dan este tipo de cargas: $B^* = B - 2e$, siendo e la excentricidad de la carga vertical (Ortega *et al.*, 2014).
- Brinch-Hansen incluyó, en 1961, unos factores de corrección, similares a los de Meyerhof, a los que dotó de formulación propia y que aplicaba a todos los términos de la expresión de Terzaghi. En 1970, introdujo dos nuevos factores que permitían calcular casos en los que la base de la cimentación no era horizontal, y casos en los que el terreno presentaba un cierto talud, b_i y g_i , respectivamente. Otra gran aportación fue que contempló la posibilidad de que la inclinación de la carga produjese la rotura de la cimentación tanto en el lado corto (B) como en el largo (L) de la zapata (Ortega *et al.*, 2014).

Tras la introducción de todos estos cambios, la expresión de la carga de hundimiento queda de la siguiente manera:

$$q_h = cN_c s_c d_c i_c b_c g_c + q_o N_q s_q d_q i_q b_q g_q + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma$$

Donde:

- q_h es la carga de hundimiento (en kPa)
- c es la cohesión efectiva del terreno (en kPa)
- N_γ , N_c y N_q son los factores de capacidad de carga
- q_o es la carga en el plano de cimentación (en kPa)
- γ es el peso específico del terreno (en kN/m³)

- B es la dimensión menor de la zapata (en m)
- s_i es el factor de corrección por forma de la zapata
- d_i es el factor de corrección por la profundidad del plano de cimentación
- i_i es el factor de corrección por inclinación de la carga
- b_i es el factor de corrección por inclinación del plano de cimentación
- g_i es el factor de corrección por la proximidad a un talud

La fórmula para condiciones no drenadas es la siguiente:

$$q_h = (\pi + 2) \cdot s_u \cdot (1 + s_c + d_c - i_c - b_c - g_c)$$

Donde:

- q_h es la carga de hundimiento (en kPa)
- s_u es la resistencia al corte sin drenaje del terreno (en kPa)
- s_c es el factor de corrección por forma de la zapata
- d_c es el factor de corrección por la profundidad del plano de cimentación
- i_c es el factor de corrección por inclinación de la carga
- b_c es el factor de corrección por inclinación del plano de cimentación
- g_c es el factor de corrección por la proximidad a un talud

3.2.2 Especificidades de cada normativa

A continuación, se presentan las diferentes fórmulas utilizadas en cada normativa para obtener los distintos parámetros de la expresión de carga de hundimiento en condiciones drenadas.

Expresiones para los coeficientes de capacidad de carga N_q , N_c y N_γ (Tabla 1):

Factor	N_q	N_c	N_γ
CTEC	$e^{\pi tg\varphi} tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$	$(N_q - 1) cotg\varphi$	$1,5(N_q - 1)tg\varphi$
GCOG			$2(N_q - 1)tg\varphi$
ROM 0.5-05			$1,5(N_q - 1)tg\varphi$
EC-7			$2(N_q - 1)tg\varphi$

Tabla 1: Expresiones de los coeficientes de capacidad de carga para cada normativa en condiciones a largo plazo. Modificado de Estaire y Perucho (2008).

Expresiones para los factores de forma s_q , s_c y s_γ (Tabla 2):

Factor	s_q	s_c	s_γ
CTEC	$1 + 1,5tg\varphi \frac{B^*}{L^*}$	$1 + 0,2 \frac{B^*}{L^*}$	$1 - 0,3 \frac{B^*}{L^*}$
GCOG	$1 + \frac{N_q B^*}{N_c L^*}$	$1 + \frac{N_q B^*}{N_c L^*}$	$1 - 0,3 \frac{B^*}{L^*}$

ROM 0.5-05	$1 + \frac{N_q B^*}{N_c L^*}$	$1 + \frac{N_q B^*}{N_c L^*}$	$1 - 0,4 \frac{B^*}{L^*}$
EC-7	$1 + \frac{B^*}{L^*} \text{sen}\varphi$	$\frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$1 - 0,3 \frac{B^*}{L^*}$

Tabla 2: Expresiones de los factores de corrección por forma de la zapata para cada normativa en condiciones a largo plazo. Modificado de Estaire y Perucho (2008).

Expresiones para los factores de profundidad d_q , d_c y d_v (Tabla 3):

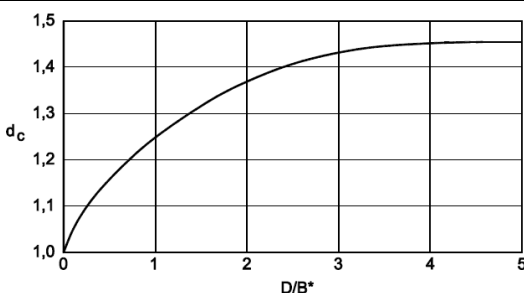
Factor	d_q	d_c	d_v	
CTEC	$1 + 2 \frac{N_q}{N_c} (1 - \text{sen}\varphi)^2 \text{arctg}\left(\frac{D}{B^*}\right)$ $D \leq 2B^*$		1	
GCOC	$1 + 2 \text{tg}\varphi (1 - \text{sen}\varphi)^2 \text{arctg}\left(\frac{D}{B^*}\right)$ (arco en radianes) $D \leq 2B^*$ (la ROM 05-94 no lo indica) La ROM 05-94 toma B			$1 + 2 \frac{N_q}{N_c} (1 - \text{sen}\varphi)^2 \text{arctg}\left(\frac{D}{B^*}\right)$ (arco en radianes) $D \leq 2B^*$ (la ROM 05-94 no lo indica) La ROM 05-94 toma B
ROM 0.5-05				
EC-7	1	1		

Tabla 3: Expresiones de los factores de corrección por profundidad del plano de cimentación para cada normativa en condiciones a largo plazo. Modificado de Estaire y Perucho (2008). Gráfica obtenida de Ministerio de Fomento (2019a).

Expresiones para los factores de inclinación i_q , i_c y i_v (Tabla 4):

Factor	i_q	i_c	i_v
CTEC	$(1 - 0,7 \text{tg}\varphi_B)^3 (1 - \text{tg}\varphi_L)$	$\frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$(1 - \text{tg}\varphi_B)^3 (1 - \text{tg}\varphi_L)$
GCOC	$(1 - 0,7 \text{tg}\varphi_B)^3 (1 - \text{tg}\varphi_L)$	$\frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$(1 - \text{tg}\varphi_B)^3 (1 - \text{tg}\varphi_L)$
ROM 0.5-05	$(1 - 0,7 \text{tg}\varphi_B)^3$	$\frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$(1 - \text{tg}\varphi_B)^3$
EC-7	$\left(1 - \frac{H}{V + A'c' \cotg\varphi}\right)^m$ (1)	$\frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$\left(1 - \frac{H}{V + A'c' \cotg\varphi}\right)^{m+1}$ (1)
Nota: (1) Carga H paralela a B $\rightarrow m = m_B = \frac{2 + \frac{B^*}{L^*}}{1 + \frac{B^*}{L^*}}$			

Tabla 4: Expresiones de los factores de corrección por inclinación de la carga para cada normativa en condiciones a largo plazo. Modificado de Estaire y Perucho (2008).

De la misma forma, se presentan las diferentes fórmulas utilizadas en cada normativa para obtener los distintos parámetros de la expresión de carga de hundimiento para condiciones no drenadas.

Expresiones para los coeficientes de capacidad de carga N_q , N_c y N_γ (Tabla 5):

Factor	N_q	N_c	N_γ
CTEC	1	5,14	0
GCOC			
ROM 0.5-05			
EC-7			

Tabla 5: Expresiones de los coeficientes de capacidad de carga para cada normativa en condiciones a corto plazo. Modificado de Estaire y Perucho (2008).

Expresiones para los factores de forma s_q , s_c y s_γ (Tabla 6):

Factor	s_q	s_c	s_γ
CTEC	1	$1 + 0,2 \frac{B^*}{L^*}$	No importa, pues $N_\gamma = 0$
GCOC	$1 + \frac{N_q B^*}{N_c L^*}$	$1 + \frac{N_q B^*}{N_c L^*}$	
ROM 0.5-05	$1 + \frac{N_q B^*}{N_c L^*}$	$1 + \frac{N_q B^*}{N_c L^*}$	
EC-7	1	$1 + 0,2 \frac{B^*}{L^*}$	

Tabla 6: Expresiones de los factores de corrección por forma de la zapata para cada normativa en condiciones a corto plazo. Modificado de Estaire y Perucho (2008).

Expresiones para los factores de profundidad d_q , d_c y d_γ (Tabla 7):


Factor	d_q	d_c	d_γ
CTEC	1		No importa, pues $N_\gamma = 0$
GCOC	$1 + 2tg\varphi(1 - sen\varphi)^2 arctg\left(\frac{D}{B^*}\right)$ (arco en radianes) $D \leq 2B^*$ (la ROM 05-94 no lo indica) La ROM 05-94 toma B	$1 + 2 \frac{N_q}{N_c} (1 - sen\varphi)^2 arctg\left(\frac{D}{B^*}\right)$ (arco en radianes) $D \leq 2B^*$ (la ROM 05-94 no lo indica) La ROM 05-94 toma B	
ROM 0.5-05			
EC-7	1	1	

Tabla 7: Expresiones de los factores de corrección por profundidad del plano de cimentación para cada normativa en condiciones a largo plazo. Modificado de Estaire y Perucho (2008). Gráfica obtenida de Ministerio de Fomento (2019a).

Expresiones para los factores de forma i_q , i_c y i_y (Tabla 8):

Factor	i_q	i_c	i_y
CTEC	$(1 - 0,7tg\theta_B)^3(1 - tg\theta_L)$	$0,5 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{H}{B^*L^*c}} \right)$	No importa, pues $N_y = 0$
GCOC	1		
ROM 0.5-05	$(1 - 0,7tg\theta_B)^3$		
EC-7	1		

Tabla 8: Expresiones de los factores de corrección por inclinación de la carga para cada normativa en condiciones a corto plazo. Modificado de Estaire y Perucho (2008).

3.2.3 Análisis de la seguridad

Para analizar la estabilidad de la cimentación, se hace una comparación entre las cargas actuantes y la resistencia del terreno, que sería la carga de hundimiento. Cada normativa aborda este análisis de forma diferente, siendo muy similar entre sí el método de las españolas en comparación con el Eurocódigo 7.

Las normativas españolas determinan un factor o coeficiente de seguridad frente al hundimiento mediante la siguiente expresión:

$$F_s = \frac{q_h}{q_{adm}}$$

Donde:

- F_s es el coeficiente de seguridad frente al hundimiento
- q_h es la carga de hundimiento (en kPa)
- q_{adm} es la carga admisible (en kPa)

Antes de que ocurra el hundimiento, la carga admisible es el máximo valor de carga que se permite que actúe sobre la cimentación. Cada normativa establece un coeficiente de seguridad mínimo para considerar una cimentación estable; si se obtiene un valor inferior a los coeficientes que aparecen a continuación, no se puede garantizar la seguridad (Tabla 9):

Normativa	Factor de seguridad	
	Persistente	Extraordinaria
CTEC	3	2
GCOC	3	2,4
ROM	3	2,2

Tabla 9: Factores o coeficientes de seguridad utilizados por las normativas españolas para cada situación de dimensionado.

Persistente y Extraordinaria hacen referencia a la situación de dimensionado que se esté considerando: situaciones persistentes se refieren a las circunstancias comunes y permanentes que van a influir sobre la cimentación, mientras que las extraordinarias incluyen eventos o situaciones muy poco frecuentes, como podría ser un sismo. Cuando el análisis de seguridad da como resultado uno de los coeficientes de seguridad de la Tabla 9, se considera que está en un estado de equilibrio límite entre la estabilidad y la inestabilidad; en esa situación, la carga actuante (q_{act}) que esté afectando al plano de cimentación debe tener el mismo valor que la carga admisible, y será la máxima carga que pueda soportar la cimentación.

Por otro lado, el Eurocódigo 7 verifica la seguridad cuando se cumple la siguiente comparación de parámetros:

$$V_d < R_d$$

Donde:

- V_d es la carga de proyecto perpendicular (en kPa), considerando el peso de la propia cimentación y materiales de relleno si los hubiera
- R_d es la capacidad portante de proyecto (en kPa), considerando cargas inclinadas y excentricidad

En lugar de utilizar un único coeficiente de seguridad como hacen las normativas españolas, el EC-7 utiliza coeficientes de seguridad parciales que se aplican a las cargas actuantes, a las propiedades del terreno y a la capacidad portante del terreno. Dichos coeficientes varían en función del método de proyecto, que son distintas combinaciones de estos coeficientes parciales que se aplican en función del país (Tabla 10):

$$V_d = \gamma_{G/Q} \cdot q_{act}$$

$$R_d = \frac{q_h}{\gamma_R}$$

Donde:

- V_d es la carga de proyecto perpendicular (en kPa), considerando el peso de la propia cimentación y materiales de relleno si los hubiera
- γ_G es el coeficiente parcial para acciones persistentes
- γ_Q es el coeficiente parcial para acciones extraordinarias
- q_{act} es la carga actuante máxima sobre el plano de cimentación (en kPa)

- R_d es la capacidad portante de proyecto (en kPa), considerando cargas inclinadas y excentricidad
- q_h es la carga de hundimiento (en kPa)
- γ_R es el coeficiente parcial para la capacidad portante del terreno

Método de proyecto	Acciones			Propiedades del terreno (γ_M)		Capacidad portante (γ_R)
	Persistentes (γ_G)		Extraordinarias (γ_Q)	Tan ϕ'	c'	
	Desfavorable	Favorable	Desfavorable			
1 Combinación 1	1,35	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00
2 Combinación 2	1,00	1,00	1,30	1,25	1,25	1,00
2	1,35	1,00	1,50	1,00	1,00	1,40
3	1,35 ⁽¹⁾ 1,00 ⁽²⁾	1,00 ⁽¹⁾ 1,00 ⁽²⁾	1,50 ⁽¹⁾ 1,30 ⁽²⁾	1,25	1,25	1,00

Nota: (1) Para acciones estructurales
(2) Para acciones procedentes del terreno

Tabla 10: Valores de los coeficientes parciales del Eurocódigo 7 para las acciones, propiedades del terreno y capacidad portante de cada método de proyecto.

Los coeficientes parciales γ_G y γ_Q se seleccionan según la situación de dimensionado. En este estudio se va a utilizar el método de proyecto 2, que no modifica los valores de las propiedades del terreno, porque su uso está muy extendido en Europa (Estaire *et al.*, 2012).

4. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO COMPARATIVO

El objetivo principal de este trabajo es comparar los resultados obtenidos al hacer las verificaciones de ELU según las directrices del EC-7 con los de las normativas españolas. Para este fin, se van a presentar los diferentes escenarios de cálculo que permitirán analizar los valores obtenidos por cada normativa, de forma que se podrá comprobar el funcionamiento y la variabilidad de resultados de las normativas en distintos entornos y condiciones.

4.1 Escenarios de cálculo

Para comparar los resultados de la verificación de ELU, se va a utilizar la formulación introducida en el anterior capítulo para calcular la carga de hundimiento y admisible, siguiendo las directrices de cada normativa. Como el fin del estudio es probar el EC-7 en distintos escenarios, se presentan las distintas condiciones cuya combinación dará lugar a dichos escenarios (Tabla 11):

Categoría	Descripción	Código
Normativas utilizadas	CTEC	CTEC
	GCOC	GCOC
	ROM	ROM
	EC-7	EC7
Tipo de terreno	Suelo 1	1
	Suelo 2	2
	Suelo 3	3
	Suelo 4	4
Condiciones	Corto plazo (sin drenaje)	C
	Largo plazo (con drenaje)	L
Tamaño zapata	Pequeña	P
	Grande	G
Inclinación de cargas	Vertical	V
	Inclinada	I

Tabla 11: Desglose de las categorías y elementos que formarán parte de las combinaciones. A la derecha aparece el número o letra que permitirá referirse a las combinaciones mediante códigos sencillos.

En la tabla aparecen diferentes categorías que serán las principales variables de los escenarios de cálculo. Cada una de ellas, a su vez, tiene distintos elementos que podrán combinarse entre categorías; así, se podrá comprobar la variabilidad de los resultados al modificar en mayor o menor medida los elementos de cada una. Se ha asignado un código, de forma que se puede hacer una referencia rápida a cualquier combinación. Por ejemplo, un escenario de cálculo con el CTEC en el suelo 1, en condiciones a corto plazo, con un tamaño

de zapata pequeño y carga vertical, sería CTEC-1CPV; en cambio, al utilizar ROM en un suelo 4, a largo plazo, con zapata pequeña y carga inclinada, la combinación sería ROM-4LPI. En total, se obtendrán 128 combinaciones diferentes, cada una con su valor de carga de hundimiento y admisible en situaciones persistentes y extraordinarias. Para los cálculos de carga de hundimiento, se van a aplicar los factores correctores por forma de la zapata, profundidad del plano de cimentación e inclinación de cargas (s , d e i , respectivamente), el último sólo en los escenarios de carga inclinada.

En la categoría Tipo de terreno se van a modificar los parámetros resistentes del terreno que influyen en la carga de hundimiento. Dado que suelos y rocas utilizan una formulación diferente, y que estas últimas tienen unas características que les permiten resistir mucho mejor las cargas, este estudio se va a centrar únicamente en suelos. Cada suelo tendrá un valor de cohesión, ángulo de rozamiento y peso específico aparente, que se han dispuesto en una escala creciente de cohesión, es decir, de incremento de la resistencia, aunque ligeramente decreciente en el caso del ángulo de rozamiento, como es lógico puede darse en suelos naturales, donde el incremento de uno de los parámetros resistentes pueda conllevar una ligera penalización del otro, en el tránsito de un suelo granular a uno cohesivo; de esta forma, al escalar en el tipo de suelo se varía un suelo granular sin cohesión (suelo 1) hasta un suelo muy cohesivo (suelo 4), cuyo ángulo de rozamiento es algo más bajo, aunque siempre reflejando un incremento de resistencia global desde el suelo 1 hasta el suelo 4. Por otro lado, las condiciones a corto y largo plazo utilizarán las respectivas formulaciones introducidas en el anterior capítulo, y permitirán considerar dos escenarios muy distintos: a corto plazo, el terreno absorbe la carga sin permitir que el agua presente en el terreno sea drenada por la presión; a largo plazo, el efecto del tiempo permite que las condiciones de tensiones y resistencias del terreno se equilibren, permitiendo además el drenaje del agua. Para ello, se ha añadido el parámetro de resistencia al corte sin drenaje (S_u), que será el utilizado en lugar de la cohesión en los cálculos a corto plazo.

Los parámetros asignados a cada suelo aparecen a continuación (Tabla 12):

Tipo de suelo	c (kPa)	s_u (kPa)	γ_{ap} (kN/m ³)	ϕ (°)
Suelo 1	0	25	17	31
Suelo 2	15	50	19	30
Suelo 3	30	100	20	29
Suelo 4	45	200	22	28

Tabla 12: Parámetros resistentes del terreno asignados a cada uno de los suelos de este estudio. Son valores hipotéticos, es decir, no se han tomado datos reales para hacer los cálculos.

Hay que destacar que, para el suelo 1, que sería un suelo granular puro, no es lo más habitual calcular la carga de hundimiento a corto plazo ya que su capacidad de drenaje es muy alta, de hecho, no debería asignarse un valor de resistencia al corte sin drenaje. Aun así, se han realizado los cálculos de forma sistemática, y se incluirán en el estudio comparativo ya que sí permiten diferenciar entre los resultados obtenidos por cada normativa.

4.2 Obtención de las cargas actuantes

Para obtener los cálculos de carga de hundimiento, además de los parámetros del terreno, es necesario conocer el dimensionado de la cimentación y las cargas actuantes, que se verán modificados dependiendo de si la carga que soporta la zapata es solamente vertical o si tiene una componente horizontal.

Para simplificar los cálculos, en este estudio no se va a considerar la presencia de material de relleno por encima de la zapata, ni tampoco la presencia de agua ya que su cálculo no se ve modificado al utilizar el EC7; al no considerar la presión del agua, los cálculos de tensiones del terreno son en tensiones totales:

$$\sigma = \gamma \cdot z$$

Donde:

- σ es la tensión total del terreno a una determinada profundidad (en kPa)
- γ es el peso específico del terreno (en kN/m³)
- z es la profundidad del terreno a la que se mide la tensión (en m)

A efectos de este estudio, el parámetro que requiere el cálculo de tensiones del terreno es la carga sobre el plano de cimentación (q_0), para el cual z será equivalente a D de la zapata, y el peso específico corresponderá al indicado para cada tipo de suelo en la Tabla 12. Los valores de q_0 utilizados en cada combinación se podrán consultar en los Anexos.

Sin relleno ni presión de agua, la carga vertical total (Q_v) va a ser la suma de todos los elementos que transmiten peso al suelo, incluyendo la propia carga vertical (q_v) que se va a transmitir a la cimentación, el peso del pilar de la zapata y el peso de la propia zapata. En la siguiente tabla se desglosa cada una de esas cargas (Tabla 13):

Componentes Q_v	Desglose para el cálculo de carga			
Carga vertical	q_v			
Pilar	D_P	B_P	L_P	γ_P
Zapata	D_z	B_z	L_z	γ_z

Tabla 13: Desglose de los tres elementos que componen la carga vertical. La carga del pilar y la zapata se obtiene multiplicando sus dimensiones por el peso específico de cada una.

Donde:

- q_v es la carga vertical que se va a aplicar sobre el pilar de la cimentación (en kN)
- D es la altura del pilar o la zapata (en m)
- B es el ancho del pilar o la zapata (en m)
- L es el largo del pilar o la zapata (en m)
- γ es el peso específico del hormigón (en kN/m³)

Para calcular los pesos del pilar y la zapata, se multiplican sus tres dimensiones por el peso específico del hormigón del que están fabricados.

Dado que la dimensión de la zapata va a influir en el valor de Q_v resultante, en esta comparativa se van a emplear dos tamaños de zapata, obteniendo un valor de carga vertical total para cada uno; ambas serán zapatas rectangulares sobre las que no se depositará relleno. Los valores de carga vertical, dimensiones del pilar y de la zapata utilizados, más la carga vertical total obtenida, son los siguientes (Tabla 14):

ño de zapata	Cálculo de Q_v (kN)				
Pequeña	q_v (kN)	2000			
	Pilar	4	0,4	0,4	25
	Zapata	1,25	2	4	23
	Total (kN)	2246			
Grande	q_v (kN)	11000			
	Pilar	6	1	1	25
	Zapata	1,75	4	8	23
	Total (kN)	12438			

Tabla 14: Valores utilizados para el cálculo de carga vertical total para cada tamaño de zapata. Los pesos específicos del hormigón para el pilar y la zapata se han obtenido de la asigantura de Cimentaciones del MUIG (2021). Máster Universitario de Ingeniería Geológica de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), respondiendo a la lógica de que un pilar suele presentar un mayor armado.

Una vez obtenida la carga vertical total, hay que calcular la carga actuante, que es la que se utilizará en los cálculos relacionados con la seguridad y la carga admisible. Para ello, hay que dividir la carga vertical total por el área de la zapata, según la expresión:

$$q_{act} = \frac{Q_v}{B \cdot L}$$

Donde:

- q_{act} es la carga actuante sobre la cimentación (en kPa)
- Q_v es la carga vertical total (en kN)

- B es el ancho de la zapata (en m)
- L es el largo de la zapata (en m)

Como en esta comparativa se van a comparar los resultados obtenidos tanto con carga vertical como con carga inclinada, hay que considerar el efecto que tiene una carga horizontal (q_H) sobre las dimensiones de la cimentación. Como se comentó en la formulación, la inclinación de cargas produce una excentricidad (e) que anula parte de la base de la cimentación, influyendo así en la carga actuante. En este caso, se va a considerar que solo hay una carga horizontal y que esta es paralela al ancho de la cimentación, por lo que solo se verá modificada esta dimensión y no el largo; además, se aplicará en el punto más alto del pilar de la zapata. Las expresiones de la propia excentricidad y la del cálculo del ancho efectivo son las siguientes:

$$e = \frac{M}{Q_V}$$

$$B^* = 2 \cdot \left(\frac{B}{2} - e \right)$$

Donde:

- e es la excentricidad producida por la carga horizontal (en m)
- M es el momento producido por la carga horizontal (en kN·m), que a su vez se calcula mediante la expresión:

$$M = q_H \cdot D_H$$

Donde:

- o M es el momento producido por la carga horizontal (en kN·m)
- o q_H es la carga horizontal que afecta a la cimentación (en kN)
- o D_H es la altura de la carga horizontal respecto al plano de cimentación (en m)
- Q_V es la carga vertical total (en kN)
- B^* es el ancho efectivo de la cimentación (en m)
- B es el ancho de la cimentación (en m)

Además, de cara al cálculo de la carga de hundimiento, los factores correctores por inclinación requieren el cálculo del ángulo δ , que es el ángulo entre la carga vertical y la horizontal. La tangente del ángulo se obtiene con la expresión:

$$\tan \delta = \frac{q_H}{Q_V}$$

Donde:

- $\tan \delta$ es la tangente del ángulo delta

- q_H es la carga horizontal que afecta a la cimentación (en kN)
- Q_V es la carga vertical total (en kN)

Para obtener el ángulo δ , no hay más que hacer el arcotangente de la tangente del ángulo.

Los resultados con todos los parámetros derivados de la carga inclinada son los siguientes (Tabla 15):

Tamaño de zapata	q_H (kN)	D_H (m)	M (kN·m)	e (m)	B^* (m)	$\tan \delta$	δ (°)
Pequeña	60	5,25	315,00	0,14	1,72	0,03	1,53
Grande	500	7,75	3.875,00	0,31	3,38	0,04	2,30

Tabla 15: Valores derivados de la presencia de cargas inclinadas (valor de carga horizontal, momento, excentricidad, ancho específico y ángulo delta) para cada uno de los tamaños de zapata.

A continuación, se presenta el esquema de la cimentación junto con todas las dimensiones (Figura 2), además de los parámetros relevantes incluyendo las cargas actuantes tanto para carga vertical como para carga inclinada (Tabla 16):

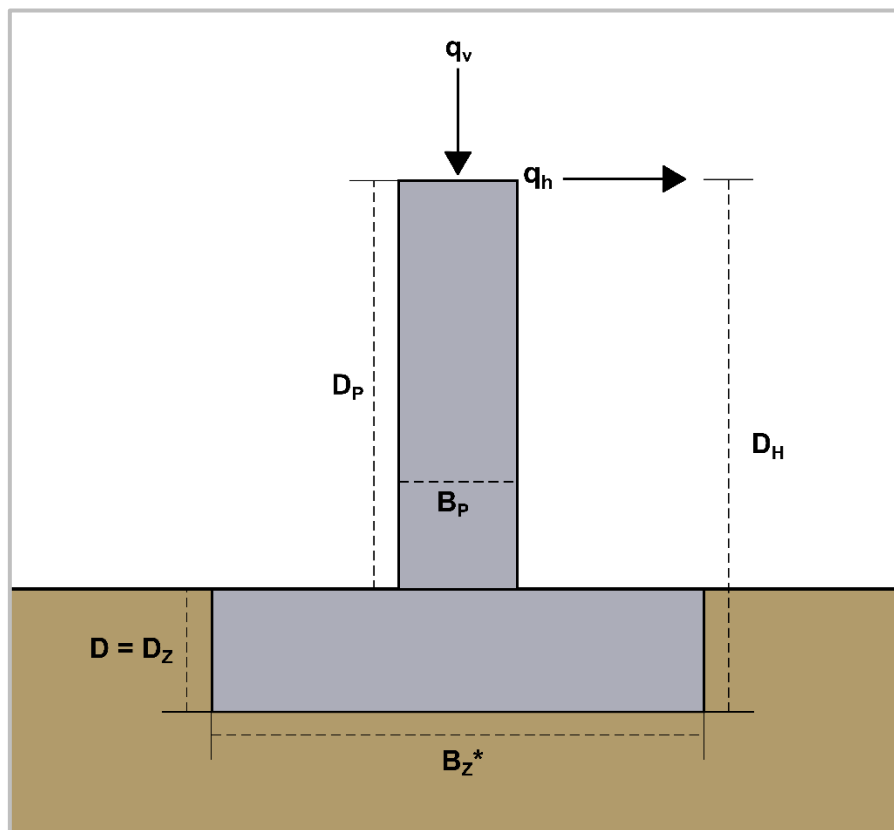


Figura 2: Esquema representativo de la configuración de la cimentación superficial utilizada en el estudio, con indicadores de las dimensiones relevantes para los cálculos realizados. El largo de la zapata y la pila no queda reflejado.

Variables		B* (m)	L* (m)	D (m)	Q _v (kN)	q _{act} (kPa)
Carga vertical	Zapata pequeña	2	4	2	2746	280,75
	Zapata grande	4	8	4	11438	388,69
Carga inclinada	Zapata pequeña	0,85	4	2	2746	326,45
	Zapata grande	2,92	8	5	11438	459,99

Tabla 16: Dimensiones, valores de carga vertical total, carga horizontal y carga actuante para las distintas combinaciones de tamaño de zapata e inclinación de carga.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se van a presentar e interpretar los resultados obtenidos al hacer la verificación del ELU, que incluyen los valores de carga de hundimiento obtenidos y el análisis de seguridad, con la obtención de cargas admisibles y análisis de la estabilidad de las combinaciones.

5.1 Cálculo de las cargas de hundimiento

Se van a presentar los resultados obtenidos en los cálculos de carga de hundimiento. Para ello, se utilizarán gráficas de barras que permitirán comparar los valores obtenidos con diferentes combinaciones. En cada gráfica aparecerán los valores para las cuatro normativas y los cuatro tipos de suelos, haciéndose gráficas separadas para modificar las condiciones a corto y largo plazo, los tamaños de zapata y la carga vertical o con inclinación; dentro de una misma gráfica, se podrá diferenciar entre los tipos de suelo por la representación visual de los órdenes de magnitud de cada uno, ya que los parámetros resistentes aumentan en cada uno de los tipos de suelo y los resultados de los cálculos obtenidos deberían aumentar en consonancia. Las unidades de carga de hundimiento en todas las gráficas serán kilopascales (kPa). Las tablas de datos con los parámetros de cálculo utilizados en cada combinación podrán consultarse en los Anexos.

Gráficas de carga de hundimiento para combinaciones CPV y CPI (Figura 3):

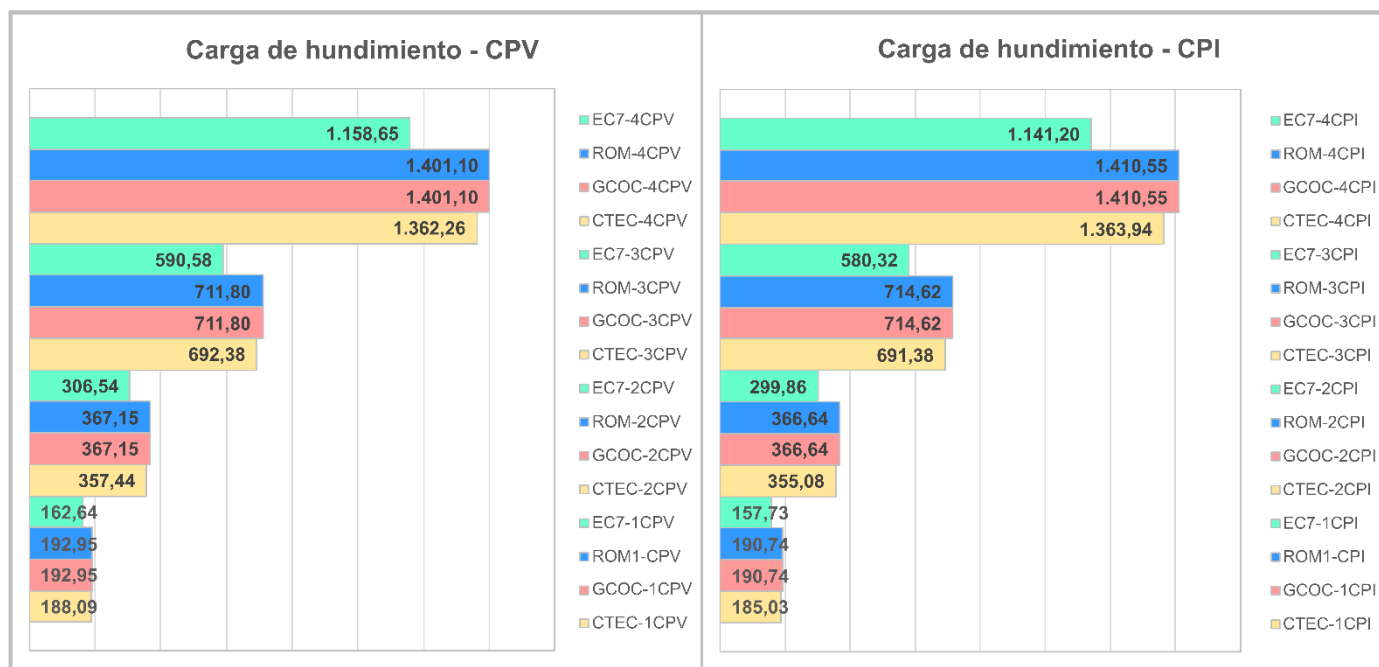


Figura 3: A la izquierda, gráfica con valores de carga de hundimiento para las combinaciones a corto plazo, zapata pequeña y carga vertical para los cuatro tipos de suelo y normativas. A la derecha, misma combinación, pero con carga inclinada. Valores en kPa.

Los resultados para la combinación CPV muestran diferencias poco significativas entre las normativas españolas (de hecho, GCOC y ROM tienen el mismo valor para los cuatro suelos)

y valores menores para el EC7 en todos los tipos de suelos; esta diferencia con las normativas españolas se acentúa con cada tipo de suelo, empezando con 30,31 kPa (GCOC-1CPV frente a EC7-1CPV) y llegando a 242,45 kPa (GCOC-4CPV frente a EC7-4CPV). Al considerar carga inclinada, la combinación CPI presenta resultados bastante similares, con el EC7 obteniendo valores siempre menores que el resto de las normativas, y aumentando la diferenciación al ascender en la escala de tipos de suelo. Cabe destacar que los valores obtenidos con carga inclinada son menores que los obtenidos con carga vertical para el EC7, mientras que GCOC y ROM han obtenido valores menores en los suelos 1 y 2, y mayores en 3 y 4; CTEC tiene los suelos 1, 2 y 3 con valores menores a la carga vertical y el suelo 4 con mayor valor.

Gráficas de carga de hundimiento para combinaciones CGV y CGI (Figura 4):

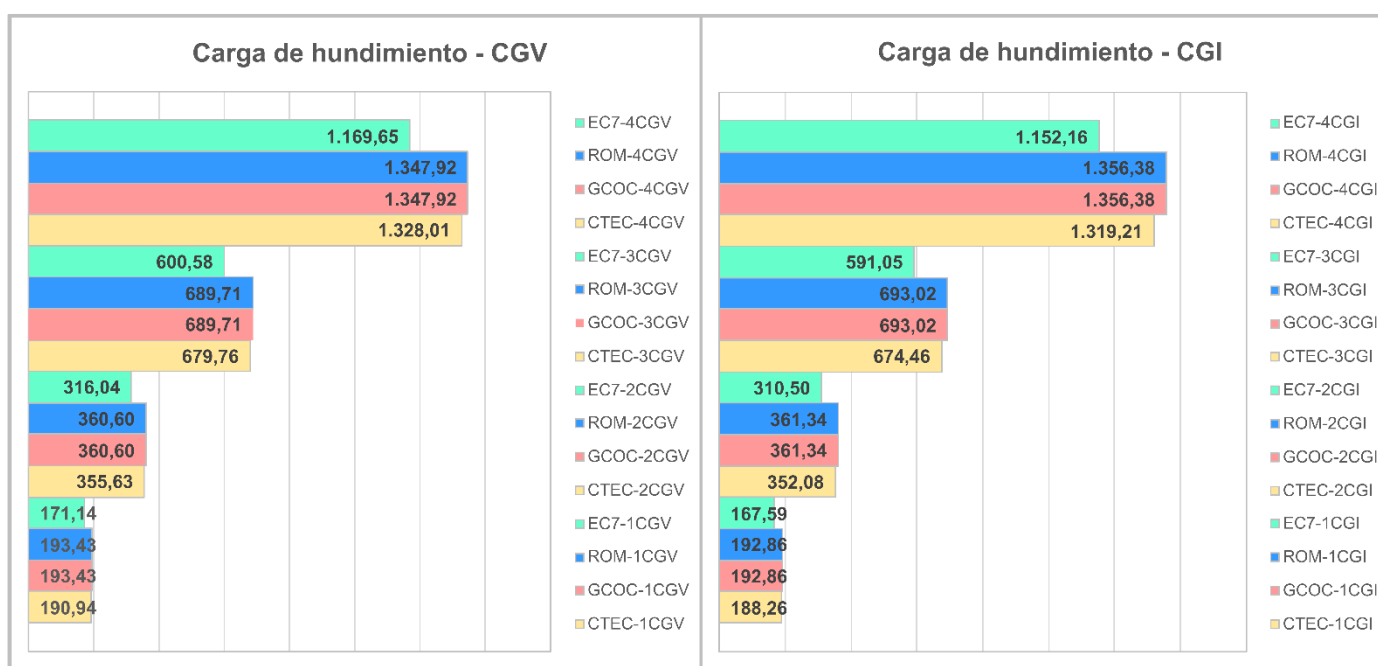


Figura 4: A la izquierda, gráfica con valores de carga de hundimiento para las combinaciones a corto plazo, zapata grande y carga vertical para los cuatro tipos de suelo y normativas. A la derecha, misma combinación, pero con carga inclinada. Valores en kPa.

En ambas gráficas, la relación entre los resultados obtenidos en las distintas normativas no cambia: el EC7 da valores de carga de hundimiento menores que el resto de las normativas, y la diferencia va aumentando a la vez que se cambia el tipo de suelo. Al comparar la orientación de las cargas, se han obtenido resultados menores con carga inclinada en el EC7 y CTEC y mayores para GCOC y ROM; aunque sigue habiendo muy poca diferencia, sin llegar a un 5% de diferencia entre carga vertical y carga inclinada.

Gráficas de carga de hundimiento para combinaciones LPV y LPI (Figura 5):

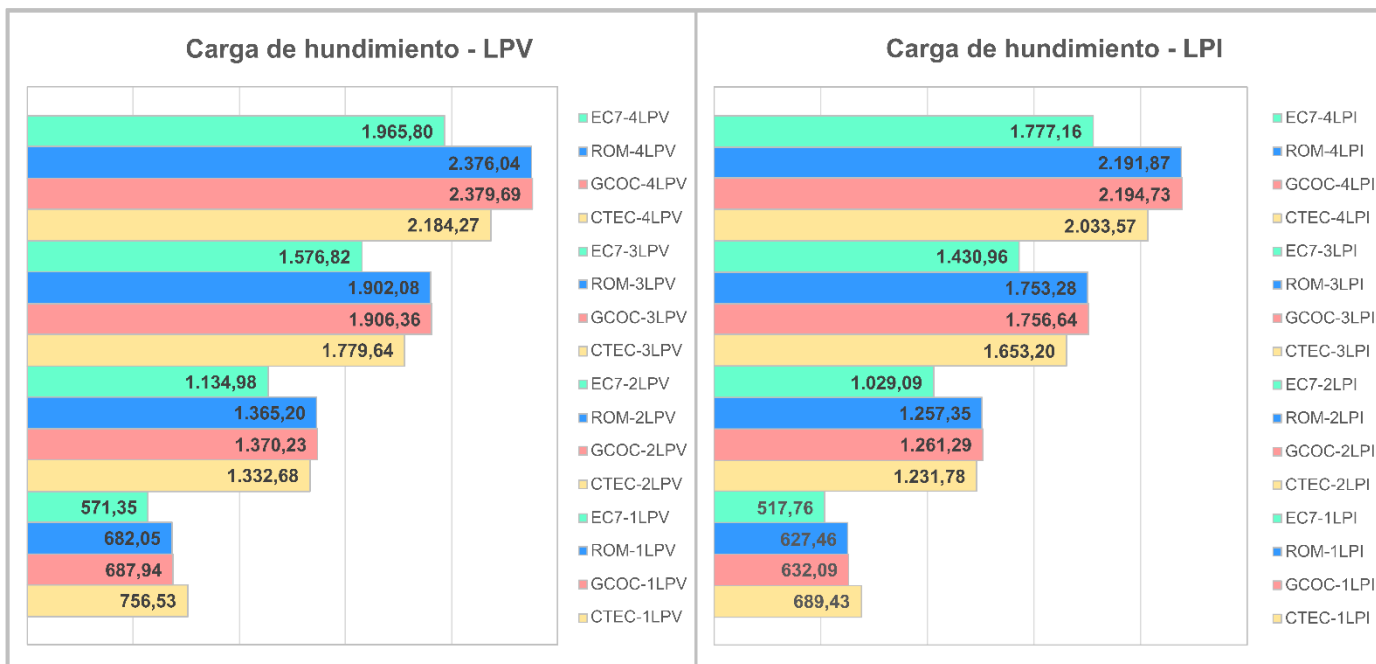


Figura 5: A la izquierda, gráfica con valores de carga de hundimiento para las combinaciones a largo plazo, zapata pequeña y carga vertical para los cuatro tipos de suelo y normativas. A la derecha, misma combinación, pero con carga inclinada. Valores en kPa.

Al considerar escenarios a largo plazo, con el suelo 1 cambia la relación de resultados que se veía en las anteriores combinaciones: aunque sigue habiendo una diferencia considerable entre el EC7 y las españolas, entre estas últimas hay una mayor diferenciación: el ROM es ligeramente menor al GCOC, y el CTEC ha obtenido el mayor valor de todos. Sin embargo, según se avanza en el tipo de suelo, esta relación cambia: en el suelo 2, el CTEC obtiene un valor ligeramente inferior a ROM que, al llegar al suelo 4, es cerca de un 10% menor. Con carga inclinada, se obtiene mayor diferencia con respecto a la carga vertical que en los escenarios a corto plazo, y se observa que, con ambos tipos de carga, los valores son considerablemente mayores que en los escenarios equivalentes a corto plazo.

Gráficas de carga de hundimiento para combinaciones LGV y LGI (Figura 6):

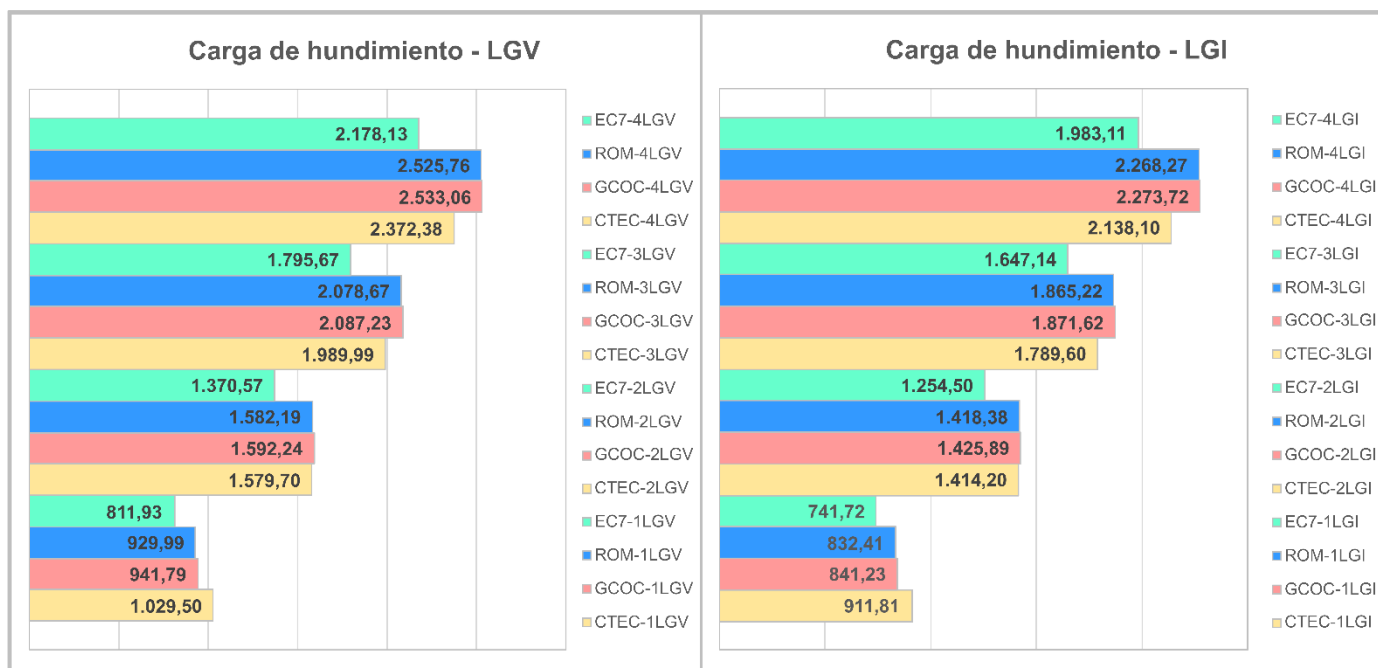


Figura 6: A la izquierda, gráfica con valores de carga de hundimiento para las combinaciones a largo plazo, zapata grande y carga vertical, para los cuatro tipos de suelo y normativas. A la derecha, misma combinación, pero con carga inclinada. Valores en kPa.

En estas gráficas, las combinaciones LGV presentan un patrón similar en el suelo 1 al de la combinación LPV: el EC7 obtiene el menor valor, ROM es ligeramente inferior a GCOC y el CTEC tiene el valor más alto. Como ocurría en las combinaciones LPV, el CTEC se vuelve menor al avanzar hasta el suelo 4, donde es en torno a un 7,5% menor a GCOC y ROM, y el EC7 sigue siendo la más baja, con una diferencia aproximada de un 15% con respecto a la más alta. Cuando se considera la carga inclinada, los valores obtenidos siempre son menores que con la vertical, siendo esta reducción bastante homogénea entre todas las normativas.

Tras haber analizado las gráficas con los resultados, se observa que, salvo en las combinaciones a corto plazo con las normativas ROM y GCOC, las cargas obtenidas por las distintas normativas son distintas entre sí pudiendo presentar mayor o menor variación, aunque siempre en los mismos órdenes de magnitud. Esto se debe a que la formulación de la carga de hundimiento introducida anteriormente incluye los coeficientes de capacidad de carga (N_c , N_q y N_γ), además de las correcciones por forma, profundidad del plano de cimentación e inclinación de la carga (s , d , i , respectivamente); cada normativa varía en mayor o menor medida la forma de calcular cada uno de estos factores, alterando los resultados. Aun así, en todas se cumple que los resultados van de menor a mayor según se avanza del 1 al 4 en la escala de tipos de suelo (aumentando la cohesión de estos), y sus condiciones cambian de corto a largo plazo. Esto es el comportamiento normal y esperable de los cálculos de carga de hundimiento, lo que indica que todas las normativas han funcionado correctamente.

El aspecto más importante que se puede observar sobre los resultados es que el EC7 ha obtenido el menor valor de carga de hundimiento en todas las combinaciones posibles, independientemente del tipo de suelo, condición, dimensionado u orientación de la carga. En comparación, las normativas españolas obtienen diferencias mucho menores entre sí, por lo que se puede deducir que el EC7 utiliza unos factores de corrección menores que los de las normativas españolas.

Esto significa que, al considerar únicamente la carga de hundimiento, el EC7 es más conservador que cualquiera de las normativas españolas, es decir, el cálculo obtenido por el EC7 prevé que la cimentación fallará por hundimiento más fácilmente que si se hace el cálculo con las normativas españolas.

Una vez se ha observado que el EC7 siempre es más conservador en términos de carga de hundimiento, otro aspecto interesante de utilizar varias combinaciones de factores es identificar cuál de esas combinaciones de factores (o factores aislados, si se diera el caso) produce mayor variación en los resultados de las normativas, además de cómo influye cada una de las combinaciones en la relación entre el EC7 y las demás normativas. Para ello, se va a representar en gráficos de barras la relación entre las cargas de hundimiento obtenidas al dividir los resultados de cada normativa española entre el del EC7 para cada combinación; de esta forma, los resultados indican cuántas veces es mayor la carga obtenida en la normativa española correspondiente respecto al EC7. Las tablas con los resultados para cada combinación se podrán consultar en el Anexo.

En esta gráfica, se observan las relaciones para las combinaciones con carga vertical (Figura 7):

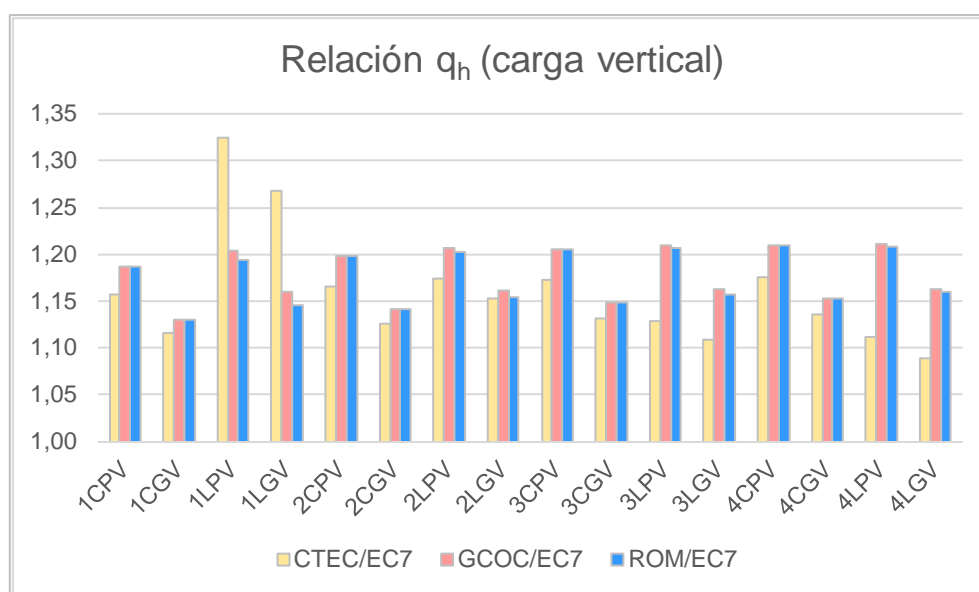


Figura 7: Gráfica con las relaciones entre los valores de carga de hundimiento de cada normativa española con el EC7 para cada combinación con carga vertical.

Los valores máximos y mínimos obtenidos son:

- Relación CTEC/EC7: las combinaciones con mayor valor son 1LPV, 1LGV, con valores de 1,32 y 1,27, respectivamente. Las más bajas son 4LGV con una relación de 1,09, y 3LGV y 4LPV con una relación de 1,11.
- Relación GCOC/EC7: las combinaciones con mayor valor son 2LPV, 1CPV, 3LPV, 4CPV y 4LPV con valores de 1,21, seguidos de las combinaciones 1LPV y 2CPV con valor de 1,20. El valor más bajo es 1,13 para la combinación 1CGV y el siguiente es 1,14 para la combinación 2CGV.
- Relación ROM/EC7: los mayores valores alcanzados son 1,21 (combinaciones 3CPV, 3LPV, 4CPV y 4LPV) y 1,20 (combinaciones 2CPV, 2LPV). Los más bajos son 1,13 para 1CGV y 1,14 para la combinación 2CGV.

Sabiendo que el EC7 proporciona los valores de carga de hundimiento más conservadores, tiene sentido pensar que al escalar en los tipos de suelo (es decir, al aumentar la cohesión o resistencia al corte sin drenaje del terreno), la diferencia entre EC7 y las normativas siempre debería aumentar, y esto ocurre así en todas las combinaciones, pero hay dos excepciones: para la relación CTEC/EC7, las combinaciones a largo plazo comienzan con los valores más altos de todos, pero disminuyen rápidamente al aumentar la cohesión, llegando a alcanzar los valores más bajos de todos (1,32 a 1,11 para 1LPV a 4LPV, y 1,27 a 1,09 para 1LGV a 1LGV). En contraste, las combinaciones a largo plazo para GCOC/EC7 y ROM/EC7 se mantienen estables al escalar los tipos de suelo, variando de 1,20 a 1,21 y de 1,19 a 1,21, respectivamente. A corto plazo las tres normativas españolas tienen una relación muy similar con el EC7, con valores que aumentan ligeramente cuanto más cohesivo el suelo, siendo mayores las relaciones de GCOC (1,19 a 1,21 para 1CPV a 4CPV) y ROM (1,19 a 1,21 para 1CPV a 4CPV) que las de CTEC (1,16 a 1,18 para 1CPV a 4CPV). Además, todas las combinaciones a corto plazo aumentan en 0,2 su relación al escalar del suelo a 1 al 4.

En esta gráfica, se observan las relaciones para las combinaciones con carga inclinada (Figura 8):

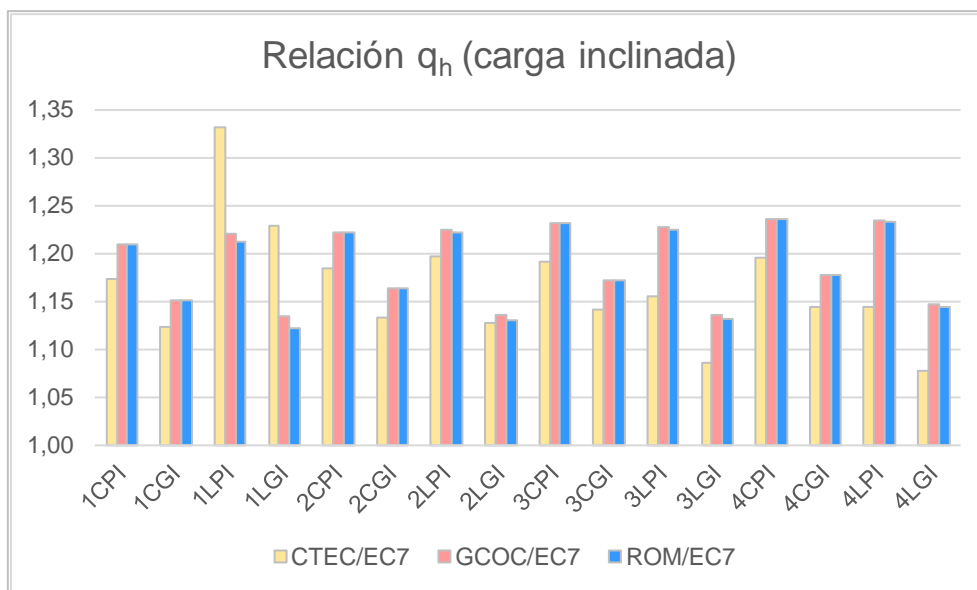


Figura 8: Gráfica con las relaciones entre los valores de carga de hundimiento de cada normativa española con el EC7 para cada combinación con carga inclinada.

Los valores máximos y mínimos obtenidos son:

- Relación CTEC/EC7: las combinaciones con mayor valor son 1LPI, 1LGI, con valores de 1,33 y 1,23, respectivamente. Las más bajas son 1CGI y 2CGI, con valores de 1,12 y 1,13, respectivamente.
- Relación GCOC/EC7: la combinación con mayor valor es 4CPI, que obtiene 1,24, y las siguientes son 2LPI, 3CPI, 3LPI y 4LPI con una relación de 1,23. El valor más bajo es 1,13 para la combinación 1LGI y el siguiente es 1,14 para las combinaciones 2LGI y 3LGI.
- Relación ROM/EC7: el mayor valor es 1,24, obtenido por la combinación 4CPI, seguido por 1,23, obtenido con las combinaciones 3CPI, 3LPI y 4LPI. Los menores lo obtienen 1LGI con 1,12 y 2LGI y 3LGI con un valor de 1,13.

Las relaciones observadas en la gráfica de cargas inclinadas siguen la misma tendencia que en la vertical: las combinaciones a corto plazo aumentan su valor al escalar del suelo 1 al 4, mientras que a largo plazo ocurre lo mismo con GCOC y ROM, su valor aumenta al aumentar la cohesión, y lo contrario con CTEC, que desciende abruptamente conforme aumenta la cohesión del suelo. Se observa que los valores de las relaciones entre cada normativa con el EC7 son ligeramente mayores con carga inclinada, a excepción de las combinaciones LGV, que son ligeramente mayores cuando la carga es vertical.

Por tanto, la relación entre el valor de carga de hundimiento obtenido por las normativas españolas entre el obtenido por el EC7 aumenta cuando se incluyen escenarios de carga inclinada, a pesar de que, cuando se compararon los valores de carga de hundimiento, las combinaciones con carga inclinada siempre daban resultados menores que sus

correspondientes con carga vertical, salvo en las combinaciones de GCOC y ROM a corto plazo y las combinaciones CPV del código técnico. Por la cantidad de factores que intervienen en la fórmula de la carga de hundimiento, es lógico pensar que las mayores variaciones se darán en escenarios a largo plazo, y por esa misma razón aumentan de forma general la diferenciación entre el EC7 y el resto de las normativas al añadir la corrección por inclinación de la carga en las combinaciones con carga inclinada.

En relación con este último punto, las relaciones más altas alcanzadas las consiguen las combinaciones de CTEC a largo plazo en suelo 1, superando a todas las relaciones conseguidas por GCOC y ROM, aunque durante la evolución de esa combinación del CTEC al avanzar en los tipos de suelo se acorta considerablemente la diferencia entre los valores del CTEC y el EC7, de forma que ROM y GCOC tienen una mayor relación que el CTEC a largo plazo para el suelo 4. Se puede observar que, salvo la excepción del CTEC mencionada, tanto las combinaciones a largo plazo como a corto plazo aumentan su relación al aumentar la cohesión de los suelos, de forma que la carga de hundimiento de las normativas españolas se vuelve cada vez mayor al aumentar la cohesión de los suelos; en concreto, son las combinaciones CPI y LPI las que tienen el mayor valor inicial y final en todos los casos (salvo LPI en CTEC).

5.2 Análisis de la seguridad

5.2.1 Cálculo de cargas admisibles

A continuación, se van a presentar los resultados obtenidos en los cálculos de carga admisible, y se utilizará el mismo tipo de gráficas de barras que fue introducido anteriormente, ya que permiten comparar los resultados entre suelos y normativas de manera muy visual; las unidades seguirán siendo kPa.

En la formulación, se introdujo la fórmula del coeficiente de seguridad para las normativas, así como los coeficientes de seguridad parciales para los parámetros V_d y R_d en el EC-7. Despejando las fórmulas, y utilizando los coeficientes de seguridad para estados límite, se puede calcular la carga admisible, que será igual a la carga actuante máxima que podrá soportar la cimentación. La expresión de las normativas españolas sería:

$$q_{act} = q_{adm} = \frac{q_{h(neta)}}{F_S} + q_o$$

Donde:

- q_{act} es la carga actuante máxima que podrá resistir la cimentación y que será equivalente a la carga admisible (en kPa)
- q_{adm} es la carga admisible en estado límite (en kPa)

- $q_{h(neta)}$ es la carga de hundimiento neta (en kPa), a la que se le habrá restado la carga en el plano de la cimentación
- F_s es el coeficiente de seguridad para el estado límite entre la estabilidad y la inestabilidad
- q_o es la carga en el plano de la cimentación (en kPa)

Por otro lado, la expresión para el EC-7 quedaría de la siguiente forma:

$$q_{act} = \frac{q_{h(neta)}}{\gamma_{G/Q} \cdot \gamma_R}$$

Donde:

- q_{act} es la carga actuante máxima que podrá resistir la cimentación y que será equivalente a la carga admisible (en kPa)
- $q_{h(neta)}$ es la carga de hundimiento neta (en kPa), a la que se le habrá restado la carga en el plano de la cimentación
- γ_G es el coeficiente parcial para acciones persistentes
- γ_Q es el coeficiente parcial para acciones extraordinarias
- γ_R es el coeficiente parcial para la capacidad portante del terreno

De esta forma, se han obtenido los valores de carga admisible tanto para acciones persistentes como extraordinarias, considerando escenarios tanto de carga vertical como inclinada, utilizando las expresiones mencionadas. Debido a las limitaciones que suponen la extensión del trabajo, solo se presentarán algunas de las gráficas, ya que sus resultados serán representativos. Las gráficas para las combinaciones que no se expliquen a continuación estarán incluidas en los Anexos.

Gráficas de carga admisible (acciones persistentes) para combinaciones CPV y CPI (Figura 9):

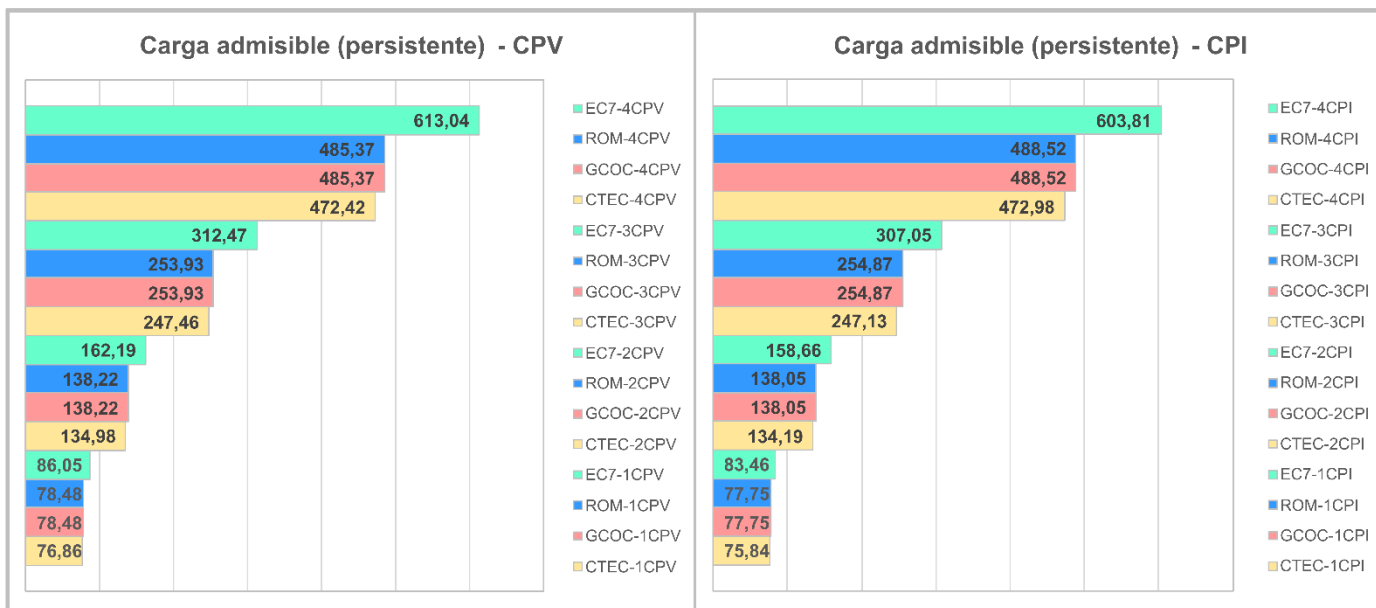


Figura 9: A la izquierda, gráfica con valores de carga admisible (dimensionado persistente) para las combinaciones a corto plazo, zapata pequeña y carga vertical para los cuatro tipos de suelo y normativas. A la derecha, misma combinación, pero con carga inclinada. Valores en kPa.

Los resultados para la combinación CPV muestran diferencias poco significativas entre las normativas españolas, sin embargo, en este caso, es el EC7 el que muestra el valor más alto. Al avanzar en la clasificación de tipo de suelo, el EC7 aumenta su valor, superando cada vez por un margen mayor a las normativas españolas; en el suelo 4, el EC7 es un 23% mayor que el CTEC, que es el valor más bajo. En la combinación CPI ocurre lo mismo, para el suelo 1 los valores son similares y el EC7 tiene el más alto, y al avanzar en los tipos de suelo la carga admisible es cada vez más diferenciada. Los valores obtenidos con carga inclinada son más bajos en el EC7 con respecto a la carga vertical, mientras que el resto de las normativas obtienen cargas admisibles más altas a partir del suelo 2 (GCOC y ROM) y suelo 4 (CTEC). Gráficas de carga admisible (acciones persistentes) para combinaciones LPV y LPI (Figura 10):

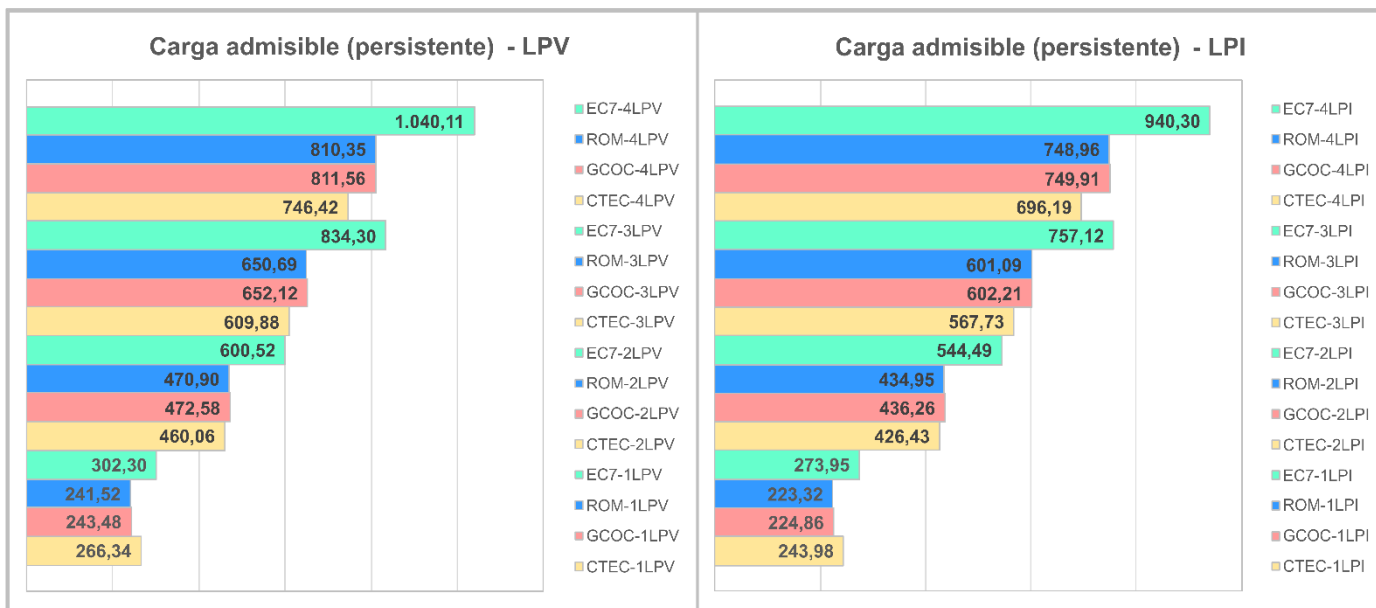


Figura 10: A la izquierda, gráfica con valores de carga admisible (dimensionado persistente) para las combinaciones a largo plazo, zapata pequeña y carga vertical para los cuatro tipos de suelo y normativas. A la derecha, misma combinación, pero con carga inclinada. Valores en kPa.

En la combinación con carga vertical, el EC7 obtiene el valor de carga admisible más elevado desde el primer suelo, y mantiene el mayor valor en los cuatro tipos de suelo. En cuanto a las normativas españolas, CTEC es superior a GCOC y ROM en el suelo 1, pero desde los suelos 2 al 4 su valor es el más bajo de todas, con un valor aproximadamente un 25% menor que el del EC7. Si se considera la carga inclinada, todas las normativas han obtenido valores de carga admisible menores que las correspondientes combinaciones con carga vertical; también el EC7 es mayor en todos los tipos de suelo, pero se ve reducido en mayor medida que las normativas españolas, hasta un 10% menos de carga admisible.

Gráficas de carga admisible (acciones extraordinarias) para combinaciones CGV y CGI (Figura 11):

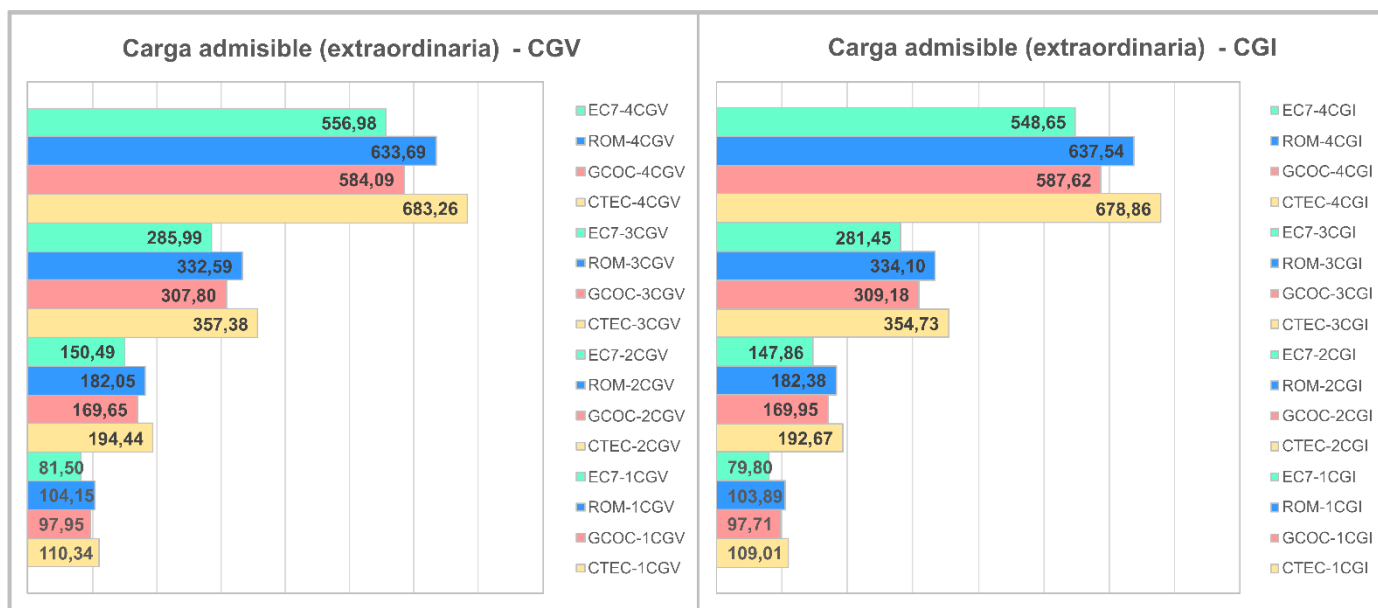


Figura 11: A la izquierda, gráfica con valores de carga admisible (dimensionado extraordinario) para las combinaciones a corto plazo, zapata grande y carga vertical para los cuatro tipos de suelo y normativas. A la derecha, misma combinación, pero con carga inclinada. Valores en kPa.

En la gráfica de combinaciones CGV se observa que el valor de carga admisible del EC7 es menor y está diferenciado de los de las normativas españolas desde el primer suelo hasta el cuarto, además de que las normativas españolas tienen mayor diferenciación en sus resultados al avanzar la escala de suelos; en el suelo 4, hay una diferencia entre el EC7 y el CTEC, el valor más alto, del 19%. Con carga inclinada, se da la misma evolución en los valores que con carga vertical, siendo el EC7 considerablemente inferior a las demás. Los valores obtenidos con carga inclinada han sido inferiores para CTEC y EC7 en todos los tipos de suelos, y superiores para GCOC y ROM en todos los tipos de suelos, pero las diferencias son muy poco significativas en cualquier caso.

Gráficas de carga admisible (acciones extraordinarias) para combinaciones LGV y LGI (Figura 12):

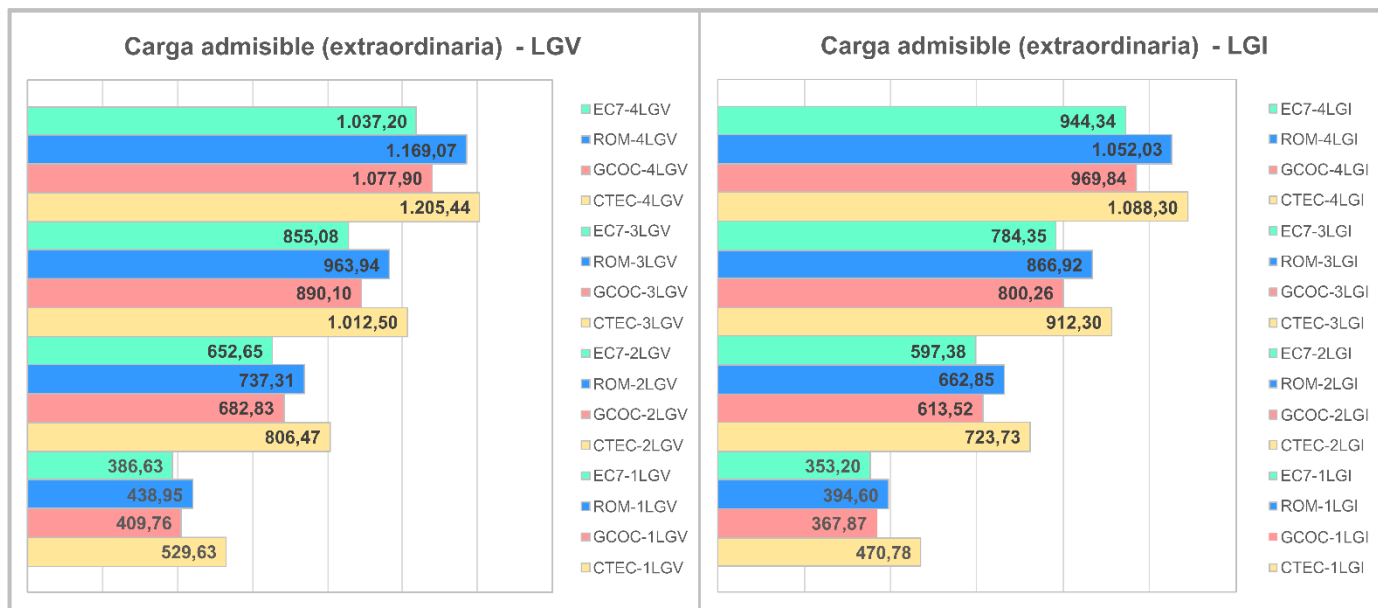


Figura 12: A la izquierda, gráfica con valores de carga admisible (dimensionado extraordinario) para las combinaciones a largo plazo, zapata grande y carga vertical para los cuatro tipos de suelo y normativas. A la derecha, misma combinación, pero con carga inclinada. Valores en kPa.

Con la combinación LGV, la carga admisible en condiciones extraordinarias sigue el mismo patrón que en la gráfica de combinaciones CGV, siendo el EC7 la normativa con menor valor y el CTEC la mayor, con un margen amplio sobre el resto de las normativas, margen que se mantiene al avanzar en los tipos de suelo. Hay un 14% de diferencia entre la normativa con valores más bajos y altos, que son el EC7 y el CTEC, respectivamente. Al introducir inclinación en las cargas, el único cambio apreciable son los menores resultados en los valores de carga admisible, que se da en todas las normativas.

El aspecto más destacable de las gráficas analizadas es que, para la carga admisible en condiciones persistentes, el EC7 ha obtenido los valores más altos de todas las normativas mientras que, en condiciones extraordinarias, ha obtenido los más bajos. Cuando se compararon los resultados obtenidos para la carga de hundimiento, se observó que el EC7 siempre era la normativa más conservadora para todas las combinaciones analizadas, por lo que lo esperable es que también lo fuera para carga admisible, sin embargo, no es así; esta circunstancia se produce de la misma forma en las gráficas que no se han comentado (es decir, combinaciones CGV – CGI y LGV – LGI para dimensionado persistente, y combinaciones CPI – CPV y LPI – LPV para dimensionado extraordinario). Para justificar el comportamiento y el mayor o menor valor del EC7 en función del dimensionado, hay que observar los coeficientes de seguridad y parciales aplicados en los cálculos de carga admisible (Tabla 17):

Normativa	Coeficiente de seguridad		Coeficientes parciales	
	Persistente	Extraordinaria	Persistente	Extraordinaria
CTEC	3	2		
GCOC	3	2,4		
ROM	3	2,2		
EC7			1,89	2,1

Tabla 17: Valores de coeficientes de seguridad (normativas españolas) y producto de coeficientes parciales (EC7) utilizados para cada situación de dimensionado.

Las normativas españolas utilizan coeficientes de seguridad con valores muy homogéneos entre sí, siendo el mismo para situaciones de dimensionado persistente y distintos para las situaciones de dimensionado extraordinarias. Por ello, el CTEC obtiene los mayores valores de carga admisible en situaciones extraordinarias, ya que divide su valor de carga de hundimiento (que nunca ha estado muy diferenciado del valor de GCOC y ROM) por un factor de seguridad de 2 frente a 2,2 y 2,4 que utilizan ROM y GCOC, respectivamente; por ejemplo, en la combinación LGI, los valores que han obtenido CTEC, GCOC y ROM son 1.088,30, 969,84 y 1.052,03, respectivamente. En cambio, el EC7 obtiene el valor de carga admisible dividiendo el valor de carga de hundimiento por el producto de los coeficientes parciales, que en el dimensionado persistente es de 1,89 y en el extraordinario de 2,1. Aunque inicialmente el EC7 tiene la carga de hundimiento más baja de todos, en el dimensionado persistente es dividido por un producto de coeficientes parciales muy bajo en comparación al coeficiente de seguridad de las normativas españolas: $1,89 < 3$, de forma que esos valores inicialmente más bajos y conservadores de carga de hundimiento son poco penalizados en comparación a las normativas españolas, resultando en que el EC7 es la normativa menos conservadora en cuanto a carga admisible o carga actuante máxima se refiere. En dimensionado extraordinario, en cambio, su producto de coeficientes parciales da 2,1 y es bastante similar al coeficiente usado por las normativas españolas, situándose entre el 2 y 2,2 de CTEC y ROM, respectivamente; por ello, dada su menor carga de hundimiento, es totalmente lógico que su carga admisible en condiciones extraordinarias siga siendo el más bajo y conservador.

Sobre este efecto de la mayor carga admisible al calcular con el EC7, en trabajos como el de Estaire y Perucho (2008) se ha detectado la misma problemática, y se propone modificar dichos coeficientes para que la carga actuante máxima resultante del EC7 tenga valores similares a los de las normativas españolas.

5.2.2 Análisis de estabilidad

Se va a estudiar qué combinaciones serían seguras al soportar las cargas actuantes a las que se ve sujeto cada escenario. Para ello, se va a comprobar si se cumplen las condiciones de seguridad mínimas establecidas por cada normativa con el coeficiente o factor de seguridad

y los coeficientes parciales: en las normativas españolas se compara la carga admisible calculada anteriormente con los valores de carga actuante desarrollados durante el capítulo 4, y serán seguras o estables todas las combinaciones cuyo valor de carga admisible sea superior al de carga actuante. En el EC7, en cambio, se han calculado los parámetros V_d y R_d aplicando en cada caso los coeficientes parciales correspondientes, como se introdujo en el tercer capítulo; se considerarán estables aquellas combinaciones cuyo valor de R_d supere al valor de V_d . Se hará el análisis para todas las combinaciones, incluyendo dimensionado persistente y extraordinario, así como cargas verticales e inclinadas. Las combinaciones que no cumplan las condiciones de estabilidad se indicarán en rojo.

En la siguiente tabla aparece el análisis de estabilidad de las combinaciones con dimensionado persistente y carga vertical (Tabla 18):

Estabilidad con dimensionado persistente y carga vertical						
Combinación	CTEC - q_{adm} (kPa)	GCOC - q_{adm} (kPa)	ROM - q_{adm} (kPa)	q_{act} (kPa)	EC7	
					V_d (kPa)	R_d (kPa)
1CPV	76,86	78,48	78,48	280,75	379,01	101,00
1CGV	83,48	84,31	84,31	388,69	524,73	101,00
1LPV	266,34	243,48	241,52	280,75	379,01	392,93
1LGV	363,00	333,76	329,83	388,69	524,73	558,70
2CPV	134,98	138,22	138,22	280,75	379,01	201,99
2CGV	140,71	142,37	142,37	388,69	524,73	201,99
2LPV	460,06	472,58	470,90	280,75	379,01	793,73
2LGV	548,73	552,91	549,56	388,69	524,73	955,23
3CPV	247,46	253,93	253,93	280,75	379,01	403,98
3CGV	249,92	253,24	253,24	388,69	524,73	403,98
3LPV	609,88	652,12	650,69	280,75	379,01	1.108,44
3LGV	686,66	719,08	716,22	388,69	524,73	1.257,62
4CPV	472,42	485,37	485,37	280,75	379,01	807,96
4CGV	468,34	474,97	474,97	388,69	524,73	807,96
4LPV	746,42	811,56	810,35	280,75	379,01	1.384,50
4LGV	816,46	870,02	867,59	388,69	524,73	1.528,31

Tabla 18: Análisis de estabilidad con las comparaciones de cargas admisibles y actuantes (normativas españolas) y valores de carga y capacidad portante de proyecto (EC7) con dimensionado persistente y carga vertical.

En la tabla aparece, por un lado, el sector de las normativas españolas, con las cargas admisibles de cada normativa y la carga actuante de cada combinación; por otro lado, el sector del EC7, con sus valores de V_d y R_d . Como se puede observar, las normativas españolas han resultado inestables las mismas combinaciones, mientras que el EC7 cumple las condiciones de estabilidad en tres combinaciones más: 1LPV, 1LGV, 3CPV.

En la siguiente tabla aparece el análisis de estabilidad de las combinaciones con dimensionado persistente y carga inclinada (Tabla 19):

Estabilidad con dimensionado extraordinario y carga vertical						
Combinación	CTEC - q_{adm} (kPa)	GCOC - q_{adm} (kPa)	ROM - q_{adm} (kPa)	q_{act} (kPa)	EC7	
					V_d (kPa)	R_d (kPa)
1CPV	104,67	92,79	99,30	280,75	421,13	101,00
1CGV	110,34	97,95	104,15	388,69	583,04	101,00
1LPV	388,89	299,04	321,61	280,75	421,13	392,93
1LGV	529,63	409,76	438,95	388,69	583,04	558,70
2CPV	190,59	166,83	179,84	280,75	421,13	201,99
2CGV	194,44	169,65	182,05	388,69	583,04	201,99
2LPV	678,22	584,78	633,50	280,75	421,13	793,73
2LGV	806,47	682,83	737,31	388,69	583,04	955,23
3CPV	358,69	311,17	337,18	280,75	421,13	403,98
3CGV	357,38	307,80	332,59	388,69	583,04	403,98
3LPV	902,32	808,90	878,22	280,75	421,13	1.108,44
3LGV	1.012,50	890,10	963,94	388,69	583,04	1.257,62
4CPV	694,88	599,83	651,86	280,75	421,13	807,96
4CGV	683,26	584,09	633,69	388,69	583,04	807,96
4LPV	1.105,88	1.007,58	1.095,02	280,75	421,13	1.384,50
4LGV	1.205,44	1.077,90	1.169,07	388,69	583,04	1.528,31

Tabla 19: Análisis de estabilidad con las comparaciones de cargas admisibles y actuantes (normativas españolas) y valores de carga y capacidad portante de proyecto (EC7) con dimensionado persistente y carga inclinada.

Al considerar dimensionado extraordinario, las normativas españolas también tienen la misma cantidad de combinaciones inestables, aunque han obtenido menos casos de inestabilidad que con el dimensionado persistente. El EC7, por otro lado, es la normativa con más casos de inestabilidad para este tipo de escenario.

En la siguiente tabla aparece el análisis de estabilidad de las combinaciones con dimensionado extraordinario y carga vertical (Tabla 20):

Estabilidad con dimensionado persistente y carga inclinada						
Combinación	CTEC - q_{adm} (kPa)	GCOC - q_{adm} (kPa)	ROM - q_{adm} (kPa)	q_{act} (kPa)	EC7	
					V_d (kPa)	R_d (kPa)
1CPI	75,84	77,75	77,75	326,45	440,71	97,49
1CGI	82,59	84,12	84,12	459,99	620,99	98,46
1LPI	243,98	224,86	223,32	326,45	440,71	354,65
1LGI	323,77	300,24	297,30	459,99	620,99	508,55
2CPI	134,19	138,05	138,05	326,45	440,71	197,22
2CGI	139,53	142,61	142,61	459,99	620,99	198,03
2LPI	426,43	436,26	434,95	326,45	440,71	718,10
2LGI	493,57	497,46	494,96	459,99	620,99	872,32
3CPI	247,13	254,87	254,87	326,45	440,71	396,65
3CGI	248,15	254,34	254,34	459,99	620,99	397,18
3LPI	567,73	602,21	601,09	326,45	440,71	1.004,26
3LGI	619,87	647,21	645,07	459,99	620,99	1.151,53
4CPI	472,98	488,52	488,52	326,45	440,71	795,50
4CGI	465,40	477,79	477,79	459,99	620,99	795,47
4LPI	696,19	749,91	748,96	326,45	440,71	1.249,76
4LGI	738,37	783,57	781,76	459,99	620,99	1.389,00

Tabla 20: Análisis de estabilidad con las comparaciones de cargas admisibles y actuantes (normativas españolas) y valores de carga y capacidad portante de proyecto (EC7) con dimensionado extraordinario y carga vertical.

Al considerar escenarios con dimensionado persistente y carga inclinada, se observa que, por primera vez, todas las normativas, incluido el EC7, han obtenido el mismo número de casos de combinaciones que sufren inestabilidad.

En la siguiente tabla aparece el análisis de estabilidad de las combinaciones con dimensionado extraordinario y carga inclinada (Tabla 21):

Estabilidad con dimensionado extraordinario y carga inclinada						
Combinación	CTEC - q_{adm} (kPa)	GCOC - q_{adm} (kPa)	ROM - q_{adm} (kPa)	q_{act} (kPa)	EC7	
					V_d (kPa)	R_d (kPa)
1CPI	103,14	91,87	98,29	326,45	489,68	97,49
1CGI	109,01	97,71	103,89	459,99	689,99	98,46
1LPI	355,34	275,77	296,80	326,45	489,68	354,65
1LGI	470,78	367,87	394,60	459,99	689,99	508,55
2CPI	189,42	166,62	179,61	326,45	489,68	197,22
2CGI	192,67	169,95	182,38	459,99	689,99	198,03
2LPI	627,76	539,39	584,48	326,45	489,68	718,10
2LGI	723,73	613,52	662,85	459,99	689,99	872,32
3CPI	358,19	312,34	338,46	326,45	489,68	396,65
3CGI	354,73	309,18	334,10	459,99	689,99	397,18
3LPI	839,10	746,52	810,58	326,45	489,68	1.004,26
3LGI	912,30	800,26	866,92	459,99	689,99	1.151,53
4CPI	695,72	603,77	656,16	326,45	489,68	795,50
4CGI	678,86	587,62	637,54	459,99	689,99	795,47
4LPI	1.030,54	930,51	1.011,30	326,45	489,68	1.249,76
4LGI	1.088,30	969,84	1.052,03	459,99	689,99	1.389,00

Tabla 21: Análisis de estabilidad con las comparaciones de cargas admisibles y actuantes (normativas españolas) y valores de carga y capacidad portante de proyecto (EC7) con dimensionado extraordinario y carga inclinada.

En la última gráfica se observa que los escenarios con carga inclinada y dimensionado extraordinario tienen la mayor diferenciación de todos, ya que todas las normativas tienen distintos casos de inestabilidad; la que mayor número de casos ha obtenido es el EC7.

Tras haber comprobado las tablas con las combinaciones de estados de inestabilidad, se observa que la cantidad de escenarios inestables varía considerablemente al hacer las comparaciones de distintas cargas y escenarios. En general, se puede afirmar que los escenarios con carga inclinada dan lugar a mayores casos de inestabilidad que aquellos con carga vertical, esto se debe a que la influencia de cargas inclinadas produce una excentricidad que reduce el ancho efectivo de la cimentación; de esta forma, la carga que tiene que soportar el terreno es superior, es por ello por lo que el EC7 aumenta en 3 su número de casos de inestabilidad al inclinar la carga con dimensionado persistente. Por otro lado, la situación de dimensionado también modifica los resultados ya que el coeficiente de seguridad o los coeficientes parciales son diferentes a situaciones persistentes. Se da una mayor variación en los resultados con dimensionado extraordinario, ya que con dimensionado persistente todas las normativas tenían los mismos casos de combinaciones inestables (salvo el EC7 con carga vertical, que tenía menos casos que las normativas españolas), mientras que con dimensionado extraordinario, en los escenarios con carga vertical hay diferenciación entre el

EC7 y las normativas españolas, y con carga inclinada hay todavía una mayor diferenciación. En la siguiente tabla aparece el número de situaciones inestables por tipo de carga y dimensionado (Tabla 22):

Normativa	Persistente + Vertical	Persistente + Inclinada	Extraordinario + Vertical	Extraordinario+ Inclinada	Sumatorio
CTEC	8	8	6	5	27
GCOC	8	8	6	8	30
ROM	8	8	6	7	29
EC7	5	8	8	8	29

Tabla 22: Conteo de combinaciones inestables para cada normativa y análisis.

La normativa que más casos inestables suma entre los distintos análisis realizados es GCOC, seguida por ROM y EC7, siendo CTEC la normativa con menos casos de inestabilidad. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de carga admisible, tiene sentido que el EC7 se desmarque de las normativas españolas y obtenga mayor estabilidad en dimensionado persistente ya que sus valores eran considerablemente mayores, aunque la inclinación de cargas penaliza tanto a las cargas actuantes que acaba teniendo el mismo número de casos inestables, independientemente de su mayor valor de resistencia del terreno (R_d). Al considerar dimensionado extraordinario, se observó que los coeficientes parciales del EC7 dividían la carga de hundimiento por un valor muy similar al de las normativas españolas, obteniendo valores menores de carga admisible; por ello, tiene sentido que, en este tipo de dimensionado, el EC7 haya obtenido el mayor número de casos inestables. A pesar de las diferencias que aplica esta normativa en sus cálculos, los resultados del EC7 en cuanto a la estabilidad son bastante homogéneos con los de las normativas españolas; de hecho, en el recuento de casos inestables queda más diferenciado el CTEC que el EC7.

6. CONCLUSIONES

Las conclusiones extraídas después del análisis realizado en este estudio son las siguientes:

- Se han comparado los valores de carga de hundimiento y admisible mediante formulación analítica obtenidos por las normativas españolas y el eurocódigo 7, obteniendo resultados diferentes:
 - En términos de carga de hundimiento, el EC7 es la normativa más conservadora de todas, obteniendo valores considerablemente menores y diferenciados de las normativas españolas, cuyos resultados son más similares entre sí.
 - Los análisis de la relación de cargas de hundimiento entre las normativas españolas y el EC7 indican que hay mayor diferencia en los resultados de las normativas cuando se calcula con inclinación de cargas. En general, todas las combinaciones evolucionan de la misma forma: las combinaciones a corto y largo plazo aumentan su valor al aumentar la cohesión del suelo, con la excepción de las combinaciones a largo plazo del CTEC, que obtienen resultados muy altos con el suelo 1 y su relación decrece abruptamente al avanzar en los tipos de suelo.
 - En contraste, al comparar las cargas admisibles calculadas para escenarios límite y con dimensionado persistente, el EC7 es la normativa menos conservadora de todas, obteniendo siempre valores superiores al resto de las normativas. Esto se debe a que, a pesar de que la carga de hundimiento siempre ha resultado mayor en el resto de las normativas, la aplicación de coeficientes de seguridad de las normativas españolas penaliza mucho en comparación, dividiendo los valores de carga de hundimiento entre 3, frente a la división por 1,89 del EC7 que se obtiene con el producto de sus coeficientes parciales.
 - Si se hace el mismo ejercicio con las cargas admisibles en situación de dimensionado extraordinaria, la carga admisible obtenida por el EC7 es menor que las obtenidas por el resto de las normativas, como ocurría con la carga de hundimiento. Los coeficientes de seguridad de las normativas españolas tienen un rango de valores entre 2 y 2,4, que es bastante similar al producto de coeficientes parciales del EC7, 2,1; por ello, esa carga de hundimiento inicialmente menor es penalizada en la misma medida que las de las normativas españolas, resultando que el EC7 es la normativa más conservadora en este tipo de dimensionado.

- También se ha analizado la estabilidad de todas las combinaciones para cada normativa comparando la carga admisible obtenida con dimensionado persistente y extraordinario, con la carga actuante asociada a cada escenario. Con dimensionado persistente hay menor diferenciación que con dimensionado extraordinario, pero a pesar de las diferencias iniciales de carga de hundimiento y admisible del EC7 en comparación con las normativas españolas, su número de casos inestables es coherente y similar al de estas. La normativa más conservadora ha sido la GCOC, seguida por ROM y EC7, y la menos conservadora es el CTEC.
- La utilización del EC7 no ha supuesto un cambio drástico con respecto a la normativa española, al menos en lo que se refiere a la verificación de Estado Límite Último por hundimiento, ya que la metodología del cálculo tiene la misma base que las normativas españolas, y su funcionamiento acaba siendo muy parecido. De cara a su futura implementación, las modificaciones necesarias para calcular con esta normativa, en lugar de utilizar las normativas españolas, son sencillas y el periodo de adaptación no supondrá muchas dificultades cuando el eurocódigo se establezca en Europa.
- Los análisis como el que se ha llevado a cabo en este trabajo son de gran utilidad ya que permiten calibrar y comprobar el funcionamiento y las implicaciones del uso de las distintas normativas. De cara a la futura implementación del EC7, hay muchos otros escenarios y comprobaciones posibles que podrían ser interesantes, como hacer el estudio sobre distintos tipos de rocas, analizando distintos tipos de fallos de ELU como vuelco o deslizamiento, verificando el ELS... Además, dado que el EC7 abarca todo tipo de actuaciones geotécnicas, este estudio comparativo no está limitado a las cimentaciones superficiales, y sería interesante hacer el mismo ejercicio para otro tipo de actuaciones geotécnicas, como pueden ser las cimentaciones profundas o los análisis de estabilidad de taludes.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (2010). Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico – Parte 1: Reglas generales (EN 1997-1:2004 y EN 1997-1:2004/AC:2009).
- Crespo, P., Parilla, Á., Estaire, J., Ortega, M. y Pérez, A. (2014). Bases de cálculo para el proyecto de cimentaciones acorde con el Eurocódigo 7. En Resúmenes de Comunicaciones, Investigación y desarrollo, p. 10. VI Congreso de Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Madrid, España.
- Estaire, J. y Perucho, Á. (2008). Comparación del dimensionamiento de cimentaciones superficiales aplicando el Eurocódigo 7 y las normativas españolas. En Ingeniería Civil, eds., nº 152, pp. 73-85. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX); Ministerio de Fomento; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Estaire, J., Pardo de Santayana, F. y Perucho, Á. (2012). Anejo Nacional Español del Eurocódigo 7. Laboratorio de Geotecnia – CEDEX, p. 21.
- Estaire, J., Pardo de Santayana, F. y Perucho, Á. (2016). Bases del anejo nacional español del Eurocódigo EC-7 (proyecto geotécnico). En Ingeniería Civil, eds., nº 181, pp. 5-25. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- Estaire, J. y Bond, A. (2020). Proyecto de estructuras geotécnicas de acuerdo al futuro Eurocódigo 7. En *Geotecnia*, nº 149, pp. 45-65. *Sociedade Portuguesa de Geotecnia*.
- Gutiérrez, M.Á. (1994). Eurocódigos Estructurales. Revista de Edificación, nº 18, pp. 39-44.
- Ministerio de Fomento; Puertos del Estado (2005). Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM 0.5-05). Serie 0: Descripción y caracterización de los factores de proyecto.
- Ministerio de Fomento; Dirección General de Carreteras (2009). Guía de cimentaciones en obras de carretera. Serie monografías.
- Ministerio de Fomento; Dirección General de Arquitectura, Transporte y Vivienda (2019a). Documento Básico Seguridad estructural – Cimientos (SE-C).
- Ministerio de Fomento; Dirección General de Carreteras (2019b). Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7: Cimentaciones superficiales. Serie Guías Eurocódigos.

- Orr, L. (2012). *How Eurocode 7 has affected geotechnical design: a review. Publishing of Geotechnical Engineering, Vol. 165, Issue GE6*, pp. 337-350. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers (ICE)*.
- Ortega, M., Fernández, M. y Millanes F. (2014). Reflexiones relativas a la formulación analítica de la carga de hundimiento para cimentaciones superficiales del Eurocódigo 7. En *Resúmenes de Comunicaciones, Investigación y desarrollo*, p. 10. VI Congreso de Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Madrid, España.
- Pérez, A., Corres, H., Pirani, F., Mimi, F. y Mensik, A. (2008). España y los Eurocódigos: La necesidad de converger. En IV Congreso de Asociación científico-técnica del Hormigón Estructural (ACHE), Valencia, España. FHECOR, Ingenieros Consultores.
- Rodríguez, F., Muelas, Á. y Escanilla, A. (1993). Cimentaciones y técnicas del suelo – Edificación. Dirección General de Servicios Técnicos; Departamento de Formación. Seminario monográfico.
- Serra María-Tomé, J. (1996). Los Eurocódigos Estructurales. En *Informes De La Construcción*, Vol. 48, nº 446, pp. 65–71. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

8. ANEXOS

8.1 Parámetros utilizados en el cálculo de carga de hundimiento

Combinación		Parámetros																
		c (kPa)	s _v (kPa)	γ _{ap} (kN/m ³)	q _s (kPa)	φ (°)	N _c	s _c	d _c	N _q	s _q	d _q	N _γ	s _γ	d _γ	B*	L*	D
CTEC	1CPV		25	17	21,25	0	5,14	1,10	1,18	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	1CGV		25	17	29,75	0	5,14	1,10	1,14	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	1LPV	0		17	21,25	31	32,67	1,10	1,18	20,63	1,45	1,17	17,69	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	1LGV	0		17	29,75	31	32,67	1,10	1,14	20,63	1,45	1,12	17,69	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75
	2CPV		50	19	23,75	0	5,14	1,10	1,18	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	2CGV		50	19	33,25	0	5,14	1,10	1,14	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	2LPV	15		19	23,75	30	30,14	1,10	1,18	18,40	1,43	1,17	15,07	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	2LGV	15		19	33,25	30	30,14	1,10	1,14	18,40	1,43	1,13	15,07	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75
	3CPV		100	20	25	0	5,14	1,10	1,18	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	3CGV		100	20	35	0	5,14	1,10	1,14	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	3LPV	30		20	25	29	27,86	1,10	1,18	16,44	1,42	1,18	12,84	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	3LGV	30		20	35	29	27,86	1,10	1,14	16,44	1,42	1,13	12,84	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75
	4CPV		200	22	27,5	0	5,14	1,10	1,18	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	4CGV		200	22	38,5	0	5,14	1,10	1,14	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	4LPV	45		22	27,5	28	25,80	1,10	1,18	14,72	1,40	1,18	10,94	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	4LGV	45		22	38,5	28	25,80	1,10	1,14	14,72	1,40	1,13	10,94	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75

Combinación		Parámetros																
		c (kPa)	s _v (kPa)	γ _{ap} (kN/m ³)	q _s	φ (°)	N _c	s _c	d _c	N _q	s _q	d _q	N _γ	s _γ	d _γ	B*	L*	D
GCOG	1CPV		25	17	21,25	0	5,14	1,10	1,22	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	1CGV		25	17	29,75	0	5,14	1,10	1,16	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	1LPV	0		17	21,25	31	32,67	1,32	1,17	20,63	1,32	1,16	23,59	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	1LGV	0		17	29,75	31	32,67	1,32	1,12	20,63	1,32	1,12	23,59	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75
	2CPV		50	19	23,75	0	5,14	1,10	1,22	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	2CGV		50	19	33,25	0	5,14	1,10	1,16	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	2LPV	15		19	23,75	30	30,14	1,31	1,17	18,40	1,31	1,16	20,09	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	2LGV	15		19	33,25	30	30,14	1,31	1,13	18,40	1,31	1,12	20,09	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75
	3CPV		100	20	25	0	5,14	1,10	1,22	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	3CGV		100	20	35	0	5,14	1,10	1,16	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	3LPV	30		20	25	29	27,86	1,30	1,18	16,44	1,30	1,16	17,12	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	3LGV	30		20	35	29	27,86	1,30	1,13	16,44	1,30	1,12	17,12	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75
	4CPV		200	22	27,5	0	5,14	1,10	1,22	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	4CGV		200	22	38,5	0	5,14	1,10	1,16	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	4LPV	45		22	27,5	28	25,80	1,29	1,18	14,72	1,29	1,17	14,59	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	4LGV	45		22	38,5	28	25,80	1,29	1,13	14,72	1,29	1,12	14,59	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75

Combinación		Parámetros																
		c (kPa)	s _v (kPa)	γ _{ap} (kN/m ³)	q _s	φ (°)	N _c	s _c	d _c	N _q	s _q	d _q	N _γ	s _γ	d _γ	B	L	D
ROM	1CPV		25	17	21,25	0	5,14	1,10	1,22	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	1CGV		25	17	29,75	0	5,14	1,10	1,16	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	1LPV	0		17	21,25	31	32,67	1,32	1,17	20,63	1,32	1,16	17,69	0,80	1,00	2,00	4,00	1,25
	1LGV	0		17	29,75	31	32,67	1,32	1,12	20,63	1,32	1,12	17,69	0,80	1,00	4,00	8,00	1,75
	2CPV		50	19	23,75	0	5,14	1,10	1,22	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	2CGV		50	19	33,25	0	5,14	1,10	1,16	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	2LPV	15		19	23,75	30	30,14	1,31	1,17	18,40	1,31	1,16	15,07	0,80	1,00	2,00	4,00	1,25
	2LGV	15		19	33,25	30	30,14	1,31	1,13	18,40	1,31	1,12	15,07	0,80	1,00	4,00	8,00	1,75
	3CPV		100	20	25	0	5,14	1,10	1,22	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	3CGV		100	20	35	0	5,14	1,10	1,16	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	3LPV	30		20	25	29	27,86	1,30	1,18	16,44	1,30	1,16	12,84	0,80	1,00	2,00	4,00	1,25
	3LGV	30		20	35	29	27,86	1,30	1,13	16,44	1,30	1,12	12,84	0,80	1,00	4,00	8,00	1,75
	4CPV		200	22	27,5	0	5,14	1,10	1,22	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	4CGV		200	22	38,5	0	5,14	1,10	1,16	1,00	1,10	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	4LPV	45		22	27,5	28	25,80	1,29	1,18	14,72	1,29	1,17	10,94	0,80	1,00	2,00	4,00	1,25
	4LGV	45		22	38,5	28	25,80	1,29	1,13	14,72	1,29	1,12	10,94	0,80	1,00	4,00	8,00	1,75

Combinación		Parámetros																
		c (kPa)	s _v (kPa)	γ _{ap} (kN/m ³)	q _s	φ (°)	N _c	s _c	d _c	N _q	s _q	d _q	N _γ	s _γ	d _γ	B	L	D
EC7	1CPV		25	17	21,25	0	5,14	1,10	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25	
	1CGV		25	17	29,75	0	5,14	1,10	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75	
	1LPV	0		17	21,25	31	32,67	1,27	1,00	20,63	1,26	1,00	23,59	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	1LGV	0		17	29,75	31	32,67	1,27	1,00	20,63	1,26	1,00	23,59	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75
	2CPV		50	19	23,75	0	5,14	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	2CGV		50	19	33,25	0	5,14	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	2LPV	15		19	23,75	30	30,14	1,26	1,00	18,40	1,25	1,00	20,09	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	2LGV	15		19	33,25	30	30,14	1,26	1,00	18,40	1,25	1,00	20,09	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75
	3CPV		100	20	25	0	5,14	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	3CGV		100	20	35	0	5,14	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	3LPV	30		20	25	29	27,86	1,26	1,00	16,44	1,24	1,00	17,12	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	3LGV	30		20	35	29	27,86	1,26	1,00	16,44	1,24	1,00	17,12	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75
	4CPV		200	22	27,5	0	5,14	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	1,25
	4CGV		200	22	38,5	0	5,14	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	4,00	8,00	1,75
	4LPV	45		22	27,5	28	25,80	1,25	1,00	14,72	1,23	1,00	14,59	0,85	1,00	2,00	4,00	1,25
	4LGV	45		22	38,5	28	25,80	1,25	1,00	14,72	1,23	1,00	14,59	0,85	1,00	4,00	8,00	1,75

Combinación	Parámetros																			
	c (kPa)	s _u (kPa)	γ _{sat} (kN/m ³)	q _u (kPa)	φ (°)	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	B*	L*	D
CTEC	1CPI	25	17	21,25	0	5,14	1,09	1,20	0,98	1,00	1,00	1,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	1CGI	25	17	29,75	0	5,14	1,08	1,15	0,99	1,00	1,00	1,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	1LPI	0	17	21,25	31	32,67	1,09	1,20	0,94	20,63	1,39	1,19	0,94	17,69	0,87	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	1LGI	0	17	29,75	31	32,67	1,08	1,15	0,91	20,63	1,38	1,14	0,92	17,69	0,87	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75
	2CPI	50	19	23,75	0	5,14	1,09	1,20	0,99	1,00	1,00	1,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	2CGI	50	19	33,25	0	5,14	1,08	1,15	0,99	1,00	1,00	1,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	2LPI	15	19	23,75	30	30,14	1,09	1,20	0,93	18,40	1,37	1,19	0,94	15,07	0,87	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	2LGI	15	19	33,25	30	30,14	1,08	1,15	0,91	18,40	1,37	1,15	0,92	15,07	0,87	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75
	3CPI	100	20	25	0	5,14	1,09	1,20	0,99	1,00	1,00	1,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	3CGI	100	20	35	0	5,14	1,08	1,15	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	3LPI	30	20	25	29	27,86	1,09	1,20	0,93	16,44	1,36	1,20	0,94	12,84	0,87	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	3LGI	30	20	35	29	27,86	1,08	1,15	0,91	16,44	1,35	1,15	0,92	12,84	0,87	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75
	4CPI	200	22	27,5	0	5,14	1,09	1,20	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	4CGI	200	22	38,5	0	5,14	1,08	1,15	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	4LPI	45	22	27,5	28	25,80	1,09	1,20	0,93	14,72	1,34	1,20	0,94	10,94	0,87	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	4LGI	45	22	38,5	28	25,80	1,08	1,15	0,91	14,72	1,34	1,15	0,92	10,94	0,87	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75

Combinación	Parámetros																			
	c (kPa)	s _u (kPa)	γ _{sat} (kN/m ³)	q _u	φ (°)	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	B*	L*	D
GCOC	1CPI	25	17	21,25	0	5,14	1,08	1,24	0,98	1,00	1,08	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	1CGI	25	17	29,75	0	5,14	1,08	1,19	0,99	1,00	1,08	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	1LPI	0	17	21,25	31	32,67	1,27	1,19	0,94	20,63	1,27	1,18	0,94	23,59	0,87	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	1LGI	0	17	29,75	31	32,67	1,27	1,14	0,91	20,63	1,27	1,14	0,92	23,59	0,87	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75
	2CPI	50	19	23,75	0	5,14	1,08	1,24	0,99	1,00	1,08	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	2CGI	50	19	33,25	0	5,14	1,08	1,19	0,99	1,00	1,08	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	2LPI	15	19	23,75	30	30,14	1,26	1,19	0,93	18,40	1,26	1,18	0,94	20,09	0,87	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	2LGI	15	19	33,25	30	30,14	1,26	1,15	0,91	18,40	1,26	1,14	0,92	20,09	0,87	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75
	3CPI	100	20	25	0	5,14	1,08	1,24	0,99	1,00	1,08	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	3CGI	100	20	35	0	5,14	1,08	1,19	1,00	1,00	1,08	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	3LPI	30	20	25	29	27,86	1,25	1,20	0,93	16,44	1,25	1,18	0,94	17,12	0,87	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	3LGI	30	20	35	29	27,86	1,25	1,15	0,91	16,44	1,25	1,14	0,92	17,12	0,87	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75
	4CPI	200	22	27,5	0	5,14	1,08	1,24	1,00	1,00	1,08	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	4CGI	200	22	38,5	0	5,14	1,08	1,19	1,00	1,00	1,08	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	4LPI	45	22	27,5	28	25,80	1,25	1,20	0,93	14,72	1,25	1,19	0,94	14,59	0,87	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	4LGI	45	22	38,5	28	25,80	1,24	1,15	0,91	14,72	1,24	1,14	0,92	14,59	0,87	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75

Combinación	Parámetros																			
	c (kPa)	s _u (kPa)	γ _{sat} (kN/m ³)	q _u	φ (°)	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	B*	L*	D
ROM	1CPI	25	17	21,25	0	5,14	1,08	1,24	0,98	1,00	1,08	1,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	1CGI	25	17	29,75	0	5,14	1,08	1,19	0,99	1,00	1,08	1,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	1LPI	0	17	21,25	31	32,67	1,27	1,19	0,94	20,63	1,27	1,18	0,94	17,69	0,83	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	1LGI	0	17	29,75	31	32,67	1,27	1,14	0,91	20,63	1,27	1,14	0,92	17,69	0,83	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75
	2CPI	50	19	23,75	0	5,14	1,08	1,24	0,99	1,00	1,08	1,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	2CGI	50	19	33,25	0	5,14	1,08	1,19	0,99	1,00	1,08	1,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	2LPI	15	19	23,75	30	30,14	1,26	1,19	0,93	18,40	1,26	1,18	0,94	15,07	0,83	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	2LGI	15	19	33,25	30	30,14	1,26	1,15	0,91	18,40	1,26	1,14	0,92	15,07	0,83	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75
	3CPI	100	20	25	0	5,14	1,08	1,24	0,99	1,00	1,08	1,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	3CGI	100	20	35	0	5,14	1,08	1,19	1,00	1,00	1,08	1,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	3LPI	30	20	25	29	27,86	1,25	1,20	0,93	16,44	1,25	1,18	0,94	12,84	0,83	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	3LGI	30	20	35	29	27,86	1,25	1,15	0,91	16,44	1,25	1,14	0,92	12,84	0,83	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75
	4CPI	200	22	27,5	0	5,14	1,08	1,24	1,00	1,00	1,08	1,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	4CGI	200	22	38,5	0	5,14	1,08	1,19	1,00	1,00	1,08	1,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	4LPI	45	22	27,5	28	25,80	1,25	1,20	0,93	14,72	1,25	1,19	0,94	10,94	0,83	1,00	0,91	1,72	4,00	1,25
	4LGI	45	22	38,5	28	25,80	1,24	1,15	0,91	14,72	1,24	1,14	0,92	10,94	0,83	1,00	0,88	3,38	8,00	1,75

Combinación	Parámetros																			
	c (kPa)	s _u (kPa)	γ _{sat} (kN/m ³)	q _u	φ (°)	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	N ₆₀	s _v	d _v	i _v	B*	L*	D
EC7	1CPI	25	17	21,25	0	5,14	1,09	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	1CGI	25	17	29,75	0	5,14	1,08	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	1LPI	0	17	21,25	31	32,67	1,23	1,00	0,93	20,63	1,22	1,00	0,94	23,59	0,87	1,00	0,90	1,72	4,00	1,25
	1LGI	0	17	29,75	31	32,67	1,23	1,00	0,95	20,63	1,22	1,00	0,95	23,59	0,87	1,00	0,92	3,38	8,00	1,75
	2CPI	50	19	23,75	0	5,14	1,09	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	2CGI	50	19	33,25	0	5,14	1,08	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	2LPI	15	19	23,75	30	30,14	1,23	1,00	0,93	18,40	1,22	1,00	0,94	20,09	0,87	1,00	0,90	1,72	4,00	1,25
	2LGI	15	19	33,25	30	30,14	1,22	1,00	0,95	18,40	1,21	1,00	0,95	20,09	0,87	1,00	0,92	3,38	8,00	1,75
	3CPI	100	20	25	0	5,14	1,09	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	3CGI	100	20	35	0	5,14	1,08	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	8,00	1,75
	3LPI	30	20	25	29	27,86	1,22	1,00	0,93	16,44	1,21	1,00	0,94	17,12	0,87	1,00	0,90	1,72	4,00	1,25
	3LGI	30	20	35	29	27,86	1,22	1,00	0,95	16,44	1,20	1,00	0,95	17,12	0,87	1,00	0,92	3,38	8,00	1,75
	4CPI	200	22	27,5	0	5,14	1,09	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72	4,00	1,25
	4CGI	200	22	38,5	0	5,14	1,08													

8.2 Relación entre valores de carga de hundimiento para las distintas normativas

Combinación	Resultados q _h (kPa)				Relación q _h (%)		
	CTEC	GCOC	ROM	EC7	CTEC/EC7	GCOC/EC7	ROM/EC7
1CPV	188,09	192,95	192,95	162,64	1,16	1,19	1,19
1CGV	190,94	193,43	193,43	171,14	1,12	1,13	1,13
1LPV	756,53	687,94	682,05	571,35	1,32	1,20	1,19
1LGV	1.029,50	941,79	929,99	811,93	1,27	1,16	1,15
2CPV	357,44	367,15	367,15	306,54	1,17	1,20	1,20
2CGV	355,63	360,60	360,60	316,04	1,13	1,14	1,14
2LPV	1.332,68	1.370,23	1.365,20	1.134,98	1,17	1,21	1,20
2LGV	1.579,70	1.592,24	1.582,19	1.370,57	1,15	1,16	1,15
3CPV	692,38	711,80	711,80	590,58	1,17	1,21	1,21
3CGV	679,76	689,71	689,71	600,58	1,13	1,15	1,15
3LPV	1.779,64	1.906,36	1.902,08	1.576,82	1,13	1,21	1,21
3LGV	1.989,99	2.087,23	2.078,67	1.795,67	1,11	1,16	1,16
4CPV	1.362,26	1.401,10	1.401,10	1.158,65	1,18	1,21	1,21
4CGV	1.328,01	1.347,92	1.347,92	1.169,65	1,14	1,15	1,15
4LPV	2.184,27	2.379,69	2.376,04	1.965,80	1,11	1,21	1,21
4LGV	2.372,38	2.533,06	2.525,76	2.178,13	1,09	1,16	1,16

Combinación	Resultados q _h (kPa)				Relación q _h (%)		
	CTEC	GCOC	ROM	EC7	CTEC/EC7	GCOC/EC7	ROM/EC7
1CPI	185,03	190,74	190,74	157,73	1,17	1,21	1,21
1CGI	188,26	192,86	192,86	167,59	1,12	1,15	1,15
1LPI	689,43	632,09	627,46	517,76	1,33	1,22	1,21
1LGI	911,81	841,23	832,41	741,72	1,23	1,13	1,12
2CPI	355,08	366,64	366,64	299,86	1,18	1,22	1,22
2CGI	352,08	361,34	361,34	310,50	1,13	1,16	1,16
2LPI	1.231,78	1.261,29	1.257,35	1.029,09	1,20	1,23	1,22
2LGI	1.414,20	1.425,89	1.418,38	1.254,50	1,13	1,14	1,13
3CPI	691,38	714,62	714,62	580,32	1,19	1,23	1,23
3CGI	674,46	693,02	693,02	591,05	1,14	1,17	1,17
3LPI	1.653,20	1.756,64	1.753,28	1.430,96	1,16	1,23	1,23
3LGI	1.789,60	1.871,62	1.865,22	1.647,14	1,09	1,14	1,13
4CPI	1.363,94	1.410,55	1.410,55	1.141,20	1,20	1,24	1,24
4CGI	1.319,21	1.356,38	1.356,38	1.152,16	1,14	1,18	1,18
4LPI	2.033,57	2.194,73	2.191,87	1.777,16	1,14	1,23	1,23
4LGI	2.138,10	2.273,72	2.268,27	1.983,11	1,08	1,15	1,14

8.3 Gráficas de carga admisible en dimensionado persistente y extraordinario

