

Dimensionamento de Fundações Superficiais Recorrendo ao Eurocódigo 7

Francisco F. Martins

Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

RESUMO: Neste trabalho são apresentados a filosofia e os conceitos do Eurocódigo 7 (EC7) aplicados no dimensionamento de fundações superficiais. São definidos os cinco tipos de estados limites últimos apresentados no EC7 sendo dada relevância ao estado limite último do tipo GEO. São apresentados dois exemplos com o dimensionamento de fundações quer usando as abordagens de cálculo do EC7 quer efectuando a análise tradicional portuguesa recorrendo ao uso do coeficiente global de segurança. Também são efectuados cálculos usando regulamentação espanhola. É feita a comparação entre todas estas abordagens.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações Superficiais, Dimensionamento, Eurocódigo 7.

1 INTRODUÇÃO

O Eurocódigo 7 é constituído por duas partes. A primeira parte (EN 1997-1 2004) está relacionada com as regras gerais do dimensionamento geotécnico e descreve os princípios gerais e os requisitos que garantem a segurança, a utilização e a durabilidade das estruturas suportadas. A segunda parte diz respeito à prospecção geotécnica e aos ensaios no campo e laboratoriais. O Eurocódigo 7 deve ser usado em combinação com o Eurocódigo 0 respeitante às bases do dimensionamento estrutural, com o Eurocódigo 1 relacionado com acções em estruturas e com outros eurocódigos do dimensionamento dos materiais. O Eurocódigo 8, que é dedicado ao dimensionamento estrutural e geotécnico em regiões sísmicas, contempla na sua parte 5 as fundações, as estruturas de suporte e outros aspectos geotécnicos.

No sistema de eurocódigos é introduzido o conceito de segurança semi-probabilística em que as incertezas são tratadas na origem através da introdução do valor característico e do valor de cálculo das variáveis envolvidas no dimensionamento. Os valores característicos e de cálculo têm uma base estatística. Já, nos métodos clássicos determinísticos as fontes de incerteza são tratadas através de um simples coeficiente de segurança global.

De acordo com o sistema de eurocódigos o

projecto cumpre os requisitos dos estados limites últimos se o valor de cálculo das acções ou do efeito das acções E_d for inferior ou igual ao valor de cálculo da resistência, R_d :

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

O Eurocódigo 7 permite a avaliação de R_d e E_d através de três abordagens de cálculo diferentes que surgiram devido à grande variedade das condições do solo, dos ensaios usados e dos métodos de dimensionamento usados nos diferentes países. No entanto, a escolha da abordagem de cálculo e dos coeficientes parciais é da competência dos países envolvidos devendo ser indicada nos Documentos Nacionais de Aplicação.

O EC7 (EN 1997-1 2004) distingue entre cinco tipos diferentes de estados limites últimos que, quando relevantes, devem ser verificados:

“Perda de equilíbrio da estrutura ou do terreno, considerado como um corpo rígido, na qual a resistência dos materiais estruturais e do terreno não têm significado no fornecimento da resistência (EQU)”

“Rotura interna ou deformação excessiva da estrutura ou dos elementos estruturais, incluindo sapatas, estacas, paredes de caves, etc, para as quais a resistência dos materiais estruturais é significativa no fornecimento da resistência (STR)”

“Rotura ou deformação excessiva do terreno,

para as quais a resistência do solo ou rocha é significativa em fornecer resistência (GEO)”

“Perda de equilíbrio da estrutura ou do terreno devido ao levantamento por pressão da água (flutuação) ou outras acções verticais (UPL)”

“Empolamento hidráulico, erosão interna e piping no terreno causado por gradientes hidráulicos (HYD)”

A segurança em relação aos estados limites últimos aplica-se principalmente a situações persistentes e transitórias, e os coeficientes parciais do Anexo A do Eurocódigo 7 só são válidos para esta situação. Em situações acidentais todos os valores dos coeficientes parciais devem ser tomados iguais a 1,0.

No capítulo 3 será tratado o estado limite último do tipo GEO que está associado à perda de capacidade resistente.

A verificação aos estados limites de utilização requer que a sua ocorrência seja suficientemente improvável. Os estados limites de utilização podem ser verificados de duas maneiras. Na primeira, impõe-se que os valores de cálculo dos efeitos das acções E_d , tais como, por exemplo, deformações e assentamentos, sejam menores ou iguais aos valores limites, C_d . Na segunda, é usado um método simplificado baseado na experiência comparável.

2 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS

Para verificar o projecto de fundações pode ser usado um método directo, um método indirecto e um método prescritivo. O método directo envolve duas verificações separadas. Em primeiro lugar é feita a verificação em relação aos estados limites últimos através de cálculos que modelem o mais próximo possível os mecanismos de rotura e em seguida é efectuado o cálculo dos assentamentos para verificar o estado limite de utilização. A verificação aos estados limites últimos pode ser efectuada usando modelos analíticos de cálculo da capacidade resistente ou da resistência ao deslizamento ou usando modelos semi-empíricos de cálculo onde a capacidade resistente é avaliada directamente com um valor obtido a partir dos resultados de ensaios in situ.

Na verificação aos estados limites de utilização são efectuados cálculos dos assentamentos através de modelos analíticos ou semi-empíricos.

O método indirecto é baseado na experiência comparável e usa os resultados de medições de campo ou de laboratório ou de outras observações e cargas do estado limite de utilização. O uso deste método pretende satisfazer automaticamente os requisitos do estado limite utilização e do estado limite último. Os cálculos podem ser efectuados usando modelos analíticos ou modelos semi-empíricos.

O método prescritivo é baseado na experiência comparável e a capacidade resistente nominal pode ser obtida, por exemplo, em gráficos ou tabelas.

3 CAPACIDADE RESISTENTE DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS ATRAVÉS DO MÉTODO DIRECTO

Na verificação da capacidade resistente de uma fundação superficial deve ser verificada a seguinte desigualdade:

$$V_d \leq R_d \quad (2)$$

onde V_d é o valor de cálculo da componente normal à fundação da acção correspondente ao estado limite último e R_d é o valor de cálculo da capacidade resistente da fundação em relação às acções normais a ela.

V_d é obtido majorando os valores característicos das acções através de coeficientes parciais de segurança (Tab. 1) e R_d pode ser obtido usando as expressões analíticas apresentadas no exemplo de cálculo dado no Anexo D do Eurocódigo 7 (Parte 1) minorando os valores característicos dos parâmetros resistentes dos terrenos pelos coeficientes parciais de segurança dados na Tabela 2. De notar que não é minorado o ϕ' mas sim a $\tan\phi'$. Para além disso, é ainda usado um coeficiente parcial γ_R para minorar a resistência (Tab. 3).

Os coeficientes de segurança parciais a usar dependem da abordagem de cálculo adoptada. O Eurocódigo 7 apresenta três abordagens de

cálculo (DA-1, DA-2 e DA-3) correspondendo cada uma delas a uma combinação diferente dos conjuntos dos coeficientes parciais (Tab. 4).

Relativamente à Abordagem de Cálculo 3 os valores característicos das acções vindas da estrutura (acções estruturais) são multiplicados pelos coeficientes do conjunto A1 da Tabela 1 para obter os seus valores de cálculo enquanto que os valores de cálculo das acções que surgem do terreno e são transportados através dele (acções geotécnicas) são avaliadas usando os coeficientes parciais na resistência do terreno do conjunto M2 e os coeficientes parciais das acções do conjunto A2.

Tabela 1. Coeficientes parciais das acções (γ_F) e dos efeitos das acções (γ_E).

Acção		Símbolo	Conjunto	
			A1	A2
Permanente	Desfavorável	γ_G	1,35	1,0
	Favorável		1,0	1,0
Variável	Desfavorável	γ_Q	1,5	1,3
	Favorável		1,0	1,0

Tabela 2. Coeficientes parciais para os parâmetros do solo (γ_M).

Parâmetro do solo	Símbolo	Conjunto	
		M1	M2
Ângulo de resistência ao corte ^a	γ_φ	1,0	1,25
Coesão efectiva	γ_c	1,0	1,25
Resistência ao corte não drenada	γ_{cu}	1,0	1,4
Resistência não confinada	γ_{qu}	1,0	1,4
Peso volúmico	γ_γ	1,0	1,0

^a Este coeficiente é aplicado a $\tan\varphi$.

Tabela 3. Coeficientes parciais para a resistência (γ_R) para fundações superficiais.

Resistência	Símbolo	Conjunto		
		R1	R2	R3
Carregamento vertical	$\gamma_{R,v}$	1,0	1,4	1,0
Deslizamento	$\gamma_{R,h}$	1,0	1,1	1,0

Tabela 4. Combinações para as diferentes Abordagens de Cálculo.

Abordagem de Cálculo	Combinação
1	A1'+M1'+R1 A2'+M2'+R1
2	A1'+M1'+R2
3	A1 ou A2'+M2'+R3

Como já foi anteriormente mencionado, no Anexo D do EC7 é apresentado um exemplo do

cálculo analítico da capacidade resistente de uma fundação superficial quer em condições drenadas quer em condições não drenadas. Uma vez que nos exemplos aqui tratados serão efectuadas análises em condições drenadas é aqui apresentada a expressão geral usada nessas condições:

$$R/A' = c'N_c b_c s_c i_c + q'N_q b_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma \quad (3)$$

sendo c' a coesão efectiva do solo, q' a tensão efectiva vertical ao nível da base da fundação, γ' o peso volúmico submerso do solo abaixo do nível da fundação, B' a largura efectiva da fundação, N são os coeficientes da capacidade resistente, com os índices relativos à coesão c , sobrecarga q e peso volúmico γ , b são os coeficientes de inclinação da base, com os índices c , q e γ , s são os coeficientes de forma da base da fundação, com os índices c , q e γ e i são os coeficientes de inclinação da carga, com os índices c , q e γ .

Nos exemplos aqui apresentados são efectuadas análises baseadas no EC7, análises tradicionais efectuadas em Portugal usando factores globais de segurança recorrendo aos métodos de Hansen e Vésic (Bowles 1996) e análises com base em regulamentação espanhola de carácter geotécnico (Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias, ROM 05-94, Documento Básico DB-4 "Cimentaciones" do Código Técnico de La Edificación e Guia de Cimentaciones de Obras de Carretera (Perucho e Estaire 2005)).

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Os exemplos aqui apresentados dizem respeito a dois casos tratados por Schmertmann e apresentados por Bowles (1996). Trata-se de duas fundações superficiais de pilares de ponte assentes em terrenos de areia siltosa. Na Tabela 5 são apresentadas as características geométricas das fundações analisadas (Fig. 1) bem como os valores da tensão de contacto, p , e da acção vertical que a originou, V . Na Tabela 6 são apresentadas as resistências de ponta do cone penetrometro (q_c), o módulo de

deformabilidade (E_s), os assentamentos calculados através dum método apresentado por Bowles (1996) bem como os valores medidos apresentados pelo mesmo autor.

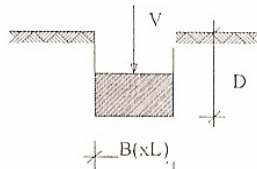


Figura 1. Características geométricas e carga aplicada na fundação

Tabela 5. Características geométricas das fundações analisadas e cargas aplicadas.

Caso	B (m)	L (m)	D (m)	p (kPa)	V (kN)
1	2,6	22,8	2	179	10611,12
2	3,0	12,5	3	160	6000

Tabela 6. Resistências de ponta do cone penetrómetro (q_c), módulo de deformabilidade (E_s) e assentamentos.

Caso	q_c (kPa)	E_s (kPa)	Assentamentos (mm)	
			Calculados	Medidos
1	3924	14842,9	36,8	38,9
2	11772	29685,8	17,0	21,6

Para efeitos dos cálculos aqui apresentados os valores constantes nas Tabelas 5 e 6 são considerados como característicos nos cálculos correspondentes ao EC7 e valores de serviço para as outras abordagens efectuadas.

Bowles (1996) não indica quais as fracções de V correspondentes às cargas permanentes e às cargas variáveis nem os valores dos ângulos de resistência ao corte. Relativamente às cargas considerou-se que 60% corresponde às cargas permanentes e 40% às cargas variáveis. O valor do ângulo de resistência ao corte foi estabelecido com base na Tabela 7 apresentado numa versão provisória do EC7-Parte 3 (ENV 1997-3 1995) que relaciona a resistência de ponta do cone penetrómetro, q_c , com o ângulo da resistência ao corte, ϕ' , e com o módulo de deformabilidade do solo, E_s . Tendo em conta que o solo é siltoso foram considerados valores um pouco inferiores aos obtidos na Tabela 7. Sendo assim, considerou-se para o caso 1 $\phi'=32^\circ$ e para o caso 2 $\phi'=35^\circ$.

Tabela 7. Valores dos ângulos da resistência ao corte e do módulo de deformabilidade em função da resistência de ponta do cone penetrómetro.

Compacidade relativa	q_c (MPa)	ϕ' ($^\circ$)	E_s (MPa)
Muito baixa	0,0 – 2,5	29 - 32	<10
baixa	2,5 – 5,0	32 - 35	10-20
média	5,0 – 10,0	35 - 37	20-30
alta	10,0 – 20,0	37 - 40	30-60
Muito alta	>20,0	40 - 42	60-90

4.1 Caso 1

Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos através das três abordagens de cálculo do EC7, do método tradicional (Hansen e Vesic) usado em Portugal e dos códigos espanhóis. No caso do EC7 quer os valores das acções V quer das resistências R são valores de cálculo enquanto que nas restantes situações esses valores são valores não afectados por qualquer coeficiente de segurança.

Tabela 8. Resumo dos resultados para a capacidade resistente para o caso 1.

Abordagem	V (kN)	R (kN)	R/V
DA-1 – Comb2	11884,45	24307,20	2,05
DA-1 – Comb1	14961,68	49766,63	3,33
DA-2	14961,68	35547,59	2,38
DA-3	14961,68	24307,20	1,62
Hansen	10611,12	44427,02	4,19
Vesic	10611,12	51658,93	4,87
Código Técnico	10611,12	45886,23	4,32
Guia	10611,12	50152,45	4,73
Cimentaciones			
ROM 0.5-94	10611,12	44812,84	4,22

Para obter a carga admissível da fundação quer no cálculo tradicional português quer usando os códigos espanhóis é usado um coeficiente de segurança igual a 3 para minorar a capacidade resistente R. No caso português este coeficiente garante implicitamente que não é ultrapassado o assentamento máximo admissível não sendo, por isso, efectuado o cálculo dos assentamentos. No caso espanhol, de acordo com Perucho e Estaire (2005), é ainda necessário efectuar a verificação dos assentamentos.

Em todos os cálculos efectuados pelos métodos de Hansen, Vesic e pelos códigos espanhóis foi obtido um coeficiente de segurança superior a 3, ultrapassando em todos

eles 4. Nestes casos a maior segurança é obtida usando as fórmulas de Vesic (4,87) e a menor segurança é obtida através do código ROM 0.5-94 (4,22).

No caso do EC7 a abordagem de cálculo 3 é a que apresenta menor segurança ($R/V=1,62$) sendo portanto, neste caso, condicionante no dimensionamento.

Em relação aos estados limites de utilização, como se pode ver, o assentamento medido é inferior ao valor considerado admissível para pilares de pontes, que é de 50 mm (Seco e Pinto 1997).

A seguir será mantida a razão L/B e determinada a largura B "ótima" da fundação. Essa largura, no caso do EC7, é a que conduz à igualdade entre a acção vertical resultante de cálculo, V_d , e a capacidade resistente de cálculo do terreno, R_d . Nos métodos de Hansen, Vesic e códigos espanhóis essa largura corresponderá a uma razão R/V igual a 3.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9.

Como se pode ver, no caso do EC7, a Abordagem de Cálculo 3 é a que condiciona as dimensões da fundação ($B=2,11$ m) e nas outras abordagens são as de Hansen e do código ROM 0.5-94 que conduzem a maior largura ($B=2,25$ m) muito embora as outras análises conduzam a valores muito próximos deste.

Tabela 9. Largura "ótima" da sapata mantendo a razão L/B e assentamentos correspondentes (Caso 1).

Abordagem	B (m)	Assentamento (mm)
DA-1 – Comb2	1,91	-
DA-1 – Comb1	1,56	-
DA-2	1,81	-
DA-3	2,11	44,5
Hansen	2,25	42,0
Vesic	2,13	44,1
Código Técnico	2,22	42,6
Guia Cimentaciones	2,15	43,7
ROM 0.5-94	2,25	42,0

Em relação aos estados limites de utilização os valores obtidos para os assentamentos usando o procedimento de Bowles (1996) são também apresentados na Tabela 9 e, como se pode ver, são todos inferiores a 50 mm.

Portanto, neste caso, o dimensionamento através do EC7 é condicionado pelos estados

limites últimos e na abordagem tradicional portuguesa o uso dum factor de segurança global igual a 3 cobre os estados limites de utilização. Os assentamentos calculados para os códigos espanhóis estão também abaixo dos assentamentos considerados admissíveis.

4.2 Caso 2

Os resultados obtidos para este caso são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Resultados obtidos para a capacidade resistente para o caso 2.

Abordagem	V (kN)	R (kN)	R/V
DA-1 – Comb2	6720	23489,98	3,50
DA-1 – Comb1	8460	52018,66	6,15
DA-2	8460	37156,19	4,39
DA-3	8460	23489,98	2,78
Hansen	6000	45658,49	7,61
Vesic	6000	53591,25	8,93
Código Técnico	6000	48973,63	8,16
Guia Cimentaciones	6000	52907,54	8,82
ROM 0.5-94	6000	46547,36	7,76

Como se pode ver, tal como para o caso 1, a abordagem do EC7 que apresenta menor segurança ($R/V=2,78$) é a Abordagem de Cálculo 3, sendo por isso condicionante no dimensionamento. Todas as restantes abordagens conduzem a razões R/V superiores a 3.

A verificação aos estados limites de utilização é automaticamente verificada com um assentamento medido de 21,6 mm.

Em seguida é efectuada uma análise semelhante à efectuada para o caso 1, mantendo constante a razão L/B e determinando o valor óptimo de B . Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11.

No caso do EC7 a abordagem que conduz à maior largura é a Abordagem de Cálculo 3 com 1,94 m. Nas abordagens tradicionais portuguesas usando os métodos de Hansen e Vesic é o método de Hansen que condiciona as dimensões da fundação com $B=2,01$ m. Em relação aos códigos espanhóis é o ROM 0.5-94 que condiciona as dimensões da fundação. Relativamente aos assentamentos é a Abordagem de Cálculo 3 que conduz a maior assentamento não diferindo estes muito dos

valores obtidos nos outros cálculos efectuados. De qualquer forma, os valores dos assentamentos são inferiores ao valor máximo admissível.

Tabela 11. Largura "óptima" da sapata mantendo a razão L/B e assentamentos correspondentes (Caso 2).

Abordagem	B (m)	Assentamento (mm)
DA-1 – Comb2	1,76	-
DA-1 – Comb1	1,39	-
DA-2	1,61	-
DA-3	1,94	24,7
Hansen	2,01	23,8
Vesic	1,90	24,3
Código Técnico	1,95	24,6
Guia Cimentaciones	1,91	24,2
ROM 0.5-94	1,99	24,1

5 CONCLUSÕES

Como se pode ver, para carregamentos verticais, no caso do EC7, é a Abordagem de Cálculo 3 que conduz a maiores dimensões das sapatas analisadas. No entanto, no primeiro caso as abordagens tradicionais (Hansen e Vesic) e dos códigos espanhóis conduzem a maiores valores das dimensões das fundações. Já no segundo caso, a aplicação das fórmulas de Vesic e do Guia de Cimentaciones conduz a menores valores da largura da fundação do que a obtida pelo EC7. Em ambos os casos é nos cálculos com o EC7 (Abordagem de Cálculo 3) que se obtém o maior assentamento que, no entanto, é ligeiramente superior aos assentamentos obtidos nos cálculos de Hansen, Vesic e códigos espanhóis.

A média das resistências obtidas através dos métodos de Hansen e Vesic é cerca de 66% (caso 1) e 71% (caso 2) do valor da capacidade resistente obtida para o EC7. Relativamente aos códigos espanhóis esse valor é de cerca de 65% (caso 1) e 70% (caso 2).

O valor da capacidade resistente R_d obtido pelo EC7 está próximo do valor médio da resistência dos códigos espanhóis obtida dividindo o valor da resistência por 2. A diferença é de 3,4% para o caso 1 e de -5,3% para o caso 2. A diferença obtida para o caso 1 é semelhante à obtida por Perucho e Estaire (2005) que se situa em torno dos 3%.

Considerando a média dos valores da resistência obtidos através das fórmulas de Hansen e Vesic a diferença é de 1,2% para o caso 1 e de -5,6% para o caso 2.

A verificação em relação ao estado limite de utilização não é condicionante para qualquer das abordagens de cálculo já que o assentamento total é inferior ao assentamento admissível de 50 mm.

No caso do cálculo tradicional é prática corrente adoptar a coeficiente de segurança global de 3 para condições drenadas considerando que esse coeficiente permite que não é excedido o assentamento admissível. Aliás, nos dois casos analisados esse assentamento máximo admissível não é excedido.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

REFERÊNCIAS

- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., McGraw Hill, New York, NY, USA.
- EN 1997-1 (2004). *Eurocode 7 Geotechnical Design – Part 1: General rules*.
- ENV 1997-3 (1995). *Eurocode 7 - Parte 3: Geotechnical design assisted by field tests (Draft)*
- Perucho, A. e Estaire, J. (2005). Comparación del dimensionamento de cimentaciones aplicando el eurocódigo EC7 y las normativas españolas, *Segundas Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia*, SPG, Lisboa, p. 359-368.
- Seco e Pinto, P. S. (1997). Fundações em estacas. Dimensionamento de Estacas em Compressão Segundo o Eurocódigo 7. *Sessão Comemorativa dos 25 da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG) – EC7 Projecto Geotécnico*. SPG, LNEC, Lisboa, p. II-1 a II-67.