

CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS EM MACIÇOS ROCHOSOS DE ACÓRDO COM O EC7

BEARING CAPACITY OF SPREAD FOUNDATIONS ON ROCK MASSES ACCORDING TO EC7

Miranda, Tiago Filipe da Silva; *Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, tmiranda@civil.uminho.pt*

Martins, Francisco Ferreira; *Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, ffm@civil.uminho.pt*

Araújo, Nuno Miguel Faria; *Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, nuno@civil.uminho.pt*

RESUMO

O Eurocódigo 7 (EC7) define diretivas para o projeto de fundações superficiais assentes em maciços rochosos e apresenta o exemplo de um método para estimar a capacidade resistente presumida deste tipo de fundação. Contudo, o mesmo não tem em conta importantes fatores que influenciam a capacidade de carga da fundação, o que pode ser considerado como uma importante limitação. Neste trabalho, o método recomendado pelo EC7 é comparado com dois métodos existentes na literatura. São utilizados dois casos de estudo simples e os resultados são comparados. Da análise dos resultados detetou-se que a capacidade resistente obtida utilizando o método do EC7 é a menos conservativa num dos casos analisados e a mais conservativa, conjuntamente com um dos métodos alternativos, no outro caso estudado. Isto revela que o método preconizado pelo EC7 deve ser usado com precaução mesmo em casos muito simples.

ABSTRACT

In Eurocode 7 (EC7), some guidelines are provided for the design of spread foundations built on rock masses and a method for the calculation of the bearing capacity for this type of foundations is suggested. However, this method does not take into account important factors that influence the bearing capacity of the foundation, which can be an important limitation of the method. In this work, the EC7 method is compared with two other methods that can be found in literature. They are applied to two simple examples and the results are compared. The results revealed the EC7 method as the least conservative in one of the analysed cases and the greatest conservative, jointly with other used method, in the other studied case. This means that the EC7 method should be used with caution even for very simple cases.

1 - INTRODUÇÃO

O objetivo fundamental do Eurocódigo 7 é o de definir regulamentação geotécnica aplicável em todo o espaço Europeu. Tal simplificará a linguagem geotecnia e permitirá uma melhor comunicação entre o engenheiro geotécnico e o engenheiro estruturalista.

O Eurocódigo 7 (EC7) é composto por duas partes. A primeira parte é composta pelas regras gerais do projeto geotécnico, estando a segunda parte dedicada à investigação geotecnia e ensaios de campo/laboratório.

A parte 1 do EC7 (NP EN 1997-1, 2010) inclui diversos temas. Contudo, este estudo é dirigido para fundações superficiais. De acordo com o EC7, no projeto de fundações superficiais é possível a utilização de métodos diretos, indiretos ou prescritivo. Nos métodos diretos deve ser efetuada a verificação em relação a cada possível estado limite último e de utilização. Por sua vez, os métodos indiretos baseiam-se em experiência comparável, e em resultados de ensaios de campo ou laboratoriais ou em outras observações. O método prescritivo é baseado na experiência comparável e a capacidade resistente nominal pode ser obtida, por exemplo, em gráficos e tabelas. Este último método não requer a utilização de modelos de cálculo, os quais podem não estar disponíveis, sendo nestes casos o dimensionamento usualmente conservativo.

O EC7 apresenta nos anexos D e G vários exemplos de métodos, com caráter informativo, para o dimensionamento de fundações superficiais assentes, respetivamente, em meios terrosos e rochosos. O método sugerido para estimar a capacidade de carga em sapatas assentes em meios terrosos é um método direto. No caso de sapatas assentes em meios rochosos, o EC7 apresenta no anexo G um método (não referenciado) para estimar a tensão admissível. Este método apresenta as características dos métodos prescritivos, os quais são geralmente definidos por regras conservativas. De facto, este método

é muito simplificado e não tem em consideração importantes aspetos que influenciam a capacidade de carga de fundações superficiais em maciços rochosos.

Não é possível a definição de um processo único para o projeto de fundações superficiais assentes em meios rochosos devido aos diversos mecanismos que se podem formar e que condicionam a capacidade de carga. Esses mecanismos são fortemente influenciados pelas características de fraturação do maciço. Contudo, existem métodos analíticos relativamente simples que permitem estimar a capacidade de carga e podem ser utilizados em vários casos práticos. Os métodos numéricos podem ser aplicados nos casos mais complexos e de maior risco. Resumindo, o método a adotar depende da importância da estrutura geotécnica, do risco inerente e da complexidade *in situ* da estrutura geológica.

Neste estudo, o método recomendado pelo EC7 para o dimensionamento de fundações superficiais assentes em meios rochosos é comparado com dois métodos existentes na literatura. Os métodos são aplicados em dois casos de estudo simples e é analisada a aplicabilidade do método preconizado no EC7.

2 - CAPACIDADE RESISTENTE PRESUMIDA DE FUNDAÇÕES ROCHOSAS DE ACORDO COM O EC7

Para o dimensionamento de fundações superficiais assentes em meios rochosos o EC7 apresenta considerações adicionais de projeto. Nessas considerações são apresentados alguns aspetos que devem ser considerados no projeto de fundações superficiais, nomeadamente:

- a deformabilidade e resistência do maciço rochoso e o assentamento admissível da estrutura suportada;
- a presença sob a fundação de quaisquer estratos de baixa resistência, tais como, por exemplo, zonas de dissolução e zonas de falhas;
- a presença de planos de estratificação ou de outras descontinuidades e as suas características (e.g., preenchimento, continuidade, largura e espaçamento);
- o estado de alteração, de decomposição e de fraturação da rocha;
- as perturbações do estado natural da rocha causadas pelas atividades construtivas (por exemplo, a execução de obras subterrâneas ou escavação de taludes) próximas das fundações a executar.

Refere também que no caso de rochas ígneas intactas, gnaisses, calcário e arenitos muito resistentes e intactos, a capacidade resistente presumida é limitada pela resistência à compressão do betão da sapata. Finalmente comenta a necessidade de estimativa do assentamento da fundação com base em experiência comparável.

O método apresentado no anexo G do EC7 (NP EN 1997-1, 2010) pode ser utilizado na estimativa da capacidade de carga de fundações superficiais em maciços brandos e fraturados com descontinuidades muito próximas, incluindo cré com porosidade inferior a 35%. O método assume que a estrutura permite assentamentos até 5‰ da largura da sapata e que os valores da capacidade resistente para outros assentamentos podem ser obtidos por proporção direta. Contudo, no caso dos maciços rochosos brandos e fraturados (com descontinuidades abertas ou preenchidas), devem ser usados valores reduzidos da capacidade de carga.

A aplicação do método começa com a seleção do grupo de rochas, atendendo à classificação apresentada no Quadro 1. Após a definição do grupo, a capacidade resistente da fundação pode ser estimada por recurso à Figura 1, considerando a informação adicional relacionada com a resistência à compressão simples da rocha e do espaçamento da família principal de descontinuidades.

Quadro 1 - Agrupamento de maciços brandos e fraturados

Grupo	Tipo de rocha
1	Calcários e dolomias puros
	Arenitos calcários de baixa porosidade
2	Rochas ígneas
	Calcários oolíticos e calcários margosos
	Arenitos bem cimentados
	Siltitos argilosos calcários endurecidos
	Rochas metamórficas, incluindo ardósias e xistos (clivagem e foliação horizontais)

Quadro 1 - Agrupamento de maciços brandos e fraturados (continuação)

Grupo	Tipo de rocha
3	Calcários muito margosos
	Arenitos com pouca cimentação
	Ardósias e xistos (clivagem e foliação inclinadas)
4	Siltitos e argilosos não cimentados e argilitos xistosos

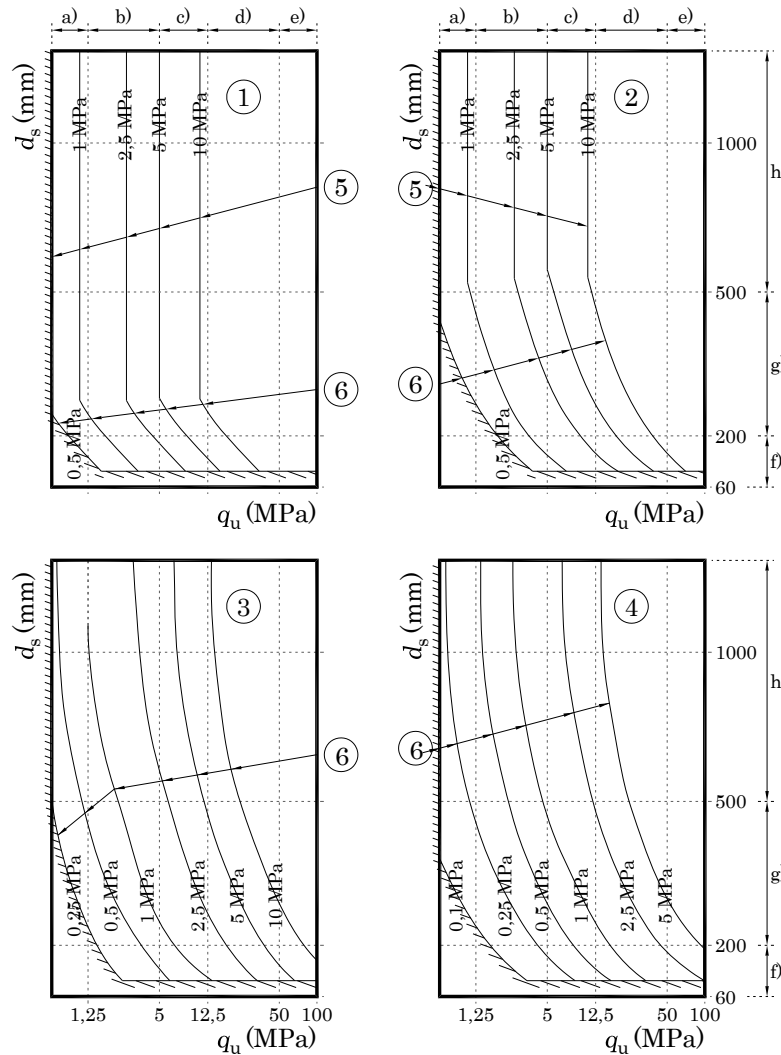


Figura 1 - Capacidade resistente presumida para fundações superficiais quadradas para assentamentos que não excedam 5‰ da largura da fundação, para os quatro grupos definidos no Quadro 1.

3 - Métodos alternativos para estimativa da capacidade de carga

3.1 - Método de equilíbrio limite (Wyllie, 1992)

A estimativa da capacidade de carga em rochas intactas e muito fraturadas, baseada no mecanismo de rotura apresentado na Figura 2, pode ser calculada de modo muito análogo à realizada para meios terrosos. Consiste numa metodologia simplificada e conservativa baseada nas cunhas ativa e passiva definidas por linhas retas sob a fundação (Fig. 3). Com o aumento da carga aplicada, e à medida que a mesma se aproxima da resistência limite da rocha, começam a surgir fraturas e formam-se progressivamente as cunhas, assim como zonas de rocha esmagada. Esta condição resulta num comportamento dilatante da rocha, e consequente formação de fraturação radial que expande para o exterior e pode atingir a superfície do maciço rochoso.

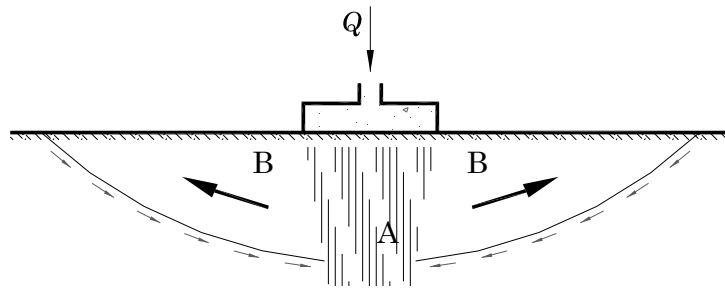


Figura 2 - Modo de rotura de um maciço rochoso homogêneo por aumento do carregamento axial da sapata

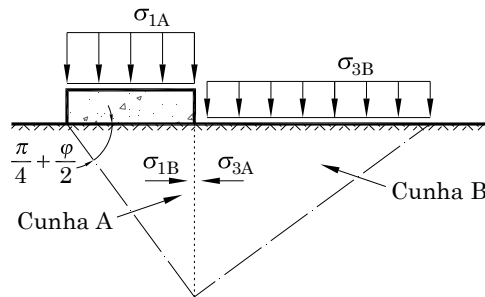


Figura 3 - Esquema das cunhas ativa e passiva num meio rochoso

Para as sapatas com desenvolvimento infinito ($L \gg B$), construídas sobre uma superfície rochosa horizontal, assume-se que a rocha sob a fundação se encontra num estado de tensão similar ao de uma amostra no ensaio triaxial. A tensão principal máxima na cunha A (σ_{1A}) é igual a tensão transmitida pela fundação (q) se o peso da rocha não for considerado. A cunha B encontra-se também submetida a um estado de tensão semelhante ao existente no ensaio triaxial com a tensão principal máxima (σ_{1B}) atuando horizontalmente e a tensão principal mínima (σ_{3B}) atuando verticalmente.

Se a sapata é executada à superfície, então σ_{3B} é nulo, caso contrário é igual à tensão vertical produzida pelo peso do maciço rochoso acima do nível do plano da base da sapata.

Quando as cunhas entram em rotura, a tensão principal mínima na cunha A (σ_{3B}) corresponde à resistência à compressão uniaxial da cunha B, isto é, corresponde à resistência à compressão do maciço rochoso. Utilizando o critério de Rotura de Hoek-Brown (HB) (Hoek e Brown, 1980), a resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso pode ser determinado de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \quad [1]$$

onde m_b , s e a são os parâmetros do critério de rotura de HB; σ_c é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta e σ_1 e σ_3 representam, respetivamente, a tensão principal máxima e mínima.

A equação 1 permite a determinação da tensão principal atuante na cunha A (σ_{1A}). A tensão principal mínima na mesma cunha (σ_{3A}) representa a resistência da rocha da cunha B e é igual à resistência à compressão uniaxial da rocha intacta quando σ_{3B} é nula. Neste caso, a resistência uniaxial do maciço rochoso fraturado pode ser obtido de modo aproximado através da expressão:

$$\sigma_{c,mass} = \sigma_c \cdot s^a \quad [2]$$

e a capacidade de carga é igual à tensão principal máxima na cunha A, a qual é dada por:

$$\sigma_1 = q_{ult} = \left[s^a + \left(m_b \cdot s^a + s \right)^a \right] \cdot \sigma_c \quad [3]$$

Esta expressão pode ser reescrita como:

$$q_{ult} = N_\sigma \cdot \sigma_c \quad [4]$$

Onde,

$$N_{\sigma} = \left[s^a + (m_b \cdot s^a + s)^a \right] \quad [5]$$

A formulação apresentada na expressão 4 representa a capacidade de carga como uma fração da resistência à compressão uniaxial da rocha sã. O valor de N_{σ} , designado por fator da capacidade de carga, pode ser obtido por meio da expressão 5.

A capacidade de carga admissível (q_a) está relacionada com a resistência do maciço rochoso por meio do fator de segurança (FS) e de um fator corretivo relacionado com a forma da sapata (C_{f1}) (ver Quadro 2):

$$q_a = \frac{C_{f1} \cdot N_{\sigma} \cdot \sigma_c}{FS} \quad [6]$$

Na maioria dos casos são admitidos valores entre 2 e 3 para FS. Com este intervalo, o risco de se atingirem assentamentos elevados é reduzido.

No caso de fundações executadas a alguma profundidade, a expressão 6 é alterada de modo a considerar o aumento de σ_1 , induzido pela existência de uma tensão de confinamento (q_s) aplicada na superfície. A tensão principal mínima (σ_{3B}) toma o valor de q_s e a capacidade de carga admissível é estimada através da seguinte expressão:

$$q_a = \frac{C_{f1} \cdot \left[\sigma_3' + \sigma_c \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \right]}{FS} \quad [7]$$

Onde,

$$\sigma_3' = q_s + \sigma_c \cdot \left(m_b \cdot \frac{q_s}{\sigma_c} + s \right)^a \quad [8]$$

Quadro 2 - Valores de C_{f1}

Forma da sapata	C_{f1}
Retangular (L/B>6)	1,00
Retangular (L/B=5)	1,05
Retangular (L/B=2)	1,12
Quadrada	1,25
Circular	1,20

3.2 - Método de Serrano et al. (2000)

Serrano e Olalla (1994) apresentaram um método para o cálculo da capacidade de carga de sapatas executadas sobre maciços rochosos fraturados. O método tem por base o critério de rotura de HB e permite a aplicação a situações complexas, nomeadamente a existência de cargas excêntricas e a execução de sapatas na proximidade de taludes. Mais recentemente, Serrano et al. (2000) melhoraram o método através da consideração de alterações à formulação original do critério de HB.

Este método considera o maciço rochoso como homogêneo e isotrópico. No caso de uma sapata com base horizontal executada sobre um meio rochoso e submetida a carregamento axial centrado, a capacidade de carga pode ser estimada através da seguinte expressão:

$$q_{ult} = \beta_n \cdot (N_{\beta} - \zeta_n) \quad [9]$$

O cálculo das variáveis β_n e ζ_n é realizado através das seguintes expressões:

$$k = \frac{(1-a)}{a} \quad [10]$$

$$A_n^k = \frac{m_b \cdot (1-a)}{2^{1/a}} \quad [11]$$

$$\beta_n = A_n \cdot \sigma_c \quad [12]$$

$$\zeta_n = \frac{s}{m_b \cdot A_n} \quad [13]$$

A determinação de N_β é realizada recorrendo à Figura 4. A tensão normalizada aplicada ao nível da base da sapata (σ_{01}^*) é obtida através da seguinte expressão:

$$\sigma_{01}^* = \frac{\sigma_1}{\beta_n} + \zeta_n \quad [14]$$

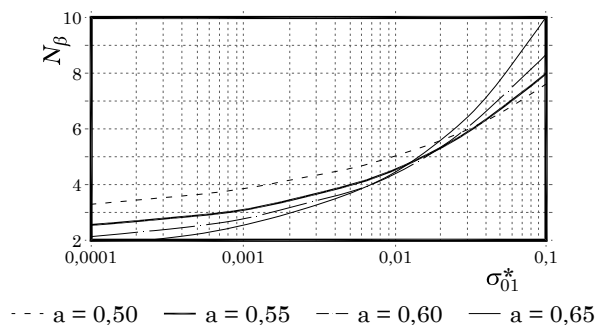


Figura 4 - Ábaco para determinação de N_β

4 - Casos de estudo

4.1 - Caso 1

Este caso é relativo à estimativa da capacidade de carga admissível de uma sapata quadrada com 2 m de lado assente num maciço fraturado de arenito mal cimentado. Foi definido um peso volúmico (γ) para a rocha igual a 22,5 kN/m³ e um espaçamento para a família principal de descontinuidades (s) igual a 0,2 m. Os seguintes parâmetros foram também considerados: Geological Strength Index (GSI) = 20; resistência à compressão uniaxial $\sigma_c = 10$ MPa e FS = 3. A capacidade de carga admissível foi estimada segundo os três métodos descritos anteriormente e admitindo que a fundação é executada quer à superfície, quer a uma profundidade de 2 m. Os principais resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Resultados do caso de estudo 1

Método	q_a (MPa)	q_a (MPa)
	profundidade = 0 m	profundidade = 2 m
Wyllie (1992)	0,35	0,71
Serrano et al. (2000)	1,01	1,46
EC7 (CEN, 2004)	1,70	1,70

Estes resultados revelam uma acentuada diferença entre os valores obtidos nos três métodos. O método proposto por Wyllie (1992) apresenta os valores de capacidade de carga admissível mais baixos, em oposição ao método proposto pelo EC7, que apresenta os valores mais elevados. Um aspeto importante a realçar é o significativo aumento de q_a com a profundidade nos métodos que a permitem considerar. Tal é expectável devido ao aumento da tensão vertical. No caso da base da fundação se localizar a 2 m de profundidade, o método de Wyllie (1992) estima o valor de q_a para o dobro do valor obtido no caso de a sapata assentar à superfície, enquanto no método de Serrano et al. (2000) existe um aumento de 50%. O método preconizado no EC7 (CEN, 2004) não tem em consideração a influência da profundidade na estimativa da capacidade de carga.

4.2 - Caso 2

Um pilar transmite a uma sapata quadrada uma carga vertical de 4 MN. A campanha geotécnica identificou um estrato superficial de solo residual com 3 m de espessura ($\gamma = 20$ kN/m³) assente sobre um maciço granítico alterado e fraturado. Os parâmetros geomecânicos do granito são os seguintes: GSI

= 40; $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$; $\sigma_c = [20;50] \text{ MPa}$; $s = 0,2 \text{ m}$ e $FS = 3$. Pretende-se estimar a capacidade de carga admissível utilizando os três métodos descritos. Atendendo às incertezas relacionadas com o valor de σ_c , optou-se pela realização de um estudo paramétrico de modo a quantificar a sua importância.

Os principais resultados obtidos neste caso de estudo podem ser observados na Figura 5, onde a relação entre q_a e σ_c é apresentada. Da sua análise é possível constatar que q_a apresenta uma relação quase linear com σ_c , com uma pequena exceção no método proposto por Wyllie (1992), no qual a relação é ligeiramente não-linear. Este método, assim como o preconizado pelo EC7, conduzem a resultados semelhantes e da ordem de 25% do valor de σ_c . Por outro lado, o método proposto por Serrano et al. (2000) estima para o valor da capacidade de carga admissível cerca de 74% do valor de σ_c , isto é, quase três vezes superior ao dos restantes métodos.

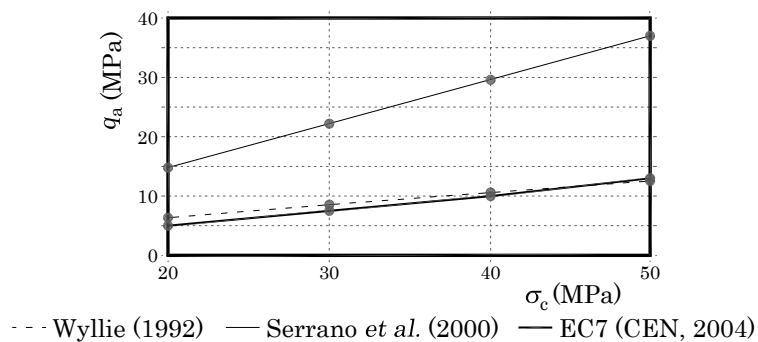


Figura 5 - Variação de q_a em função de σ_c

5 - CONCLUSÕES

Para o projeto de sapatas assentes em maciços rochosos o EC7 estabelece alguns aspetos relevantes a considerar e recomenda um método para estimar a capacidade resistente presumida, o qual pode ser utilizado na maioria dos casos.

Neste estudo o método é apresentado em paralelo com dois outros existentes na literatura. A comparação dos três, baseada em dois casos de estudo simples, permitiu detetar que a estimativa da capacidade de carga varia significativamente entre os métodos, mesmo para os casos simples abordados. O método preconizado por Wyllie (1992) aparenta fornecer um limite inferior para a capacidade de carga admissível.

O método sugerido pelo EC7 é muito simplificado e não tem em consideração aspetos importantes para a estimativa da capacidade de carga, tais como a profundidade da sapata, a sua forma, a excentricidade da carga, a presença de água, entre outros. No caso de estudo 1 confirmou-se a influência da profundidade no valor da capacidade de carga.

Apesar do método recomendado no EC7 se basear em pressupostos conservativos, estima para o caso de estudo 1 os valores de capacidade de carga mais elevados. Contudo, no caso de estudo 2, os resultados obtidos com o método do EC7 são os mais baixos e semelhantes aos obtidos pelo método preconizado por Wyllie.

Resumindo, o método proposto pelo EC7 para o projeto de sapatas sobre maciços rochosos deve ser utilizado com precaução e unicamente para fornecer a ordem de grandeza da capacidade de carga. Os resultados devem ser validados por meios de outros processos analíticos ou mesmo por recurso a métodos numéricos.

REFERÊNCIAS

- NP EN 1997-1 (2010). *Eurocódigo 7 - Projeto Geotécnico – Parte 1: Regras Gerais*. Instituto Português de Qualidade.
- Hoek, E. e Brown, E. (1980). *Underground excavations in rock*. Institution of Mining and Metallurgy, Londres, 627p.
- Wyllie, D. (1992). *Foundations on rock*. E & FN Spon.
- Serrano, A. e Olalla, C. (1994). Ultimate bearing capacity of rock masses. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 31: 93-106.
- Serrano, A., Olalla, C. e González, J. (2000). Ultimate bearing capacity of rock masses based on the modified Hoek-Brown criterion. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37: 1013-1018.