

Verificação da segurança ao deslizamento de barragens gravidade considerando a variabilidade das propriedades hidráulicas e mecânicas do maciço rochoso de fundação



Renato Pereira

Bolseiro
FCT/UNL
Torre da Caparica
r.pereira@campus.fct.unl.pt



António Lopes Batista

Investigador Principal
LNEC
Lisboa
a.l.batista@lnec.pt



Luís Canhoto Neves

Lecturer
University of Nottingham
Nottingham, UK
luis.neves@nottingham.ac.uk

SUMÁRIO

As normas de projeto de barragens de muitos países, incluindo Portugal, consideram, para a verificação da segurança, o método dos coeficientes globais. A regulamentação europeia de estruturas, que se baseia em abordagens probabilísticas da segurança, adota a metodologia dos coeficientes de segurança parciais. Julgou-se assim oportuno estudar a influência da incerteza relativa às propriedades hidráulicas e mecânicas dos maciços rochosos de fundação na verificação da segurança ao deslizamento de barragens gravidade de betão sujeitas às ações de projeto, incluindo sismos de grande intensidade. Os dados geométricos, bem como as ações do peso próprio do betão, da pressão hidrostática da água e do sismo máximo de projeto, foram considerados como variáveis determinísticas. O coeficiente de atrito e o fator de quantificação das subpressões no plano de drenagem foram considerados como variáveis aleatórias. Utilizando como casos de estudo algumas barragens gravidade portuguesas, e recorrendo ao método de Monte Carlo, determinou-se a frequência de não verificação dos critérios de segurança para a ocorrência das ações sísmicas extremas e a probabilidade de rotura. As barragens analisadas apresentam probabilidades anuais de falha de cerca de 10^{-5} para a ocorrência de um sismo de grande intensidade, definido a partir do Anexo Nacional do EC8 para um período de retorno de 1000 anos.

Palavras-chave: Barragens gravidade, propriedades da fundação, abordagem probabilística, probabilidade de falha

1. INTRODUÇÃO

As barragens gravidade de betão são dimensionadas de acordo com os critérios preconizados no Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) [1] e nas Normas de Projeto de Barragens (NPB) [2]. Esta regulamentação considera, na verificação de segurança, o método dos coeficientes globais, em linha com as indicações da International Commission on Large Dams (ICOLD). A atual regulamentação europeia de estruturas [3], que se baseia em abordagens probabilísticas da segurança, adota a metodologia dos coeficientes de segurança parciais. Atendendo a esta realidade, nos últimos anos têm vindo a ser realizados estudos no âmbito da abordagem probabilística da segurança de barragens [4, 5], no qual o presente trabalho se insere.

No caso das barragens de betão, as ações do peso próprio dos materiais, da pressão hidrostática e das variações de temperatura são em regra bem conhecidas, ao passo que as pressões da água nas fundações, as ações sísmicas e a resistência dos materiais naturais de fundação continuam a ser representadas com incerteza. Nas últimas décadas têm sido desenvolvidos muitos estudos sobre o comportamento hidromecânico dos maciços rochosos de fundação das barragens, mas ainda é escasso o conhecimento sobre a incerteza física das grandezas associadas à percolação da água nas fundações rochosas. Neste trabalho apresenta-se uma metodologia de avaliação da influência da incerteza das subpressões e da resistência na interface betão-rocha, com vista à análise probabilística condicionada da segurança de barragens gravidade de betão, que foi aplicada a quatro casos de estudo.

2. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS GRAVIDADE

2.1 Aspetos gerais

A estabilidade das barragens gravidade está diretamente relacionada com o seu peso próprio. Dadas as suas dimensões, as tensões no corpo das obras são, em regra, muito pequenas quando comparadas com a resistência mecânica do betão. Em condições normais de serviço, as ações tendem a instabilizar o perfil como um corpo rígido, tanto ao derrubamento como ao deslizamento. Por esse motivo, o perfil destas obras tem uma forma aproximadamente triangular. Em geral, é a verificação da segurança ao deslizamento que condiciona a estabilidade destas estruturas, pelo que será a considerada neste trabalho.

As NPB estipulam que se deve garantir que as forças resistentes (forças estabilizantes) deverão ser superiores às solicitações (forças instabilizantes), ou seja, deverá garantir-se um fator de segurança superior à unidade,

$$F_R \geq F_S \Leftrightarrow \frac{F_R}{F_S} \geq 1 \Leftrightarrow FS \geq 1 \quad (1)$$

As principais ações a considerar no dimensionamento das barragens gravidade dividem-se em três grupos (Figura 1): i) as ações gravíticas, que se traduzem pelo peso próprio dos materiais, com resultante W para a estrutura de betão; ii) ações da água, nomeadamente a pressão hidrostática no paramento de montante (com resultante I_w) e de jusante (com resultante I_j) e a subpressão na interface betão-rocha ou em outras superfícies de descontinuidade da vizinhança da base da barragem (com resultante U); e as iii) ações sísmicas, que podem ser consideradas, em primeira aproximação, como forças de inércia equivalentes aplicadas no corpo da barragem (com resultantes horizontal F_{sh} e vertical F_{sv}) e através da ação hidrodinâmica no paramento de montante (com resultante I_{ws}).

As resistências mobilizadas para o cenário de deslizamento são devidas ao atrito e à coesão nas superfícies de descontinuidade junto à base da barragem (resultante R) e os impulsos da água e passivo a jusante (resultantes I_j e I_p , respetivamente).

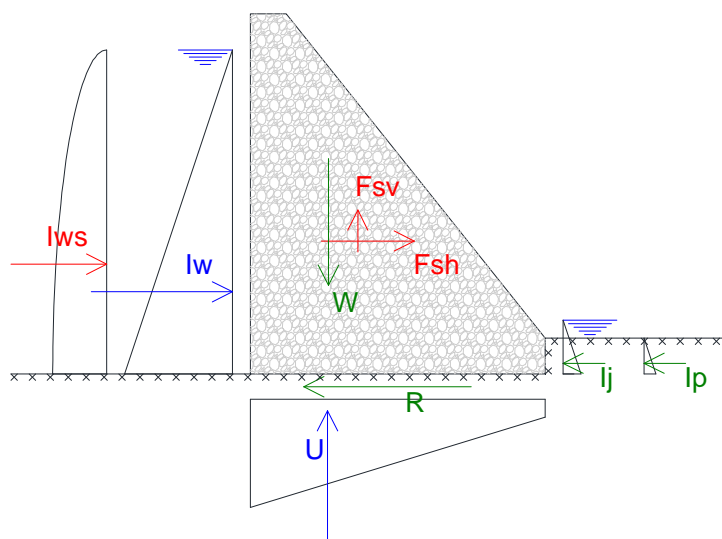


Figura 1. Ações e resistências envolvidas na estabilidade de barragens gravidade.

Como referido, o deslizamento da barragem como corpo rígido pode dar-se pela interface de contacto barragem-fundação ou ao longo de superfícies de descontinuidade existentes no maciço rochoso. Dada a dificuldade de prever a superfície potencial de deslizamento, é usual considerar-se que o deslizamento ocorrerá numa descontinuidade natural do maciço rochoso na vizinhança da base da barragem, quando esta é horizontal ou subhorizontal. A equação de estado limite, correspondente a um fator de segurança unitário, é dada por,

$$R + I_j + I_p = I_w + F_{SH} + I_{WS} \Leftrightarrow (R + I_j + I_p) - (I_w + F_{SH} + I_{WS}) = 0 \quad (2)$$

A regulamentação portuguesa [1, 2] estipula que a verificação da segurança e da funcionalidade deve ser feita relativamente a cenários de rotura e cenários correntes, respetivamente. Neste trabalho pretende-se avaliar a probabilidade de falha estrutural, pelo que serão apenas considerados os cenários de rotura. De acordo com a classificação do

Eurocódigo 0 [3] sobre as situações de projeto, os cenários de rotura, equivalentes aos estados limites últimos, estão associados à ocorrência de acontecimentos extremos. De acordo com a regulamentação portuguesa [1], e seguindo a terminologia das normas provisórias francesas [4], a verificação da segurança para os cenários de rotura deve ser feita relativamente à combinação hidrostática extrema (ocorrência de uma grande cheia) e à combinação sísmica accidental (ocorrência de um sismo de intensidade excepcional). Em Portugal é condicionante do dimensionamento o cenário correspondente à combinação de um sismo de grande intensidade para o nível de pleno armazenamento da albufeira (NPA), ou seja, a combinação sísmica accidental.

2.2 Subpressões

A percolação de água no maciço de fundação gera pressões nas superfícies de descontinuidade. Na interface betão-rocha, estas pressões (designadas por subpressões) fazem diminuir as tensões efetivas na descontinuidade e, conseqüentemente, reduzem a resistência atrítica de corte.

Na construção de barragens é necessário, em regra, a realização de intervenções no maciço rochoso de fundação [6], nomeadamente: i) melhoramento das características mecânicas (resistência e deformabilidade) numa faixa superficial, descomprimida pelas escavações, através da injeção de calda de cimento, que se designa por consolidação; ii) criação de uma barreira física do lado de montante, para minimizar a percolação de água na fundação, realizada através de injeções de calda de cimento, designada por cortina de impermeabilização; e iii) execução de furos de drenagem imediatamente a jusante da cortina de impermeabilização, para coletar água e aliviar as pressões no maciço para jusante. Dispõem-se de piezómetros hidráulicos a jusante dos sistemas de impermeabilização e drenagem, para avaliar a sua eficácia. As NPB, à semelhança do preconizado em outras normas internacionais [7, 8], recomenda que o sistema de drenagem permita reduzir até um terço, sob a linha de drenos, da diferença de potencial hidráulico de montante para jusante ($\alpha = 1/3$), acrescido da pressão a jusante (Figura 2).

Tem-se verificado, através da observação piezométrica continuada das barragens portuguesas, que os valores médios da pressão, imediatamente a jusante da linha de drenos, são muito variáveis na mesma obra e de obra para obra, mas são em geral inferiores ao referido valor-alvo. Contudo, existe um número reduzido de casos em que as pressões observadas, na generalidade da fundação ou apenas em zonas localizadas, são maiores que aquele valor.

Para modelar a incerteza relativa ao efeito das subpressões utilizaram-se os valores observados nas grandes barragens de betão portuguesas, do tipo gravidade, arco-gravidade e abóbada. O modelo da incerteza desta grandeza foi dividido em quatro variáveis aleatórias, que pretendem representar aspetos distintos que influenciam o valor das subpressões. O fator de quantificação das subpressões, neste modelo probabilístico, é dado pela expressão,

$$k_w(t, \Delta H) = k_{w0} \cdot e^{pt} + m \cdot \Delta H \quad (3)$$

onde o valor inicial do fator de quantificação das pressões na linha dos drenos, k_{w0} , corresponde ao nível da albufeira à cota do coroamento ($\Delta H=0$) no início da exploração da obra ($t=0$), que depende das características do maciço de fundação e das intervenções nele realizadas; a variável aleatória p caracteriza a evolução ao longo do tempo, dependendo das alterações nas descontinuidades do maciço de fundação e da eventual colmatação dos drenos; e a variável aleatória m representa a influência, admitida linear, que as variações do nível da albufeira relativamente à cota do coroamento, ΔH , produzem no referido fator.

A função descrita pela equação (3) foi aproximada aos registos de pressão dos piezómetros de 16 barragens. Devido à variação da qualidade da aproximação nos diferentes casos, admitiu-se que outros fatores poderão influenciar a eficiência do sistema de drenagem. Essa incerteza, difícil de quantificar, foi considerada através de uma quarta variável aleatória que representa o desvio-padrão dos registos em relação ao valor médio dado pela equação (3).

Os valores das variáveis aleatórias foram reunidos em dois grupos, um para maciços rochosos pouco fraturados e outro para maciços muito fraturados. Para cada variável aleatória foi aproximada uma função distribuição de probabilidade.

Na Figura 2 representa-se, simplificada, o diagrama genérico de subpressões na interface betão-rocha. O fator de quantificação das pressões k_w varia entre 0 e 1, sendo que no caso mais desfavorável o diagrama de subpressões será linear (correspondente à não existência de drenagem). Para ter em conta esse facto, considerou-se o parâmetro α para quantificar as subpressões.

O parâmetro α pode ser relacionado com k_w através da expressão,

$$k_w = \frac{\alpha}{\alpha_{m\acute{a}x}} \Leftrightarrow \alpha = k_w \cdot \alpha_{m\acute{a}x} \quad (4)$$

em que $\alpha_{m\acute{a}x}$ depende apenas da localização do sistema de drenagem,

$$\alpha_{m\acute{a}x} = 1 - \frac{a}{a+b} \quad (5)$$

Quando a base do perfil ($a+b$) é muito maior que a distância da linha de drenos ao paramento de montante (a), o valor máximo de α tende para um. Nas barragens gravidade $\alpha_{m\acute{a}x}$ varia entre cerca de 0,8 e 0,9.

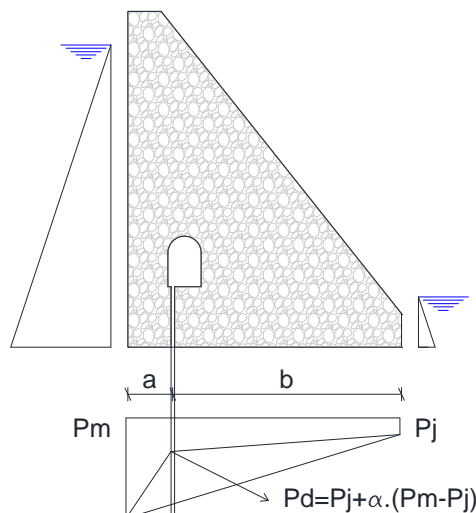


Figura 2. Diagramas simplificados de subpressões na interface betão-rocha, sem e com drenagem.

2.3 Resistência das descontinuidades

As NPB estipulam que, para cenários de rotura, apenas deve ser considerada a resistência tangencial última, atrítica, das superfícies de descontinuidade, sendo desprezado o contributo da coesão, devida à rugosidade das paredes, já que se admite que é ultrapassada ou destruída após se atingir a resistência de pico. Nestas condições, a resistência tangencial da descontinuidade pode ser representada pelo critério de Mohr-Coulomb [9, 10],

$$\tau_n = -\sigma_n' \cdot \tan \phi \quad (6)$$

em que τ_n é a tensão tangencial, σ_n' é a tensão normal efetiva e ϕ é o ângulo de atrito da superfície.

A incerteza das propriedades mecânicas dos maciços rochosos é, em regra, considerável. Em maciços rochosos de boa qualidade, competentes para servirem de fundação de barragens de betão, têm sido considerados, para o coeficiente de atrito, valores de cálculo unitários ($\phi = 45^\circ$). Considerando um coeficiente de variação de 15% para o coeficiente de atrito, que foi obtido num conjunto alargado de ensaios realizados no LNEC [9], admitindo que o coeficiente de atrito unitário corresponde a um valor característico com 95% de probabilidade de ser conseguido e considerando a recomendação do Eurocódigo 0 [3] relativa à utilização de uma distribuição log-normal para os parâmetros de resistência dos materiais e da estrutura, obtém-se a distribuição de probabilidades para o coeficiente de atrito com valor médio de 1,28 ($\phi = 52^\circ$) e desvio-padrão de 0,192 ($\phi = 10,87^\circ$).

3. ANÁLISE DA SEGURANÇA AO DESLIZAMENTO

3.1 Aspetos gerais

O fator de segurança ao deslizamento, segundo o critério de verificação para os cenários de rotura das NPB [2], é calculado de acordo com a expressão,

$$FS = \frac{(P - U - F_{SV}) \times \tan \phi / \gamma_{\phi} + I_j + I_p}{(I_w + F_{SH} + I_{WS})} \quad (7)$$

em que o coeficiente de atrito é afetado por um coeficiente parcial de segurança, γ_{ϕ} , de 1,2.

3.2 Análise probabilística da segurança

A equação de estado limite que representa a segurança da estrutura ao deslizamento, para os cenários de rotura, é dada por:

$$g = (P - U - F_{SV}) \times \tan \phi + I_j + I_p - (I_w + F_{SH} + I_{WS}) \quad (8)$$

Como referido, o coeficiente de atrito ($\tan \phi$) e o fator de quantificação das subpressões sob a linha de drenos (k_w) são as variáveis aleatórias consideradas na análise. Como há outras variáveis que apresentam significativa incerteza, como, por exemplo, os efeitos da ação sísmica, mas que foram consideradas como determinísticas, a análise probabilística realizada é uma análise condicionada à ocorrência de certos eventos improváveis.

Embora o Eurocódigo 8 [11] forneça informação suficiente relativa à caracterização da ação sísmica como variável aleatória, no presente trabalho foi considerada como uma variável determinística porque se pretendeu avaliar a influência da variabilidade das propriedades hidráulicas e resistentes do maciço de fundação na estabilidade estrutural dos perfis. A aceleração sísmica considerada correspondente a um período de retorno milenar [1, 2].

Considerando o teorema de Bayes, a probabilidade de falha estrutural é dada pelo produto,

$$p_f = p(G \leq 0 | S) \times p(S) \quad (9)$$

sendo $p(G \leq 0 | S)$ a probabilidade condicionada à ocorrência da ação sísmica e $p(S)$ a probabilidade anual de ocorrência do sismo, que é dada pelo inverso do período de retorno. Para um sismo de período de retorno de 1000 anos, considerado na verificação da segurança, a sua probabilidade de ocorrência anual é de 10^{-3} .

3.3 Método de Monte Carlo

Segundo uma abordagem probabilística, a probabilidade de falha p_f da estabilidade estrutural descrita pela equação (8) é dada pelo integral da função densidade de probabilidade conjunta das variáveis aleatórias na região de rotura,

$$p_f = \int_{g(x) \leq 0} f_X(x) \partial x \quad (10)$$

em que $f_X(x)$ representa a função densidade de probabilidade conjunta.

A solução da equação (10) só em casos muito simples pode ser obtida analiticamente, sendo na maioria dos casos solucionada numericamente.

Os métodos de simulação são recomendados nos casos em que a resolução de equação (10) se afigure particularmente difícil. São também preferencialmente utilizados quando existe disponibilidade computacional, por pertencerem ao grupo dos métodos totalmente probabilísticos [12, 13] ou de nível III, de acordo com a classificação do Eurocódigo 0 [3], e possibilitam a obtenção da probabilidade exata de falha, quando o número de amostras tende para infinito.

As técnicas de simulação têm origem nos princípios do método de Monte Carlo [14]. O processo do método de Monte Carlo consiste em reescrever a equação (10) recorrendo a um indicador I ,

$$p_f = \int_{g(x) \leq 0} f_X(x) \partial x = \int_X I \cdot f_X(x) \partial x \quad (11)$$

onde a função indicador toma o valor de um quando $g(x) \leq 0$ e zero quando $g(x) > 0$.

O método consiste na realização de um número suficiente de simulações da equação (8), gerando amostras das variáveis aleatórias, contabilizando o número de vezes em que a segurança não se verifica ($g(x) \leq 0$). A equação (11) pode ser reescrita sob a forma de um somatório,

$$p_f = \frac{\sum I}{N} \Leftrightarrow p_f = \frac{n_f}{N} \quad (12)$$




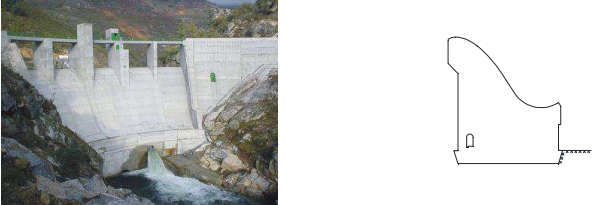
em que n_f é o número de falhas que se ocorreram nas N simulações testadas. Segundo Lemaire [15], para estimar uma probabilidade de falha de 10^{-n} , serão necessárias entre 10^{n+2} a 10^{n+3} simulações. Este método é computacionalmente exigente para estruturas com probabilidades de falha da ordem de 10^{-6} . Neste caso, em que se calcula a probabilidade de falha condicionada, foi necessário um número muito menor de simulações.

4. RESULTADOS OBTIDOS NOS QUATRO CASOS DE ESTUDO

Foram escolhidos, como casos de estudo, os perfis mais desfavoráveis das barragens de Pedrogão, Penha Garcia, Pretarouca e Rebordelo (Quadro 1), por diferirem entre si quer no tipo de maciço rochoso de fundação quer na zona sísmica. A equação (8) foi resolvida 25000 vezes para cada perfil, fazendo variar o coeficiente de atrito e o fator de quantificação das subpressões sob a linha de drenos de acordo com as respetivas funções distribuição de probabilidade.

Em cada barragem foi calculada a probabilidade de não verificação da segurança para a combinação que inclui a ação sísmica de grande intensidade.

Quadro 1. Vista de jusante e perfis de cálculo considerados nas barragens analisadas.

<p style="text-align: center;">Pedrogão</p> 	<p style="text-align: center;"> $A=846,52 \text{ m}^2$ $H_{NPA}=33,80 \text{ m}$ $a_s=1,644 \text{ m/s}^2$ $H_j =10,00 \text{ m}$ </p>
<p style="text-align: center;">Penha Garcia</p> 	<p style="text-align: center;"> $A=243,17 \text{ m}^2$ $H_{NPA}=25,00 \text{ m}$ $a_s=1,482 \text{ m/s}^2$ $H_j =4,00 \text{ m}$ </p>
<p style="text-align: center;">Pretarouca</p> 	<p style="text-align: center;"> $A=344,10 \text{ m}^2$ $H_{NPA}=25,50 \text{ m}$ $a_s=1,077 \text{ m/s}^2$ $H_j =5,20 \text{ m}$ </p>
<p style="text-align: center;">Rebordelo</p> 	<p style="text-align: center;"> $A=477,54 \text{ m}^2$ $H_{NPA}=29,00 \text{ m}$ $a_s=1,077 \text{ m/s}^2$ $H_j =6,00 \text{ m}$ </p>

Nas Figuras 3 a 6 apresentam-se, para as quatro barragens, os valores das amostras geradas para as duas variáveis aleatórias, bem como as regiões limitadas pela equação (8), separando os casos em que se verificou a falha estrutural (abaixo da linha vermelha) dos casos em que se verifica a segurança (acima da linha vermelha).

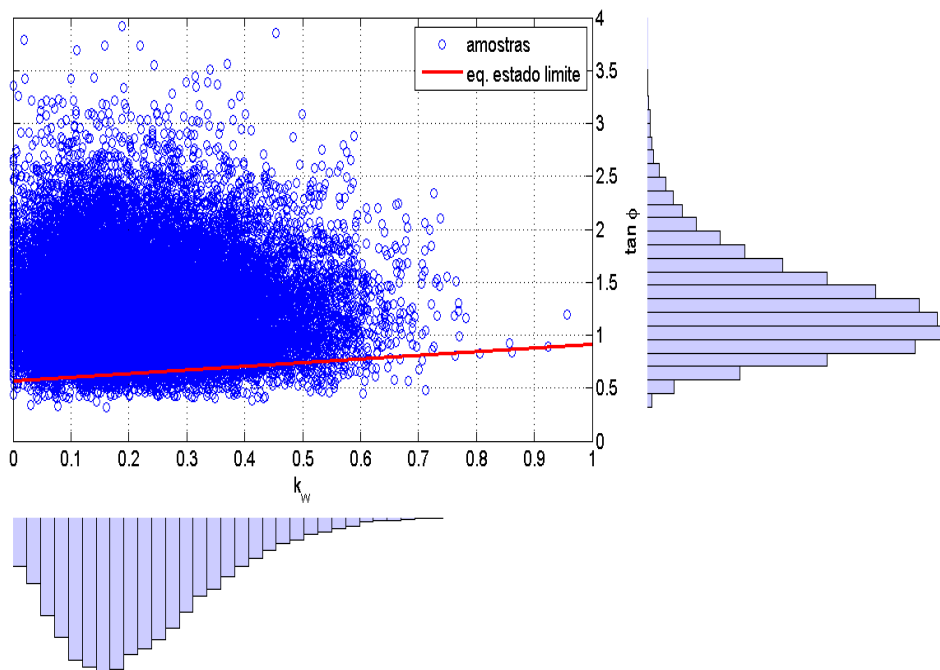


Figura 3. Geração de valores da subpressão e do coeficiente de atrito (método de Monte Carlo) e verificação do critério de segurança ao deslizamento pela superfície de fundação da barragem de Pedrógão.

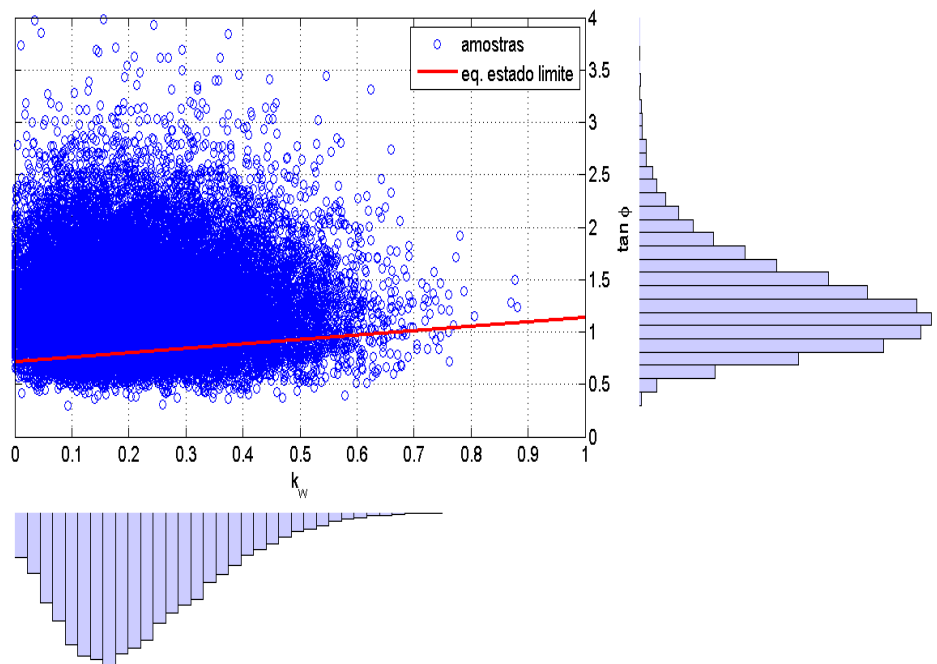


Figura 4. Geração de valores da subpressão e do coeficiente de atrito (método de Monte Carlo) e verificação do critério de segurança ao deslizamento pela superfície de fundação da barragem de Penha Garcia.

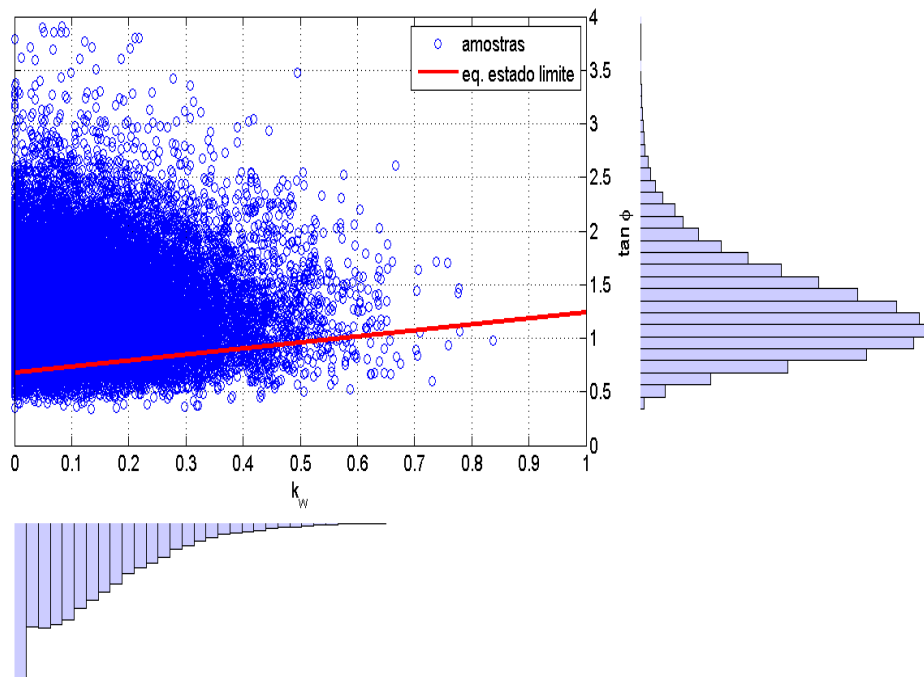


Figura 5. Geração de valores da subpressão e do coeficiente de atrito (método de Monte Carlo) e verificação do critério de segurança ao deslizamento pela superfície de fundação da barragem de Pretarouca.

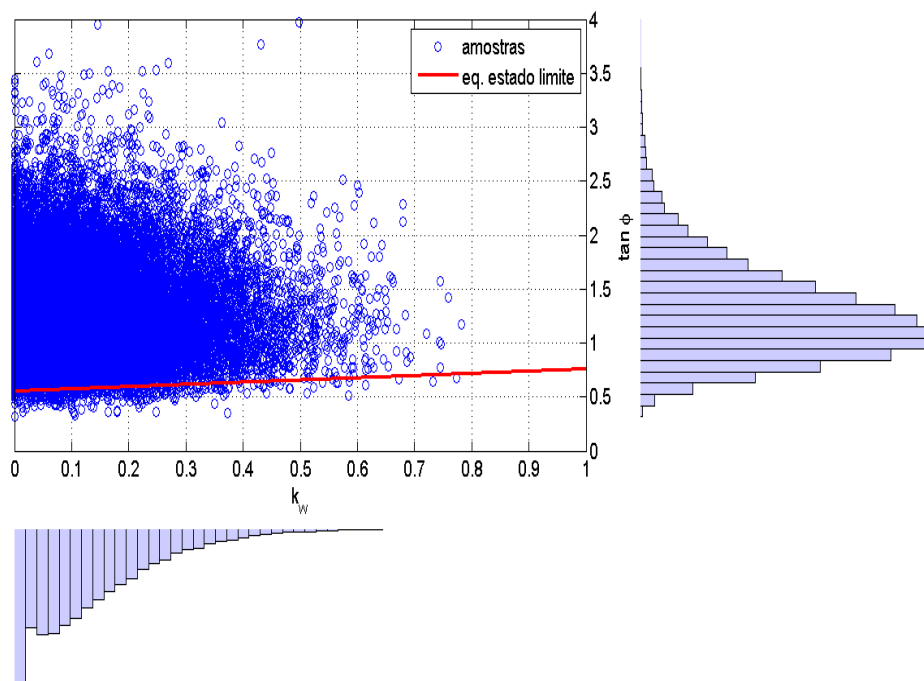


Figura 6. Geração de valores da subpressão e do coeficiente de atrito (método de Monte Carlo) e verificação do critério de segurança ao deslizamento pela superfície de fundação da barragem de Rebordelo.

No Quadro 2 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos, bem como o fator de segurança global calculado segundo as disposições das NPB [2].

Quadro 2. Identificação dos tipos de maciço, fator de segurança e probabilidade de falha das barragens estudadas.

Barragem	Maciço rochoso de fundação	Fator de segurança global (NPB)	$P_f (G \leq 0 SMP)$	P_f
Pedrógão	Granitos muito fraturados	1,31	1,9 %	$1,9 \times 10^{-5}$
Penha Garcia	Xistos	1,03	8,4%	$8,4 \times 10^{-5}$
Pretarouca	Granitos pouco fraturados	1,05	6,3%	$6,3 \times 10^{-5}$
Rebordelo	Granitos pouco fraturados	1,37	1,0%	$1,0 \times 10^{-5}$

Confirmou-se que as barragens com fatores globais de segurança menores apresentam maior probabilidade de se verificar a falha estrutural na ocorrência de um sismo de grande intensidade. Deve referir-se também que as barragens fundadas em maciços muito fraturados e com menor entrega na fundação têm maior probabilidade de falha.

A inclinação da reta correspondente à equação estado limite, representada nos gráficos das Figuras 3 a 6, mostra os efeitos que têm as opções geométricas de projeto na margem de segurança. A barragem de Pedrógão, construída com um perfil de dimensões generosas e muito encaixado na fundação, apesar de sujeita a um sismo de maior intensidade, tem um fator de segurança elevado ($FS=1,31$) e uma das menores probabilidades de falha calculadas.

5. CONCLUSÕES

As normas de projeto de barragens de muitos países, incluindo Portugal, consideram, para a verificação da segurança, de acordo com as indicações da International Commission on Large Dams (ICOLD), o método dos coeficientes globais. A regulamentação europeia de estruturas, que se baseia em abordagens probabilísticas da segurança, adota a metodologia dos coeficientes de segurança parciais.

Apresentaram-se os resultados relevantes do estudo da influência da incerteza relativa às propriedades hidráulicas e mecânicas dos maciços rochosos de fundação na verificação da segurança ao deslizamento de barragens gravidade de betão sujeitas às ações de projeto, incluindo sismos de grande intensidade, utilizando como casos de estudo as barragens de Pedrógão, Penha Garcia, Pretarouca e Rebordelo. Os dados geométricos, bem como as ações do peso próprio do betão, da pressão hidrostática da água e do sismo máximo de

projeto, foram considerados como variáveis determinísticas. O coeficiente de atrito e o fator de quantificação das subpressões no plano de drenagem foram considerados como variáveis aleatórias.

A quantificação do coeficiente de atrito das discontinuidades dos maciços rochosos apelou aos resultados de ensaios realizados no LNEC, ao passo que para as subpressões recorreu-se ao historial da observação piezométrica continuada de 16 barragens portuguesas.

O cálculo da probabilidade de falha foi realizada recorrendo ao método de Monte Carlo, tendo-se determinado a frequência de não verificação dos critérios de segurança para a ocorrência das ações sísmicas extremas e a probabilidade condicionada da rotura.

As barragens analisadas apresentam probabilidades anuais de falha de cerca de 10^{-5} para a ocorrência de um sismo de grande intensidade, definido a partir do Anexo Nacional do EC8 para um período de retorno de 1000 anos. Este valor afigura-se ser elevado, dada a importância que deve ser atribuída a este tipo de estruturas [3].

Deve referir-se, finalmente, a importância que assume na verificação da segurança a adequada caracterização das propriedades hidráulicas e mecânicas dos maciços rochosos de fundação, já que, estatisticamente, é pela fundação que ocorre uma percentagem significativa de incidentes e acidentes em barragens de betão.

REFERÊNCIAS

- [1] RSB, *Regulamento de segurança de barragens*. Lisboa, 2007.
- [2] NPB, *Normas de Projecto de Barragens*. Lisboa, 1993.
- [3] NP EN1990-1, *Eurocódigo 0: Bases para o projecto de estruturas*. CEN, 2009.
- [4] CFBR, *Comité Français des Barrages et Réservoirs: Recommendations pour la justification de la stabilité des barrages-poids*. Paris, France, 2012.
- [5] M. Westberg, *Reliability-based assessment of concrete dam stability*, PhD Thesis, Lund University, Lund, Sweden, 2010.
- [6] M.L.B. Farinha, *Hydromechanical behaviour of concrete dam foundations. In situ tests and numerical modelling*, PhD Thesis, IST, Lisboa, Portugal, 2010.
- [7] US Bureau of Reclamation. *Design of Gravity Dams*, Water Resource, 1976.
- [8] US Corps of Engineers. *Gravity dam design*. Department of the army, Washington, USA, 1995.
- [9] J.D. Muralha, *Abordagem probabilística do comportamento mecânico de maciços rochosos*, Tese de Doutoramento, IST, Lisboa, Portugal, 1993.

- [10] A.L. Batista, *Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóbada*, Tese de Doutoramento, IST, Lisboa, Portugal, 1998.
- [11] NP EN1998-1, *Projecto de estruturas para resistência a sismos*, Norma Portuguesa, 2010.
- [12] A.A.R. Henriques, *Aplicação de novos conceitos de segurança no dimensionamento do betão estrutural*. Tese de Doutoramento, FEUP, Porto, Portugal, 1998.
- [13] J.F. Borges e M. Castanheta, *Structural Safety*, VIII, 327 p., LNEC, 1985.
- [14] M.H. Faber, *Risk and safety in civil, surveying and environmental engineering*, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, Switzerland, 2005.
- [15] M. Lemaire, *Structural Safety*, Wiley, 2009.