

APLICAÇÃO DE UM MODELO HIDROMECHANICO NA AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE UMA BARRAGEM GRAVIDADE

APPLICATION OF A HYDROMECHANICAL MODEL IN THE SAFETY ASSESSMENT OF A GRAVITY DAM

Farinha, Maria Luísa Braga, *LNEC, Lisboa, Portugal, lbraga@lnec.pt*
Lemos, José Vieira de, *LNEC, Lisboa, Portugal, vlemos@lnec.pt*

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um modelo hidromecânico descontínuo da fundação de uma barragem gravidade, que foi desenvolvido com o objectivo de avaliar a segurança da obra para cenários de rotura envolvendo a fundação. Os cálculos são efectuados com o programa UDEC. Consideram-se os casos de modelo com interacção hidromecânica e de abertura constante das descontinuidades, e ainda a hipótese de o sistema de drenagem se encontrar obstruído. O método de redução das resistências é usado para estimar a estabilidade do sistema barragem/fundação para diferentes cenários de rotura, e os resultados são comparados com os obtidos com o método simplificado de equilíbrio limite. Salienta-se a importância da aplicação dos modelos descontínuos nos estudos de avaliação da segurança de barragens de betão.

ABSTRACT

This paper presents a discontinuous hydromechanical model of a gravity dam foundation, which was developed with a view to evaluating dam stability for scenarios of foundation failure. Analysis is carried out with the code UDEC. Results of the coupled hydromechanical model are compared with those obtained assuming either that the joint hydraulic aperture remains constant or that the drainage system is clogged. The method of strength reduction is used to estimate the stability of the dam/foundation system for different failure scenarios and the results are compared with those obtained using the simplified limit equilibrium approach. The relevance of using discontinuum models for the safety assessment of concrete dams is highlighted.

1. INTRODUÇÃO

Em barragens de betão os mecanismos de rotura envolvem usualmente descontinuidades do maciço rochoso, a superfície de contacto barragem/fundação ou camadas do maciço rochoso de menor resistência. A estabilidade de barragens gravidade é em regra avaliada com base em técnicas simplificadas de equilíbrio limite. Os modelos de meio contínuo equivalente da fundação podem ser utilizados nos estudos de cenários de rotura, recorrendo a elementos de interface para simular o comportamento das descontinuidades ou zonas ao longo das quais possa ocorrer deslizamento. Contudo, é possível melhorar a avaliação da segurança utilizando modelos descontínuos que simulem a interacção hidromecânica, que pode assumir importância fundamental nestas obras. Estes modelos têm em conta não só os deslizamentos e aberturas das descontinuidades mas também as pressões da água instaladas na fundação.

O estudo que se apresenta tem em conta as características da barragem de Pedrógão (Figura 1), a primeira barragem de betão compactado com cilindros (BCC) construída em Portugal, situada no rio Guadiana e integrada num grande empreendimento de fins múltiplos, destinado à rega, à

produção de energia e ao abastecimento de água (HIDRORUMO, 2001). A barragem tem uma altura máxima acima das fundações de 43 m. Em planta a barragem desenvolve-se segundo um eixo rectilíneo, com um comprimento total de 448 m, correspondendo 125 m a um troço de betão convencional e 323 m a um troço de BCC. A barragem dispõe de um descarregador de superfície não controlado, com um comprimento de 301 m e com a crista à cota 84,8 m, que corresponde ao nível de pleno armazenamento (NPA). O nível máximo de exploração (NME) é 91,8 m. O maciço de fundação da barragem é granito de razoável a boa qualidade, com excepção dos locais próximos de duas falhas existentes no leito menor do rio e na margem direita, onde o maciço apresenta fraca qualidade geomecânica em profundidade. A construção da barragem iniciou-se em Abril de 2004 e terminou em Fevereiro de 2006. A água da albufeira atingiu pela primeira vez o NPA em Abril de 2006.

Para analisar o escoamento na fundação de alguns blocos da barragem e interpretar os caudais observados foi desenvolvido, em 2006, um modelo bidimensional contínuo que tinha em conta a localização das principais descontinuidades condutoras de água, identificada com ensaios efectuados *in situ* (Farinha et al. 2006). Este modelo permitiu calibrar os parâmetros do modelo hidromecânico descontínuo da fundação da barragem de Pedrógão, que se apresenta neste trabalho. Os resultados do modelo hidromecânico são comparados com os obtidos com um modelo hidráulico simples, em que a abertura das descontinuidades permanece constante. O método de redução das resistências é usado para estimar a estabilidade do sistema barragem/fundação para diferentes cenários de rotura envolvendo a fundação, e os resultados são comparados com os obtidos com o método de equilíbrio limite. Os cálculos são efectuados com o programa UDEC (Itasca, 2004), que representa o domínio por um conjunto de blocos e as descontinuidades como condições de fronteira entre blocos.

2. MODELO HIDROMECAÂNICO

2.1. Análise do escoamento com o programa UDEC

O programa UDEC permite que a interacção entre o comportamento hidráulico e mecânico seja estudado de uma forma acoplada. As aberturas das descontinuidades e as pressões da água são actualizadas em cada passo de cálculo, como descrito em Lemos (1987) e em Lemos (2008). Admite-se que os blocos são impermeáveis e que o escoamento se processa apenas por um sistema de descontinuidades que se encontram interligadas. As descontinuidades estão divididas num conjunto de domínios, separados por pontos de contacto. A pressão da água em cada domínio é uniforme, e o escoamento é governado pela diferença de potencial entre domínios adjacentes. Obtém-se tensões totais no interior dos blocos e tensões efectivas nos contactos.

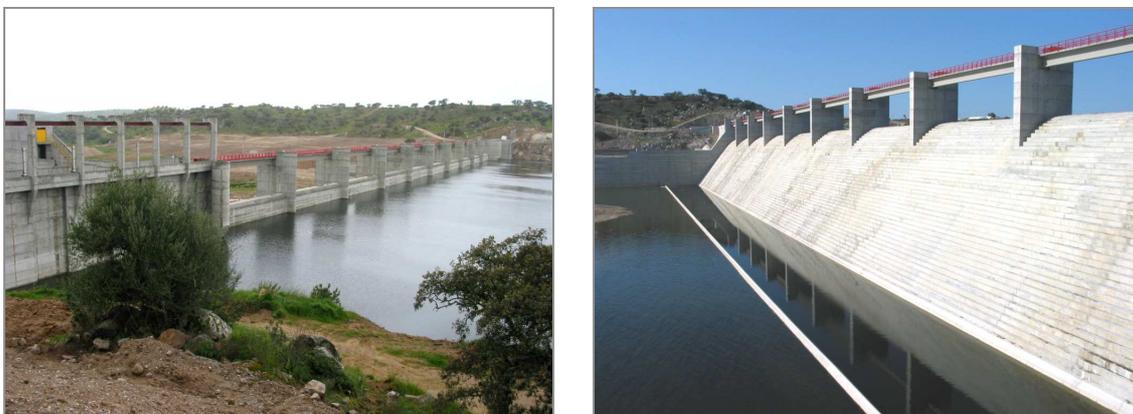


Figura 1 – Barragem de Pedrógão. Vista de montante e de jusante, a partir do lado esquerdo do descarregador de cheias não controlado.

O escoamento é representado com o modelo de placas planas paralelas, e assim o caudal por unidade de espessura do modelo é determinado pela lei cúbica do escoamento. O caudal nos contactos é dado por:

$$q = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{l} \quad [1]$$

em que k_j = factor de permeabilidade, cujo valor teórico é $1/(12 \mu)$ sendo μ a viscosidade dinâmica da água; a = abertura hidráulica nos contactos; l = comprimento associado ao contacto entre os domínios. A abertura hidráulica a usar na equação anterior é dada por:

$$a = a_0 + \Delta a \quad [2]$$

onde a_0 = abertura para uma tensão normal nominal nula e Δa = valor da abertura ou fecho da descontinuidade, que se considera positivo na abertura. Admite-se um valor máximo da abertura, a_{max} , e um valor mínimo, a_{res} , abaixo do qual o fecho mecânico não afecta a permeabilidade do contacto.

2.2. Descrição do modelo

O modelo descontínuo desenvolvido é apresentado na Figura 2. Simplificadamente, foram apenas representadas duas das sete famílias de descontinuidades identificadas durante as escavações no local da obra: a primeira é horizontal e admitida como contínua, com um espaçamento de 5,0 m, e a segunda é formada por troços verticais, com um espaçamento médio de 5,0 m e desvio padrão de 2,0 m. Foi ainda incluída no modelo uma descontinuidade no maciço a jusante da barragem, com uma inclinação para montante de 25° , necessária para efectuar os estudos de segurança em relação à rotura por deslizamento. O modelo da fundação tem 200 m de largura e 80 m de profundidade. A base da barragem mede 44,4 m na direcção montante-jusante. As juntas de construção no corpo da barragem foram simuladas por uma família de descontinuidades com um espaçamento de 2,0 m. O modelo tem 611 blocos deformáveis e está dividido em 2766 elementos triangulares, com um total de 3451 nós.

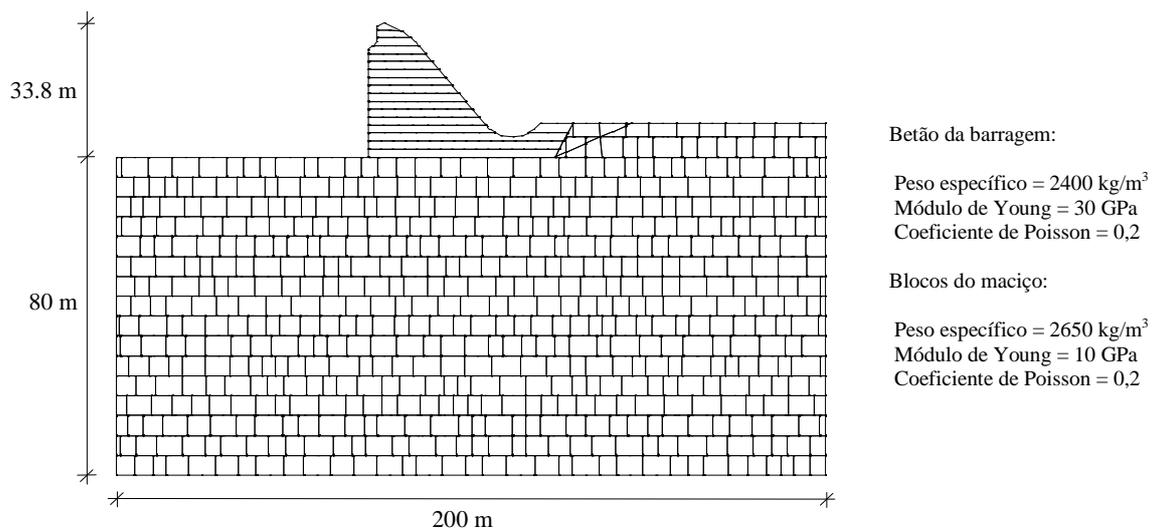


Figura 2 – Modelo descontínuo da fundação da barragem e propriedades dos materiais

O betão da barragem e os blocos do maciço têm um comportamento elástico linear, com as propriedades indicadas na Figura 2. O comportamento das discontinuidades é descrito pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Nas juntas de construção da barragem, nas discontinuidades do maciço e na ligação barragem/fundação considera-se a rigidez normal (k_n) igual a 10 GPa/m, a rigidez tangencial (k_s) igual a 5 GPa/m e um ângulo de atrito (φ) de 35°. Nas juntas de construção e na ligação barragem/fundação admite-se que a coesão e a resistência à tracção assumem o valor de 2 MPa. Nas discontinuidades do maciço admite-se que a coesão e a resistência à tracção são nulas.

2.3. Sequência de cálculo

A análise foi efectuada em duas fases. Primeiro determinou-se o efeito mecânico do peso da barragem e da zona superficial do maciço, a jusante da bacia de dissipação, admitindo que a superfície freática se encontrava à cota do terreno a montante da barragem e que a relação entre tensões efectivas horizontais e verticais *in situ* era igual a 0,5. De seguida aplicou-se a pressão hidrostática no paramento de montante, na base da albufeira e na superfície do maciço a jusante da obra. Nesta segunda fase, foi primeiro efectuada um cálculo mecânico e, de seguida, um cálculo hidromecânico. Em ambas as fases foram impedidos os deslocamentos verticais da base do modelo e os deslocamentos horizontais das fronteiras laterais. Relativamente às condições de fronteira hidráulicas, admitiu-se uma permeabilidade nula na base e fronteiras laterais do modelo. Simulou-se o sistema de drenagem impondo um potencial ao longo dos drenos igual a 1/3 da soma do potencial a montante e a jusante da obra. A figura 3 mostra um pormenor da deformação da barragem e fundação para o peso próprio e o incremento de deformação devido à pressão hidrostática. Nesta figura, a deformação é ampliada 3000 vezes.

2.4. Parâmetros hidráulicos

As propriedades hidráulicas do modelo ($a_0 = 0,17$ mm e $a_{res} = 0,05$ mm), que correspondem a uma permeabilidade do meio de $5,0 \times 10^{-7}$ m/s, foram ajustadas a partir do modelo bidimensional contínuo previamente desenvolvido, que tinha sido calibrado a partir dos caudais observados (Farinha et al. 2006). Admitiu-se que a cortina de impermeabilização era dez vezes menos permeável que o maciço. Nos ensaios *in situ* verificou-se que as entradas de água nos drenos ocorriam predominantemente entre os 3 e 8 m abaixo da ligação betão/maciço. Para representar esta zona onde se concentra o escoamento, admitiu-se que a discontinuidade horizontal localizada 5,0 m abaixo da superfície de contacto barragem/fundação era 8 vezes mais permeável que as restantes, sob a barragem e atravessando a cortina de impermeabilização.

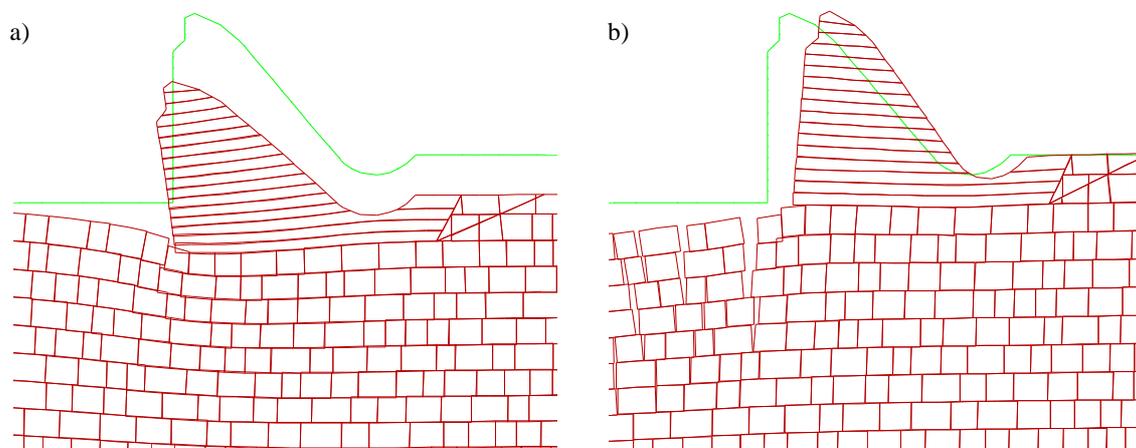


Figura 3 – Deformação dos blocos (ampliada 3000 vezes) devido a: a) peso da barragem e peso da zona superficial do maciço a jusante da barragem ; b) pressão hidrostática e escoamento.

3. ANÁLISE DE PRESSÕES E CAUDAIS CALCULADOS

As pressões da água na fundação e os caudais determinados, com a albufera no NPA, admitindo uma abertura constante das descontinuidades ou a interacção hidromecânica são apresentados nas Figuras 4 e 5. Nestas figuras, a espessura dos traços é proporcional à pressão e ao caudal nas descontinuidades, respectivamente.

Quando é tida em conta a interacção entre o comportamento hidráulico e mecânico, as pressões da água são mais elevadas na zona da fundação a montante da barragem e mais reduzidas na zona de jusante, e a pressão máxima é cerca de 10 % superior (Figura 4 a) e b)). Sem drenagem, as pressões aumentam na zona por baixo da barragem (Figura 4 c)). A Figura 5 mostra que a maior parte do caudal está concentrado nas duas primeiras descontinuidades verticais a montante do pé de montante da barragem, e que esta água afluí à rede de drenagem, ou em direcção à zona a jusante da obra na fundação sem sistema de drenagem, pela descontinuidade de permeabilidade mais elevada que atravessa a cortina de impermeabilização, e que simula as principais descontinuidades condutoras de água. O caudal máximo é ligeiramente superior quando se considera a interacção hidromecânica (aumenta de cerca de 1,21 para 1,25 (l/min)/m).

4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

4.1 Método de redução das resistências

O modelo desenvolvido foi utilizado para estudar a segurança do sistema barragem/fundação em relação à rotura por deslizamento, para os quatro cenários representados na Figura 6. Os cenários a) e d) envolvem apenas a interface de ligação barragem/fundação. O deslizamento ao longo desta interface é o modo de rotura mais provável em maciços de fundação de barragens que contêm descontinuidades afastadas e em que nenhuma das quais se encontra desfavoravelmente orientada. A barragem de Pedrógão está encaixada na fundação, e assim a sua resistência ao deslizamento é elevada. No cenário d) é desprezado o efeito estabilizador da zona do maciço a jusante da bacia de dissipação, de modo a ter em conta uma possível escavação a jusante. O cenário b) envolve não só a interface de ligação barragem/fundação, mas também a junta do maciço inclinada 25° para montante, que foi propositadamente incluída no modelo para as análises de estabilidade. Esta situação hipotética pretende simular um modo de rotura que envolve simultaneamente a superfície de contacto barragem/fundação e a matriz rochosa, que pode ocorrer em maciços de fraca qualidade estratificados horizontalmente ou sub-horizontalmente (USACE, 1994). No cenário c) é impedido o deslizamento ao longo da descontinuidade inclinada do maciço, admitindo-se que esta tem comportamento elástico.

A análise de estabilidade foi efectuada com o método de redução das resistências, tipicamente utilizado no projecto de fundações. Admitiu-se um ângulo de atrito inicial de 35° nas descontinuidades do maciço, na superfície de ligação betão/maciço e nas juntas horizontais da barragem, e coesão e tensão de tracção nulas na interface barragem/fundação, envolvida nos modos de rotura. Os cálculos foram efectuados até uma situação de equilíbrio, após o que se interrompeu o cálculo hidráulico e, a partir deste passo, as pressões mantiveram-se constantes. Para cada um dos cenários, o ângulo de atrito (ϕ) das descontinuidades assinaladas na figura 6 foi gradualmente reduzido até à rotura do modelo (o coeficiente de redução foi aplicado à $\tan \phi$). O indicador de rotura foi o deslocamento horizontal do coroamento. A análise foi efectuada admitindo que a albufera se encontrava no NPA ou no NME e que o sistema de drenagem se encontrava operacional ou obstruído. Na Figura 7 e no Quadro 1 apresentam-se os resultados da análise efectuada. Nos gráficos da Figura 7 os ângulos de atrito são apresentados por ordem decrescente, de modo a facilitar a análise.

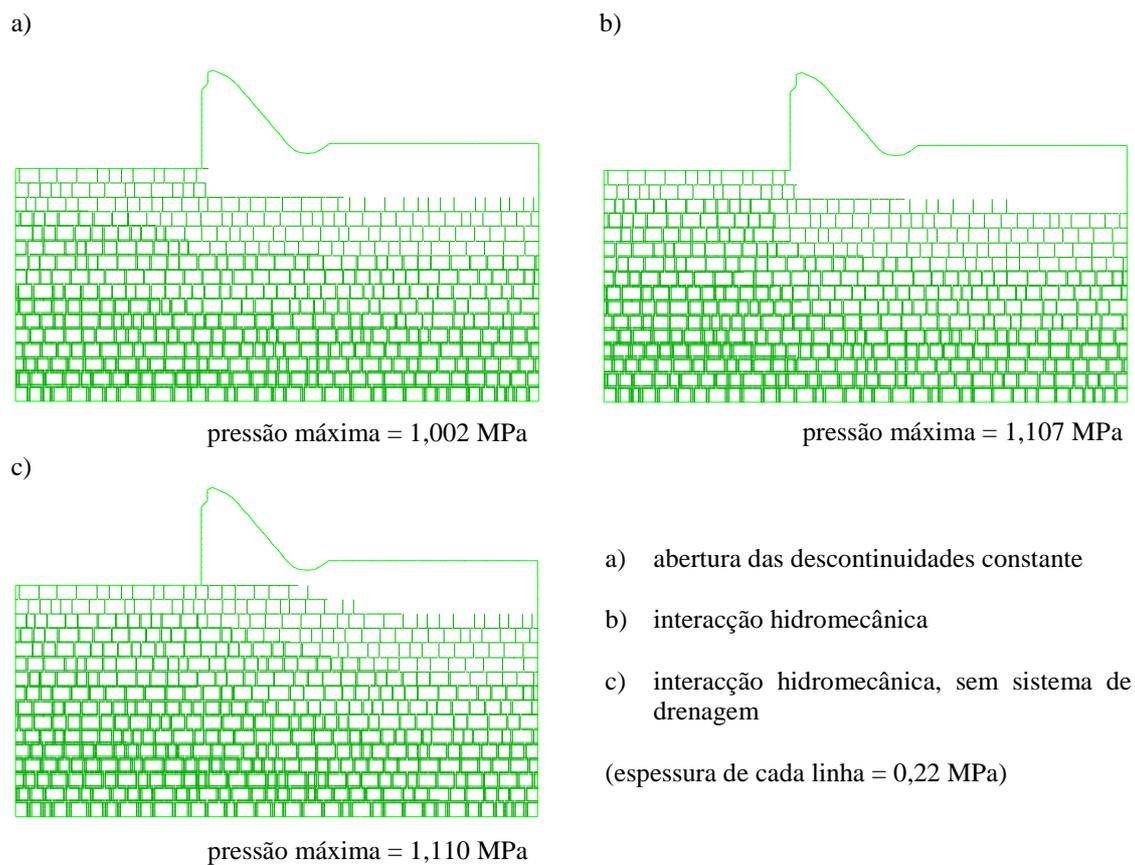


Figura 4 – Pressões da água na fundação com a albufeira cheia (a pressão é proporcional à espessura das linhas).

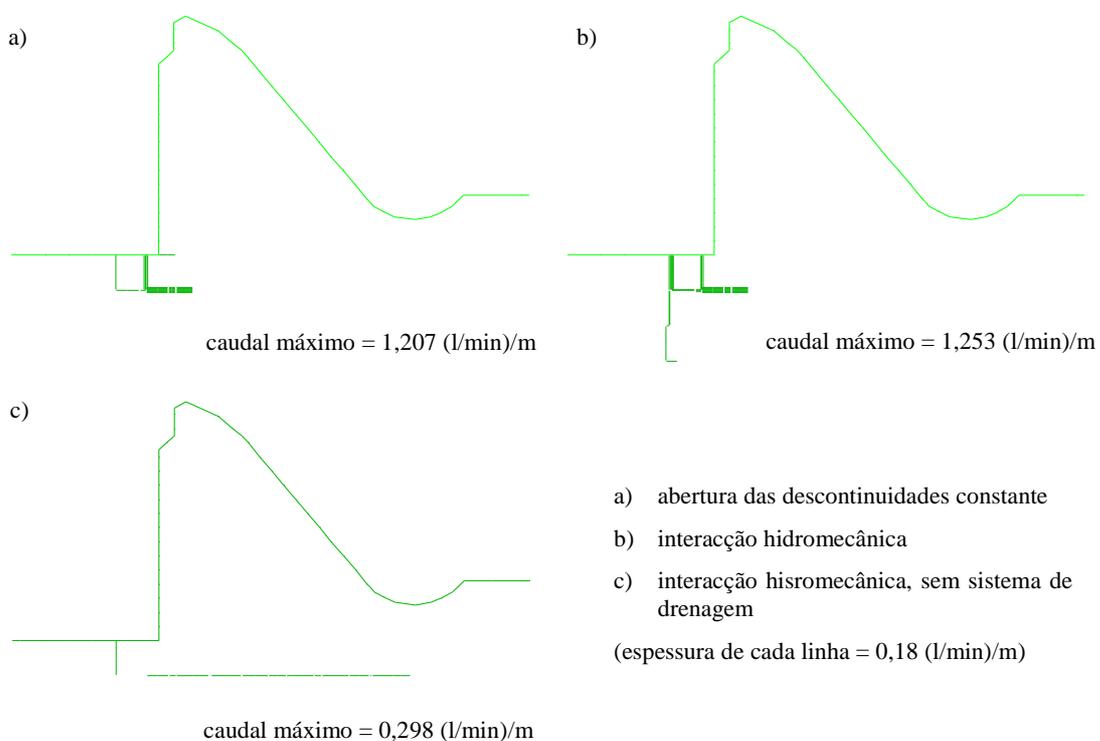


Figura 5 – Caudais com a albufeira cheia (os caudais são proporcionais à espessura das linhas; caudais inferiores a 0,18 (l/min)/m não são representados)

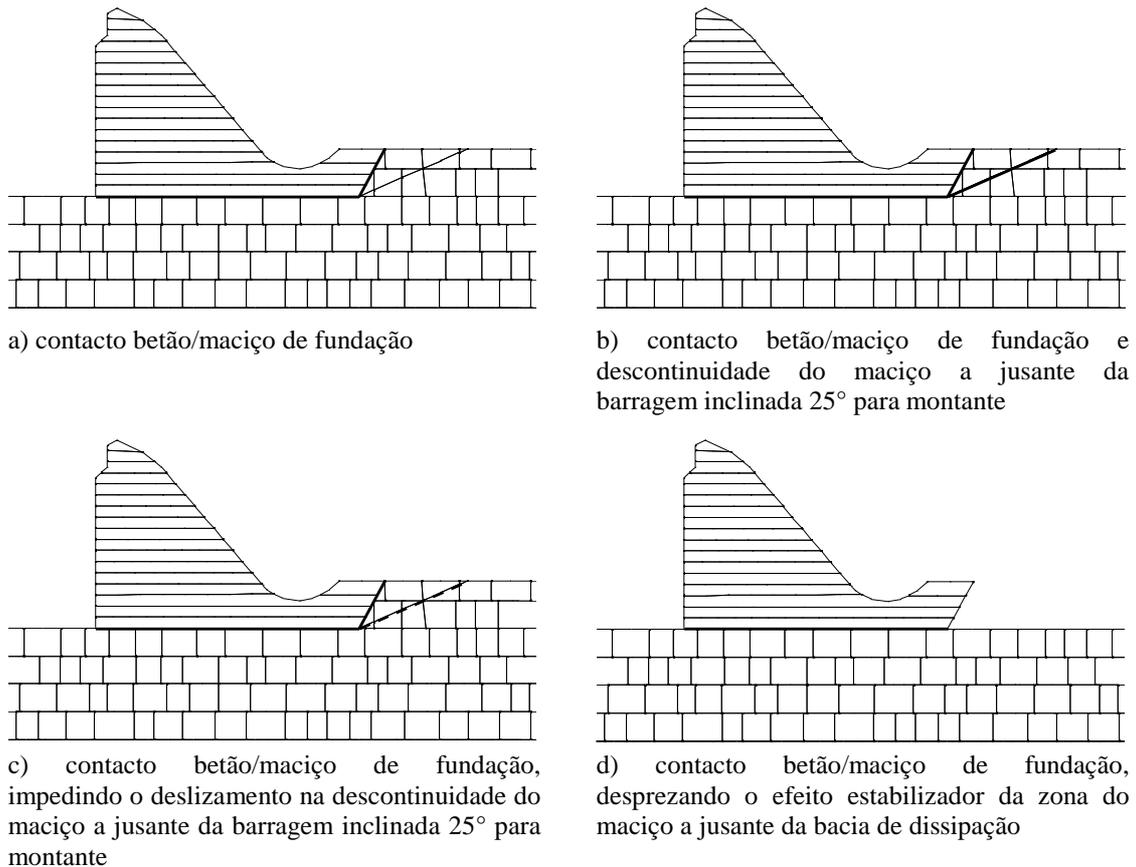


Figura 6 – Modos de rotura analisados.

Nos quatro modos de rotura analisados, o sistema barragem/fundação é instável quando a albufeira se encontra no NME e o sistema de drenagem se encontra inoperacional, e assim estas situações não se encontram representadas na figura 7. Para o mesmo nível da albufeira, em ambos os cenários a) e c) o sistema mantém-se estável quando o sistema de drenagem se encontra operacional, enquanto que no cenário b), como indicado na Figura 7, a rotura ocorre para um ângulo de atrito de cerca de 27,5° (Factor de segurança $F = 1,4$). No cenário d) a barragem é instável para ângulos de atrito inferiores a 34,5°, quando a albufeira se encontra no NME ($F = 1,01$).

4.2 Comparação dos resultados obtidos com os métodos de redução das resistências e de equilíbrio limite

No Quadro 1 são comparados os resultados dos estudos de segurança efectuados com o UDEC com os obtidos usando o método de equilíbrio limite, para os cenários b) e d). Nas análises em que se tem em conta o efeito estabilizador do maciço a jusante da bacia de dissipação considerou-se o impulso passivo com o seu valor total, situação pouco provável, uma vez que só poderá ocorrer para grandes deslocamentos da estrutura, ou o desenvolvimento de apenas 1/3 do impulso passivo, o que é mais realista. Da análise efectuada concluiu-se que a barragem é estável com a albufeira no NPA, mesmo se o sistema de drenagem estiver inoperacional. Com a albufeira no NME, o factor de segurança é inferior a 1 quando: i) o sistema de drenagem não está operacional e se despreza o efeito estabilizador da zona do maciço a jusante da bacia de dissipação ($F = 0,69$); e ii) o sistema de drenagem não está operacional e se considera apenas 1/3 do impulso passivo a jusante da barragem ($F = 0,82$).

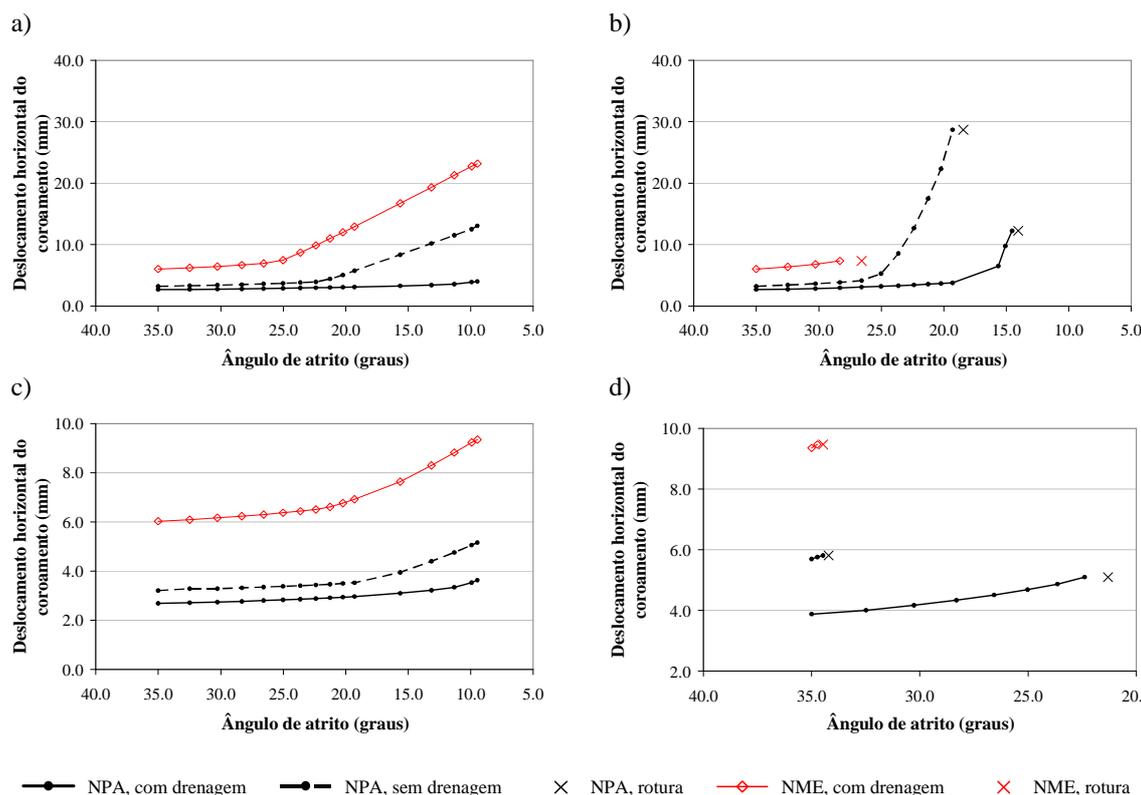


Figura 7 – Variação do deslocamento horizontal do coroamento com a redução do ângulo de atrito nas discontinuidades assinaladas, para os modos de rotura apresentados na Figura 6.

O modo de rotura representado no cenário d) é o único que permite verificar os resultados do programa UDEC, uma vez que, para as mesmas cargas, se devem obter os mesmos resultados com o modelo hidromecânico e com o método de equilíbrio limite. De facto, com a albufeira no NPA e o sistema de drenagem operacional, obtêm-se praticamente os mesmos ângulos de atrito ($21,2^\circ$ na análise de equilíbrio limite e entre $21,3^\circ$ e $22,4^\circ$ na análise com o UDEC). Ainda com o sistema de drenagem operacional, mas com a albufeira no NME, a diferença é de cerca de 2° ($32,4^\circ$ na análise de equilíbrio limite e entre $34,5^\circ$ e $34,7^\circ$ na análise com o UDEC). Contudo, quando o sistema de drenagem não está operacional, os ângulos de atrito obtidos com o UDEC ($34,2^\circ - 34,5^\circ$) são mais elevados do que o obtido com o método de equilíbrio limite ($27,8^\circ$). Esta diferença é explicada pelo valor mais elevado das pressões da água na base da barragem calculadas com o modelo hidromecânico, quando comparadas com as pressões consideradas quando se admite uma variação linear de pressões entre a albufeira e a zona a jusante da obra (Figura 8). Para se obter, numa análise de equilíbrio limite, o mesmo ângulo de atrito na rotura que se obtém com o modelo desenvolvido (admitindo igual a $34,3^\circ$) seria necessário considerar uma resultante das subpressões 24 % superior à resultante que se obtém admitindo uma variação linear das pressões.

Nas análises em que se tem em conta o efeito estabilizador do maciço a jusante da bacia de dissipação, os resultados do modelo encontram-se dentro do intervalo de valores obtidos com o método de equilíbrio limite, quando se considera apenas parte ou a totalidade do impulso passivo, mas estão mais próximos dos obtidos quando se considera 1/3 do impulso passivo.

Quadro 1 – Comparação dos ângulos de atrito na rotura calculados com o modelo hidromecânico e com o método de equilíbrio limite

H _{mon.} (m)	H _{jus.} (m)	Sistema de drenagem	Leito do rio a jusante da barragem *	Ângulo de atrito		
				Equilíbrio limite **	UDEC	
					rotura	último estável
84.8 (NPA)	60.0	não operacional	1)	27,8°	34,2°	34,5°
			2)	11,1° - 22,6°	18,4°	19,3°
		operacional	1)	21,2°	21,3°	22,4°
			2)	8,2° - 17,1°	14,0°	14,5°
91.8 (NME)	67.8	não operacional	1)	45,6°		instável
			2)	27,8° - 40,6°		instável
		operacional	1)	32,4°	34,5°	34,7°
			2)	18,2° - 28,1°	26,6°	28,3°

* A jusante da barragem o leito do rio está: 1) à cota da ligação barragem/fundação (51,0 m) – cenário d) 2) à cota real (59,5 m) – cenário b)

** Nas análises para o cenário b), apresentam-se resultados calculados com o valor total do impulso passivo ou apenas 1/3 do seu valor

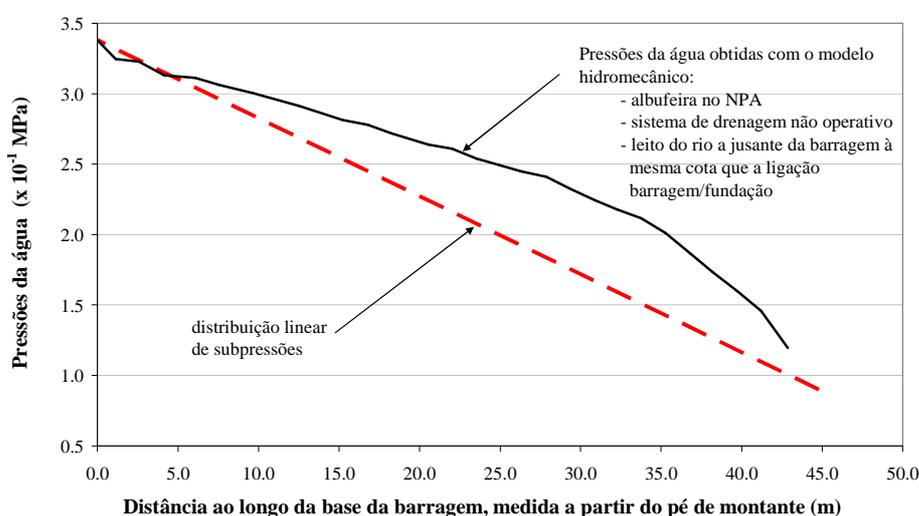


Figura 8 – Comparação dos valores da distribuição linear de pressões ao longo da base da barragem com as pressões da água obtidas com o modelo hidromecânico.

5 CONCLUSÕES

O comportamento hidromecânico da fundação da barragem de Pedrógão foi estudado utilizando um modelo plano descontínuo bastante idealizado e recorrendo ao programa UDEC. Na análise de estabilidade foram analisados diversos modos de rotura e foram considerados diferentes valores de subpressão na base da barragem. Alguns destes cenários são situações hipotéticas muito desfavoráveis, uma vez que a obra tem um elevado nível de segurança. Os resultados permitiram quantificar a influência da pressão da água na segurança da barragem e revelaram a importância de usar valores de pressão observados *in situ* na análise de estabilidade de barragens em serviço, como recomendado pelo European Club of ICOLD (2004).

Os modelos descontínuos são em muitos casos difíceis de aplicar, devido à escassez de informação sobre a orientação, espaçamento e propriedades hidromecânicas das discontinuidades, nomeadamente, a rigidez normal, a abertura e a abertura residual. No entanto, os modelos descontínuos que simulam o comportamento hidromecânico são muito úteis nos estudos de segurança em relação à rotura, e a incerteza associada ao valor de cada um dos

parâmetros pode ser ultrapassada admitindo que cada parâmetro pode variar dentro de um aceitável intervalo de valores.

Apesar da compartimentação do maciço ter um carácter tridimensional, as análises bidimensionais do escoamento, como a efectuada com o UDEC, são adequadas em muitas situações, dado que em fundações de barragens o escoamento se processa essencialmente na direcção montante-jusante. No caso de barragens abóbada é necessário uma análise com modelos tridimensionais, mas, neste caso, um modelo hidromecânico do escoamento na fundação implicaria a representação de conjuntos de descontinuidades de diversas famílias, o que seria computacionalmente proibitivo. A alternativa é incluir em modelos mecânicos tridimensionais, em que se representam apenas as descontinuidades envolvidas em possíveis mecanismos de rotura, as pressões da água calculadas com modelos desenvolvidos com base no conceito de meio contínuo equivalente.

Na avaliação da segurança, a principal vantagem de usar o programa UDEC, em vez do método simplificado de equilíbrio limite, é que este permite a análise de uma maior variedade de modos de rotura. Para além disso, o UDEC não só permite o cálculo de deslocamentos em análises sísmicas como também é particularmente útil no caso de fundações em que ocorram materiais com diferentes características mecânicas e hidráulicas, e nos casos em que o valor máximo do deslocamento, necessário para assegurar o funcionamento adequado e a segurança, prevalece em relação ao valor do factor de segurança. Em 3D, os métodos de equilíbrio limite admitem grandes simplificações na determinação das forças que actuam nos volumes do maciço que se podem tornar cinematicamente instáveis (Londe, 1973), pelo que os modelos descontínuos assumem neste caso um papel particularmente importante nos estudos de segurança em relação à rotura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EDIA, Empresa de Desenvolvimento e Infra-Estruturas do Alqueva, SA a autorização concedida para a publicação de elementos referentes à barragem de Pedrógão.

REFERÊNCIAS

- Farinha, M.L.B., Lemos, J.V. e Castro, A.T. (2006). Analysis of seepage in the foundation of Pedrógão dam. *Proceedings of 5th International Conference on Dam Engineering*, Lisboa, Portugal, pp. 195–202.
- HIDRORUMO (2001). *Aproveitamento hidroeléctrico do empreendimento de fins múltiplos do Alqueva. Escalão de Pedrógão*. Projecto. Porto.
- Itasca (2004). *UDEC – Universal Distinct Element Code*, Versão 4.0. Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- Lemos, J.V. (1987). *A distinct element model for dynamic analysis of jointed rock with application to dam foundations and fault motion*. Tese de doutoramento. Universidade de Minnesota, Minneapolis.
- Lemos, J.V. (2008). Block modeling of rock masses. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **12**(7-8/2008), pp. 915-949.
- Londe, P. (1973). Analysis of the stability of rock slopes. *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, **6**(1), pp. 93-124.
- European Club of ICOLD (2004). *Sliding safety of existing gravity dams – Final Report*. Relatório do European Working Group.
- USACE (1994). *Rock foundations*. Engineer Manual 1110-1-2908. United States Army Corps of Engineers. Washington, DC.