

# **AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE FISSURAS NA SUPERFÍCIE DE FUNDAÇÃO DE BARRAGENS GRAVIDADE**

## **ASSESSMENT OF CRACK PROPAGATION ON GRAVITY DAM FOUNDATION**

Bretas, Eduardo M., Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, ebretas@lnec.pt

Lemos, José V., LNEC, Lisboa, Portugal, vlemos@lnec.pt

Lourenço, Paulo B., Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, pbl@civil.uminho.pt

### **RESUMO**

Neste trabalho apresenta-se um processo iterativo de cálculo, com base na análise limite, para determinação do comprimento de fissuras nos planos horizontais de barragens gravidade sujeitos a esforços de tracção e, em consequência, alteração das condições de aplicação da subpressão. Esta ferramenta baseia-se num modelo de dados proveniente de uma aplicação mais vasta que, a partir da geometria da barragem, características do material, nível da água a jusante e montante, condições de drenagem e solicitação sísmica, permite a determinação das condições de estabilidade da estrutura. Faz-se a análise dos dois acidentes ocorridos na barragem de Bouzey, um por deslizamento pela base e o outro por derrubamento parcial da secção, em que a ocorrência de fissuração e o efeito da subpressão tiveram papel determinante.

### **ABSTRACT**

This paper presents an iterative process of calculation, based on limit analysis, to determine the length of cracks in horizontal planes of gravity dams subjected to tension and, consequently, changes in the uplift resultant. This tool is based on a data model from a wider application that, from the dam geometry, material properties, downstream and upstream water level, drainage effectiveness and seismic load, allows the determination of the structure stability conditions. The analysis of the two accidents with the Bouzey dam is also made. One accident occurred by sliding through the base and the other by partial overturning of the cross section, where the occurrence of cracking and the effect of uplift played a key role.

### **1. INTRODUÇÃO**

A ocorrência de fissuras em barragens gravidade pode por em causa a sua estabilidade, não só por alterar a sua capacidade resistente, pois a descontinuidade imposta pela existência de uma fissura afecta a transmissão de forças, mas também nas solicitações, pois ao longo da fissura, devido a presença de água proveniente da albufeira, instala-se um acréscimo de subpressão, com reflexo na propagação da própria fissura.

Devido à natureza dos materiais que constituem a barragem, betão ou alvenaria, bem como o material rochoso da fundação, ambos com reduzida resistência à tracção, é natural que se verifique a formação de fissuras, cuja localização, orientação, abertura, extensão e trajectória dependem de vários factores, nomeadamente da intensidade das solicitações, das características mecânicas dos materiais e, fundamentalmente, da pré-existência de descontinuidades. Estas descontinuidades podem ser, por exemplo, juntas de betonagem, no caso das barragens de betão, juntas argamassadas entre blocos, no caso das barragens de alvenaria, e as existentes na fundação, decorrentes da sua história mecânica, térmica e química.

No caso das barragens gravidade, as fissuras podem ocorrer em várias zonas, consoante a sua origem. Os casos mais típicos estão representados na Figura 1. O desenvolvimento horizontal ou curvilíneo, ao longo do corpo da barragem, na zona de contacto ou na fundação, depende para além dos factores já indicados, das propriedades relativas dos diferentes materiais.

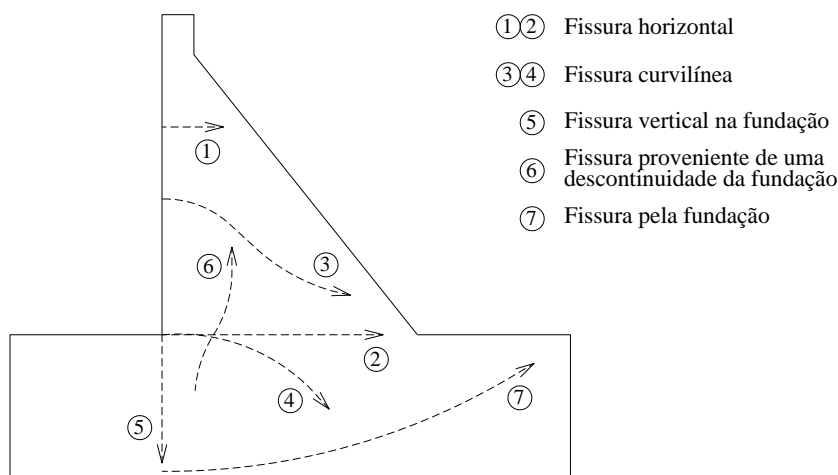


Figura 1 – Localização de fissuras em barragens gravidade (adaptado de Léger, 2005)

Tradicionalmente a avaliação da segurança de barragens gravidade abrange os cenários de (i) derrubamento, (ii) rotura da fundação por excesso de compressão e (iii) deslizamento pela base. Não sendo possível dissociá-los de forma objectiva, é o terceiro cenário, deslizamento pela base, aquele que maior influência tem no projecto e na segurança da obra durante o seu período de exploração.

Assim sendo, deve ser estudado com especial interesse o caso de fissuras que se desenvolvam sobre um potencial plano de deslizamento, conforme a Figura 2, cuja configuração depende do sistema de diaclases presente, sob influência do estado de tensão gerado pelo conjunto barragem-albufeira. No âmbito de uma avaliação inicial, quando a informação disponível a respeito da obra ainda é escassa, é analisado o mecanismo de deslizamento sobre um plano horizontal (Figura 2a).

Para determinação do factor de segurança associado ao cenário de deslizamento ( $FSD_{es}$ ) é habitualmente adoptado o critério de rotura de Mohr-Coulomb, pelo que

$$FSD_{es} = \frac{cL + \sum V_t g \phi}{\sum H} \quad [1]$$

onde  $c$  representa a coesão,  $L$  o comprimento da base,  $V$  as forças verticais,  $\phi$  o ângulo de atrito interno e  $H$  as forças horizontais. A existência de uma fissura ao longo do plano de deslizamento afecta o comprimento da base ( $L$ ), que deverá representar o comprimento não fissurado, bem como o somatório das forças verticais ( $V$ ), do qual deverá ser subtraída a resultante da subpressão, o que pode ser interpretado como um decréscimo do peso próprio da estrutura (Serafim, 1968).

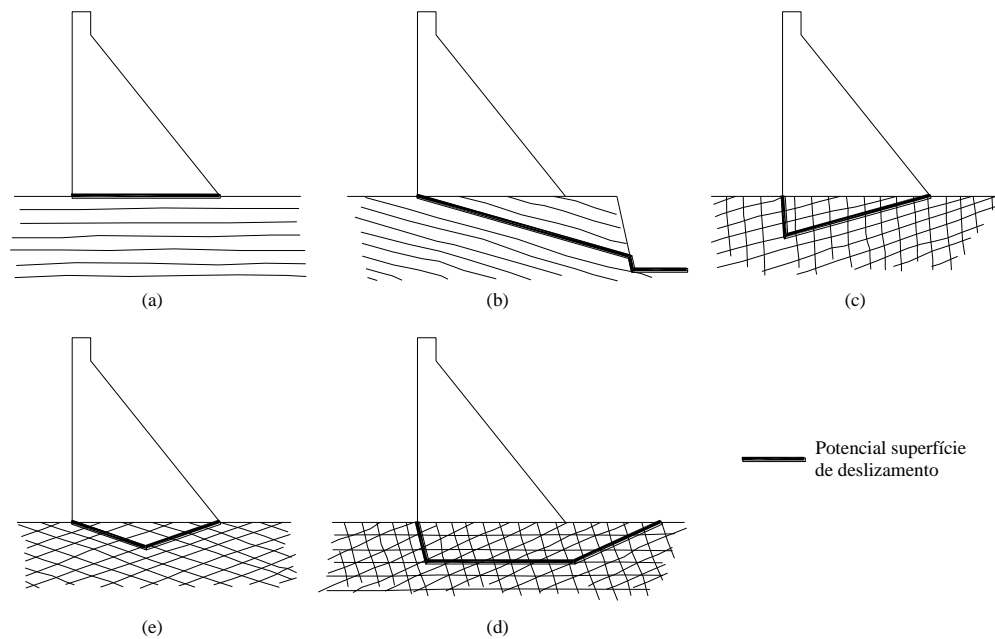


Figura 2 – Potenciais superfícies de deslizamento ao longo da fundação (adaptado de Rocha, 1978)

A seguir faz-se a caracterização do processo de formação e propagação de fissuras horizontais na base de barragens gravidade, apresenta-se um método de cálculo expedito para determinação da propagação de fissuras e avalia-se o impacto que este fenómeno pode ter na estabilidade global da estrutura, através da análise da barragem de Bouzey.

## 2. FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS NA SUPERFÍCIE DE FUNDAÇÃO DE BARRAGENS GRAVIDADE

A formação inicial de fissuras e a sua propagação a curto e médio prazo na superfície de fundação de barragens gravidade estão associadas normalmente a tensões de tracção em consequência do momento de derrubamento induzido, quer por acções correntes, como a pressão hidrostática e a variação da temperatura, como por acções extremas, como cheias e sismos. Já no processo de desenvolvimento de fissuras a longo prazo, deverão ter mais relevância as forças de corte, resultantes da pressão hidrostática sobre o paramento de montante. Ainda podem ocorrer fissuras por torção, processo não tão óbvio como os anteriores, com origem no movimento relativo dos blocos através das juntas de contracção, com mais importância em barragens gravidade localizadas em vales estreitos.

Interessa referir que alguns estudos que tratam da formação e propagação de fissuras em barragens e fundações, baseiam-se na mecânica da fractura, em que os mecanismos descritos são identificados como, respectivamente, modos I, II e III, considerados de forma individual ou em simultâneo. Neste contexto, as fissuras são tratadas por métodos lineares ou não-lineares, caso em que se considera a existência de uma zona plastificada na sua extremidade. Estas abordagens são importantes para percepção do fenómeno em causa porém, no âmbito da análise da segurança de barragens através de uma metodologia expedita, como a que seguir se apresenta, o critério adoptado é o da resistência nula a tracção. Segundo Kishen (2005), esta abordagem resulta em comprimentos de fissura superiores aos dos processos baseados na mecânica da fractura, pelo que se enquadra nos objectivos de uma análise preliminar.

Quanto ao efeito da água que se infiltra na fissura, quando a barragem se encontra sujeita apenas a acções estáticas, a tendência é para que a subpressão que se instale seja total, equivalente ao nível da albufeira em relação a cota da entrada da fissura, excepto na sua parte final, próximo da

zona plastificada, não totalmente fissurada, em que o diagrama de subpressão toma a forma de um gradiente até se tornar nulo, à semelhança do que ocorre num meio homogéneo não fissurado.

Em relação ao comportamento dinâmico, o estudo efectuado por Slowik and Saouma (2000) indica que para novas fissuras iniciadas durante o sismo, não se verifica a acção da subpressão, pois a água não tem tempo para se infiltrar. Conclusão exactamente oposta é possível extrair do trabalho apresentado por Javanmardi et al. (2005), pois estes últimos autores sugerem que o tempo necessário para que ocorra a infiltração da água é suficientemente pequeno para que o efeito da subpressão se verifique ainda durante o evento sísmico que lhe deu origem.

Quanto as fissuras que se encontram preenchidas com água quando da ocorrência de um sismo, Slowik and Saouma (2000) consideram que elas irão manter-se, motivo pelo qual se poderá verificar um efeito de cunha dentro da fissura. Em relação a este último aspecto, resultado semelhante foi apresentado por Javanmardi et al. (2005).

Outra questão que levanta alguma controvérsia diz respeito à funcionalidade do sistema de drenagem, instalado em bases fissuradas. Uma das possibilidades é considerar a efectividade dos drenos, mesmo quando a fissura ocorra para além da zona de instalação da cortina de drenagem, como previsto pela FERC (2002). Outro procedimento é considerar que a efectividade se mantém apenas se a fissura não alcançar a zona de instalação da cortina, como o sugerido pela USACE (1995). E ainda uma terceira hipótese, mais conservadora, é a que considera a perda de funcionalidade do sistema de drenagem sempre que a base esteja fissurada, independente do comprimento da fissura, como o preconizado pela USBR (1987). Este último procedimento justifica-se pois outros factores podem colocar em causa esta efectividade, para além do dano físico dos drenos, como por exemplo a passagem do regime de escoamento laminar para turbulento devido ao aumento do caudal propiciado pela fissuração parcial da base (Goodman et al., 1983). A Figura 3 representa todas as hipóteses anteriormente descritas.

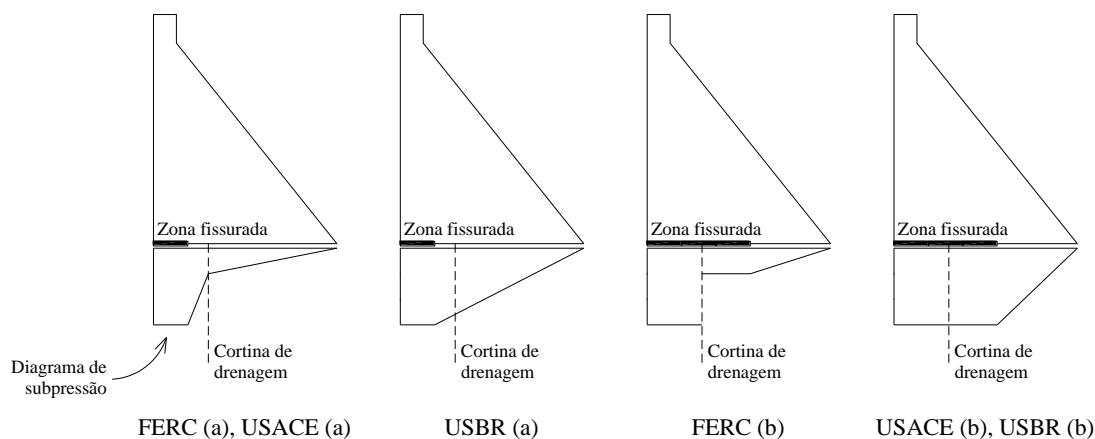


Figura 3 – Diagrama de subpressão segundo os regulamentos da FERC, USACE e USBR, para os casos em que (a) a fissura não se desenvolve para além da localização da cortina de drenagem e para o caso (b) em que a fissura se desenvolve para além da localização da cortina de drenagem (adaptado de USACE, 2000)

### 3. ANÁLISE LIMITE DE BARRAGENS GRAVIDADE

São vários os métodos disponíveis para a análise de cenários de rotura para barragens gravidade, distinguindo-se os métodos expeditos dos mais sofisticados. Os métodos mais sofisticados exigem maiores recursos para elaboração dos modelos, bem como para análise e interpretação dos resultados, pelo que devem ser reservados para cenários mais específicos, previamente

seleccionados como os condicionantes para determinada estrutura. Neste grupo, entre os que contemplam a análise de fissuras, encontram-se os modelos de elementos finitos que incorporam técnicas de contínuo-equivalente para zona fissurada (e.g. Wittke et al., 2003) ou assumem a fissura de forma explícita, com a redefinição e refinamento da malha no local da fissura (e.g. König et al., 2000) ou mesmo as duas técnicas em simultâneo (e.g. Dewey et al., 1993). Apenas a modelação explícita admite a aplicação da subpressão na fissura. Ainda neste grupo, os modelos de elementos discretos admitem a modelação explícita de todas as descontinuidades, como a zona de contacto barragem-fundação, as juntas de contracção e as fissuras (e.g. Gimenes and Fernández, 2006; Lemos, 2008), dando origem a um sistema de blocos.

Já os modelos expeditos auxiliam na avaliação preliminar do problema, nomeadamente na detecção das variáveis mais sensíveis e dos cenários condicionantes para a estrutura em causa (e.g. Leclerc et al., 2003). Caracterizam-se por exigir poucos recursos no seu desenvolvimento, à custa da obtenção de resultados mais conservadores.

O método proposto a seguir corresponde à análise limite estática e dinâmica de barragens gravidade (Figura 3) e insere-se no grupo dos procedimentos expeditos. Por se tratar de uma análise plana, deve ser aplicada a barragens com traçado linear em planta, dispostas sobre vales largos. Para barragens que apresentem pequena curvatura em planta, a parcela resistente devida ao efeito arco que se estabelece é desprezada, pelo que os resultados serão em certa medida conservadores e pode ser aconselhável a utilização de modelos tridimensionais. Outro caso semelhante é a análise de barragens gravidade implantadas em vales estreitos. Neste caso a altura dos blocos pode variar de forma considerável, havendo a possibilidade de se verificar um efeito de conjunto relevante, só possível de avaliar através de modelos 3D (Lombardi, 2007).

Este método também não tem em conta a deformabilidade relativa da barragem e fundação. Este aspecto é importante na determinação dos valores das tensões na base, no contacto entre a barragem e a fundação, pois podem ser inferiores à realidade e devem ser observados com cautela, principalmente quando as acções são analisadas de forma independente. Se a fundação for muito deformável ou mesmo apresentar elevada heterogeneidade, tal facto não pode ser desprezado, pois tem influência nas tensões que se desenvolvem no corpo da barragem, para além do plano de contacto (Rocha, 1978).

As tensões de compressão instaladas numa barragem gravidade são habitualmente baixas, bastante inferiores à resistência máxima admitida, tanto para o betão como para alvenaria de pedra, e o mesmo se pode afirmar para as fundações de média resistência, pelo que, para todos os efeitos, considera-se que a resistência do material à compressão é ilimitada. Já a resistência à tracção, considera-se nula, aspecto importante na determinação do comprimento de fissuras que ocorram na base, conforme proposto pela FERC (2002), bem como no processo iterativo de aplicação da subpressão.

Para os planos horizontais foi adoptado um modelo de rotura de Mohr-Coulomb, com coesão nula. Isto justifica-se, por um lado, pelo facto da coesão ser uma parcela resistente de difícil determinação experimental, motivo pelo qual a maioria dos regulamentos internacionais exige a utilização de factores de segurança elevados, o que leva normalmente a ser desprezada na verificação ao deslizamento, sendo apenas considerado o ângulo de atrito como factor resistente. Por outro lado, a coesão só actua na prática quando a secção se encontra sob uma tensão de compressão mínima. Como este aspecto não é verificado, seria contra a segurança considerá-la em todo o comprimento do plano em análise.

É adoptado o método de análise sísmica designado por pseudo-estático, que considera a força de inércia da barragem e o efeito hidrodinâmico da água de acordo com a solução de Westergaard. É um método simplificado que não leva em conta a amplificação do valor da aceleração sísmica

em altura nem a sua característica oscilatória, pois as resultantes são aplicadas como forças estáticas, segundo uma direcção (Priscu et al., 1985).



Figura 4 – Diagrama de funcionamento da aplicação numérica desenvolvida para a análise limite de barragens gravidade

A aplicação permite visualizar graficamente as linhas de impulso devidas à acção do peso próprio e à acção do peso próprio em conjunto com as restantes acções. O conceito de linha de impulso é proveniente da estática gráfica e corresponde ao lugar geométrico ocupado pela resultante estática em cada plano horizontal, em relação as solicitações aplicadas acima deste plano. Tem um significado físico importante, pois traduz a distribuição da carga pelo corpo da estrutura. Através da sua observação é possível identificar zonas em tracção, caso dos planos em que a linha de impulso se desloca para fora do terço central da secção.

Também graficamente é possível observar o diagrama de tensões verticais totais e efectivas. As tensões efectivas são determinadas através das tensões totais, pela soma pontual com a subpressão. A subpressão não é considerada como uma solicitação exterior, pelo que não entra no diagrama de corpo livre, excepto no cálculo dos factores de segurança. No caso geral, o diagrama de subpressão apresenta uma forma bi-linear, resultante do diagrama triangular e do efeito de redução do sistema de drenagem. O diagrama pode ser actualizado quando surge uma fissura, junto ao paramento de montante, onde é aplicada a subpressão total, dando origem ao cálculo iterativo do comprimento final da fissura. O comprimento inicial da fissura, para um cenário de carga previamente definido, é determinado com base no critério de resistência nula à tracção. O cálculo do comprimento final da fissura tem em conta os seguintes pressupostos:

- Após a ocorrência da fissura inicial, considera-se que o sistema de drenagem perde a funcionalidade, pelo que o diagrama de tensões passa a ter uma forma rectangular ao longo da fissura e trapezoidal ou triangular, consoante a cota de água a jusante, ao longo do restante plano;
- Ao contrário da estratégia adoptada anteriormente, a subpressão passa a integrar o cálculo da excentricidade e das tensões, caso contrário não seria possível estabelecer um método de cálculo iterativo que simulasse a progressão da fissura.

#### 4. A ROTURA DA BARRAGEM DE BOUZEY

Durante a segunda metade do séc. XIX foram publicados os primeiros documentos científicos a respeito de barragens gravidade. Pensava-se na época que os princípios estabelecidos por Sazilly (1853), Delocre (1866) e Rankine (1881) seriam suficientes para garantir a segurança destas estruturas (Schnitter, 1994).

A rotura da barragem de Bouzey, ocorrida em 1895, despertou a atenção dos projectistas para as consequências do efeito da subpressão em zona fissurada, aspecto até então parcialmente desconhecido. Dos estudos produzidos em consequência deste acidente, o de Lévy (1895) terá sido o mais importante.

A barragem de Bouzey, com extensão de 545m e altura de 22.7 m, nível máximo da albufeira de 22.1m, localizada no este de França, próximo da localidade de Epinal, foi concluída em 1880 (Figura 5a) e tinha como função alimentar um canal de transporte fluvial. No início de 1881 deu-se o primeiro enchimento. Após o nível atingir 15m o caudal infiltrado era de 65 l/s. Em Março de 1884, na sequência do surgimento de fissuras, um troço central da barragem, com extensão de 135 m, desliza 35 cm pela fundação (primeiro acidente). Apesar disto, até meados de 1885 a barragem permaneceu em utilização e com um nível de 19.6m o caudal infiltrado já era de 232 l/s. Após este período a barragem foi esvaziada e seguiu-se uma longa fase de estudos, projectos e obras que resultaram num reforço de secção junto a fundação (Figura 5b), tendo sido atribuída a causa do acidente a má qualidade da fundação e a rotura da parede de impermeabilização (Smith, 1971).

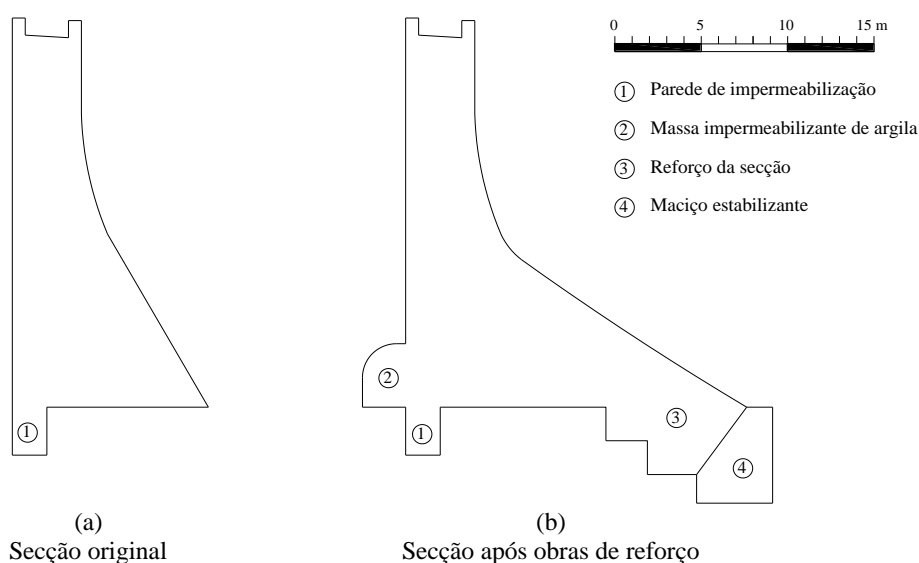


Figura 5 – Secção original da barragem de Bouzey (a) e secção após obras de reabilitação (b) (adaptado de Smith, 1971)

Em Novembro de 1889 a barragem volta a entrar em utilização e em Março de 1890, com o nível de 21.6 m, apresentava um caudal infiltrado de 70 l/s. Seguiu-se um período de exploração normal até que entre o 1894 e 1895 voltaram a surgir fissuras horizontais e no dia 27 de Abril de 1895 a barragem rompe completamente após o desprendimento de uma faixa central da barragem com extensão de 180m e 10m de altura a partir do coroamento (segundo acidente).

A análise da secção original (Figura 6) permite confirmar a hipótese de deslizamento pela superfície horizontal junto à fundação. A secção que apresenta o menor factor de segurança ao deslizamento (FSDes) é de facto a secção da base, com um valor de 0.6, para coesão nula e ângulo de atrito de 45°. Se for considerada a subpressão, a resultante estática se estabelece fora da secção, pelo que toda a base se encontra fissurada. Na Figura 6 também é possível observar a

linha de impulsos referente à acção do peso próprio em conjunto com a pressão hidrostática, que se desenvolve em boa parte da secção fora do seu terço central, o que indica a existência de tracções junto ao paramento montante.

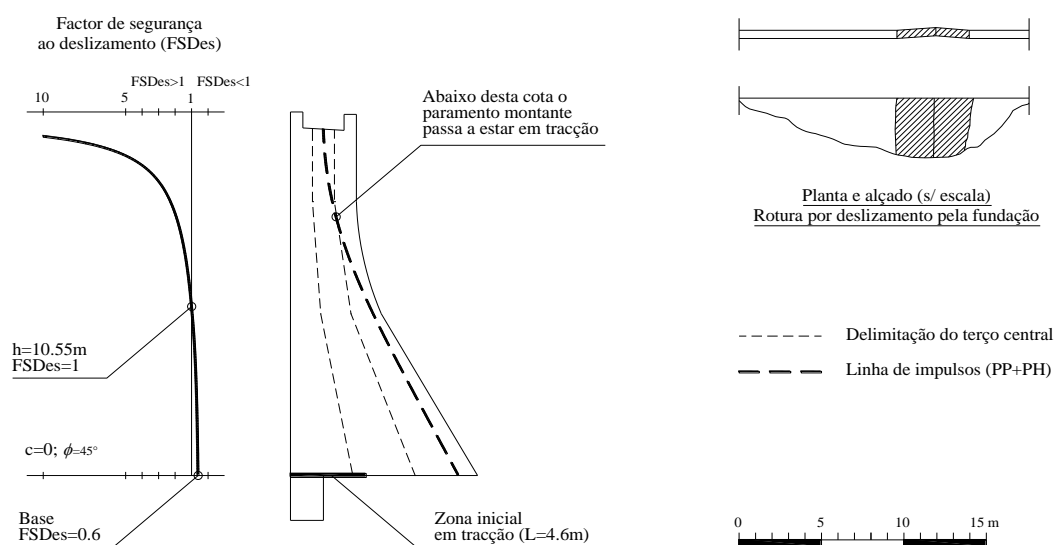


Figura 6 – Análise da secção original da barragem de Bouzey (primeiro acidente) (adaptado de Smith, 1971)

O segundo acidente (Figura 7), que levou a rotura da barragem, inicia-se por um mecanismo de derrubamento a meio da secção. A análise dos factores de segurança ao cenário de derrubamento (FSDer) ao longo do corpo da barragem confirma esta possibilidade. Verifica-se que à cota de 9.75m que o FSDer é de 0.8 e que a propagação da fissura neste local ocorre ao longo de toda a secção, facto terá proporcionado o posterior deslizamento deste troço.

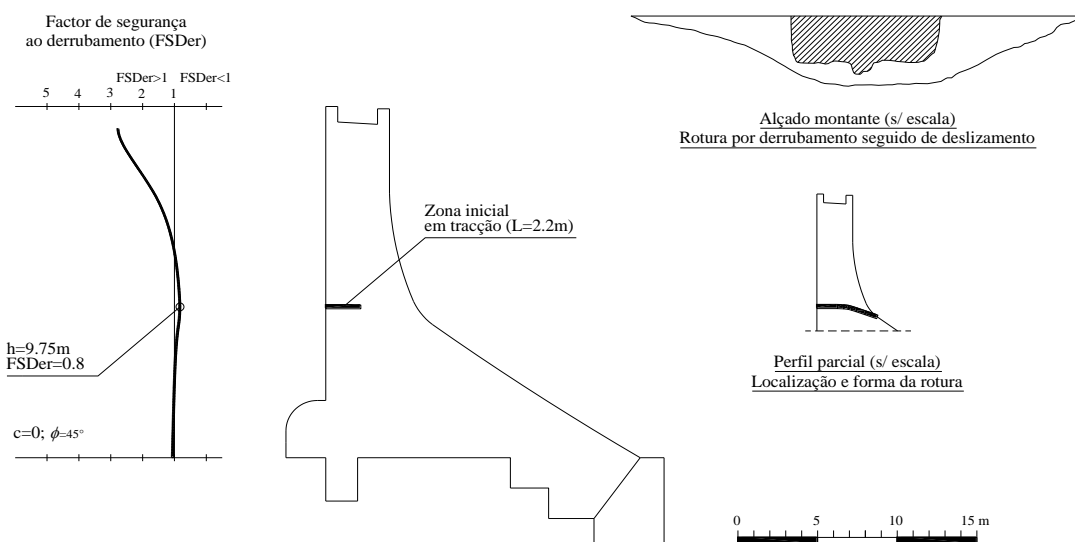


Figura 7 – Análise da secção após reabilitação da barragem de Bouzey (segundo acidente) (adaptado de Smith, 1971)

Ainda na Figura 7 é possível observar a forma final da fissura, com um troço horizontal junto ao paramento montante e com desenvolvimento em curva até o seccionamento total do perfil. Tal configuração leva a concluir que provavelmente a rotura ocorreu por derrubamento, seguido de deslizamento e esmagamento de material junto ao paramento jusante.



## 5. CONCLUSÕES

A análise dos acidentes ocorridos com a barragem de Bouzey põe em evidência a importância que a existência de fissuras tem na segurança de barragens gravidade, tanto pela perda de resistência da estrutura como pelo acréscimo da subpressão que passa a actuar.

A aplicação desenvolvida e os pressupostos simplificados adoptados para análise da formação e propagação de fissuras, nomeadamente quanto ao critério de resistência nula à tracção, é capaz de representar adequadamente os mecanismos de rotura tradicionalmente analisados, de deslizamento e derrubamento.

O acréscimo da subpressão e a efectividade da cortina de drenagem sob fundações fissuradas devem ser analisados em cada obra, com base nos dados disponíveis sobre a fundação e os provenientes do sistema de observação, como drenos e piezómetros.

## REFERÊNCIAS

- Delocre, F. (1866) Mémoire sur la forme du profil à adopter pour les grands barrages en maçonnerie des réservoirs, *Annales des Ponts et Chaussées*.
- Dewey, R.R., R.W. Reich, and V.E. Saouma (1993) Uplift Modeling for Fracture Mechanics Analysis of Concrete Dams, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 10, pp 3025-3044.
- Federal Energy Regulatory Commission (FERC) (2002) *Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects*, Washington, D.C.
- Gimenes, E., and G. Fernández (2006) Hydro mechanical analysis of flow behavior in concrete gravity dam foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, pp 244-259.
- Goodman, R.E., B. Amadei, and N. Sitar (1983) Uplift Pressure in Crack Below Dam, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 109, No. 4, pp 207-221.
- Javanmardi, F., P. Léger, and R. Tinawi (2005) Seismic water pressure in cracked concrete gravity dams: Experimental study and theoretical modeling, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 1, pp 139-150.
- Kishen, J.M.C. (2005) Recent developments in safety assessment of concrete gravity dams, *Current Science*, Vol. 89, No. 4, pp 650-656.
- Konig, C., V. Bettzieche, and C. Konke (2000) Simulation of hydro fracturing in masonry dam structures.
- Leclerc, M., P. Léger, and R. Tinawi (2003) Computer aided stability analysis of gravity dams - CADAM, *Advances in Engineering Software*, pp 403-420.
- Lemos, J.V. (2008) Block modeling of rock masses. Concepts and application to dam foundations, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 12(7-8), pp 915-949.
- Lombardi, G. (2007) 3-D analysis of gravity dams, *Hydropower & Dams*, No. One, pp 98-102.
- Léger, P. (2005) *Compendium on structural behavior, modeling, safety and rehabilitation of concrete dams*, Montréal: École Polytechnique de Montréal.
- Lévy, M.M. (1895) Quelques considérations sur la construction de grands barrages, *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, Vol. 6, pp 288-300.
- Priscu, R., A. Popovici, D. Stematiu, and C. Stere (1985) *Earthquake Engineering for Large Dams*, Bucarest: John Wiley & Sons.
- Rankine, W.J.M. (1881) *Miscellaneous scientific papers: Report on the design and construction of masonry dams*, London: Charles Griffin and Company.
- Rocha, M. (1978) Analysis and design of the foundations of concrete dams, *Intentional Symposium on Rock Mechanics Applied to Dam Foundations*. Rio de Janeiro.
- Sazilly, J. (1853) Note sur un type de profil d'égale résistance proposé pour les murs de réservoirs d'eau, *Annales des Ponts et Chaussées*, Vol. 6, pp 191-222.
- Schnitter, N.J. (1994) *A history of Dams – The useful pyramids*, Rotterdam: A.A. Rotterdam.

- Serafim, J.L. (1968) Influence of Interstitial Water on the Behavior of Rock Masses, In: K.G. Stagg, and O.C. Zienkiewicz, Eds., *Rock Mechanics in Engineering Practice*. London: John Wiley & Sons, pp 55-92.
- Slowik, V., and V.E. Saouma (2000) Water pressure in propagating concrete cracks, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 2, pp 235-242.
- Smith, N. (1971) *A history of dams*, London: Peter Davies.
- US Army Corp of Engineers (USACE) (1995) *Engineering and design, gravity dams*, Washington, D.C.
- US Army Corp of Engineers (USACE) (2000) *Evaluation and comparison of stability analysis and uplift criteria for concrete gravity dams by three Federal Agencies*, Washington, D.C.
- US Bureau of Reclamation (USBR) (1987) *Design of Gravity Dams*, Denver.
- Wittke, W., D. Schroder, and H. Polczyk (2003) Upgrading the stability of three masonry dams in different ways, *10th International Congress of the International Society for Rock Mechanics*. Johannesburg, South Africa: South African Institute of Mining and Metallurgy, pp 1321-1327.