

## **AVALIAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE REFORÇO DE UMA BARRAGEM GRAVIDADE**

Eduardo M. BRETAS

Bolseiro de Doutoramento - Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Pierre LÉGER

Professor - Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, Canadá

José V. LEMOS

Investigador - LNEC, Lisboa, Portugal

Paulo B. LOURENÇO

Professor - Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

### Resumo

As barragens são estruturas que apresentam um risco potencial elevado, pelo que a sua fiabilidade deve ser avaliada continuamente através de um programa de observação. Com base nos dados recolhidos podem ser estudados possíveis cenários de rotura através de modelos numéricos. Descreve-se neste trabalho os principais cenários de rotura a serem considerados quando da avaliação de segurança de uma barragem gravidade e apresenta-se o caso de uma pequena barragem descarregadora, localizada no Canadá, para qual foi elaborado um estudo de estabilidade, inicialmente através de um modelo de equilíbrio limite e posteriormente por meio de um modelo em elementos discretos, no qual foi avaliada uma solução de reforço constituída pela aplicação de ancoragens passivas.

### Abstract

Dams are structures that present a high potential risk, so their reliability should be continuously evaluated through a monitoring plan. Based on the data collected, possible failure scenarios can be studied using numerical models. In this paper the main failure scenarios to consider when assessing the safety of a gravity dam are described and the case of a small overflow dam, located in Canada, is presented. Assessment of stability was carried out first with a limit equilibrium model and then using a model of discrete elements, which was evaluated for a solution consisting of strengthening with passive anchors.

## 1. INTRODUÇÃO

Nesta primeira década do século XXI, questões como o aproveitamento dos recursos hídricos e a geração de energia afiguram-se como temas centrais do desenvolvimento das nações, evidenciando a importância das obras de engenharia civil a elas associadas, com destaque para as barragens. Assiste-se também a uma maior sensibilização das populações para o risco que as barragens representam e para o impacto ambiental associado, sendo assim um tema da sociedade em geral, para além de meramente técnico ou económico. Neste contexto, o problema da fiabilidade destas estruturas e a mitigação da probabilidade de ocorrência de incidentes e acidentes que ponham em risco a funcionalidade e segurança, são questões importantes que interessa aprofundar [1].

As barragens são estruturas que apresentam um risco potencial elevado, motivo pelo qual os regulamentos de segurança prescrevem actividades de acompanhamento e observação, por instrumentação, inspecção visual ou ensaios específicos. Os dados recolhidos permitem a interpretação do comportamento observado e a sua correspondência com as solicitações durante o mesmo período de tempo e são importantes mecanismos de calibração, por retroanálise, dos modelos desenvolvidos para o seu estudo. Permitem também perspectivar o comportamento futuro e suportar acções de reabilitação ou reforço, caso se verifique uma evolução não favorável [2].

Com base neste comportamento corrente, fazem-se também análises quanto aos possíveis cenários de rotura, como nos casos de cheia e de ocorrência de sismos. Estas avaliações tem sido cada vez mais rotineiras, quer pelo aumento da idade média das obras, quer pela necessidade de aumento da capacidade de exploração das mesmas, devido a dificuldade crescente na obtenção de novas licenças de construção de barragens, principalmente devido a questões ambientais.

Este problema torna-se mais notório no caso das barragens gravidade de betão, pois dentre as várias tipologias de barragens, são as que apresentam maiores idades médias e as que estão representadas em maior número, 16% do total [3]. Esta percentagem deve aumentar no futuro, pois as barragens de betão compactado a cilíndrico (RCC) assumem cada vez mais preponderância, as quais recorrem invariavelmente a perfis de gravidade, mesmo em locais onde o tipo de fundação e a forma do vale pudessem sugerir outra escolha. Para além disto, a tendência é de que os regulamentos se tornem mais restritivos, nomeadamente para as barragens em RCC, pois da experiência que tem vindo a ser acumulada, as dispersões das propriedades do betão RCC é superior ao do betão convencional [4]. Acresce ainda a dificuldade de compactação do betão próximo aos paramentos, juntas verticais e outras singularidades.

Descrevem-se neste trabalho os principais cenários de rotura a serem considerados quando da avaliação de segurança de uma barragem gravidade e apresenta-se o caso de uma pequena barragem descarregadora, localizada no Canadá, para a qual foi elaborado um estudo de estabilidade, inicialmente através de um modelo de equilíbrio limite e posteriormente por meio de um modelo em elementos discretos, no qual é verificada uma solução de reforço constituída pela aplicação de ancoragens passivas.

## 2. CENÁRIOS DE ROTURA DE BARRAGENS GRAVIDADE

Até meados do séc. XIX, o projecto de barragens seguia modelos empíricos em que as secções transversais adoptadas apresentavam grande volume, pois eram a materialização literal do princípio da contenção da albufeira pela massa da barragem [5].

Durante a segunda metade do séc. XIX, surgiram os primeiros trabalhos científicos nesta área. Os trabalhos produzidos por Sazilly [6], Delocre [7] e Rankine [8] devem ser referidos como os mais influentes. Foram contributos decisivos no desenvolvimento tecnológico, pois com base num melhor conhecimento da resistência dos materiais, das solicitações e dos mecanismos de rotura, permitiam obter obras igualmente seguras, mas com considerável redução do volume de material empregue [9].

Outro contributo fundamental nesta fase inicial foi protagonizado por Lévy [10], cuja análise da rotura da barragem de Bouzey pôs em evidência a importância da subpressão na estabilidade global destas estruturas.

Desde então os principais mecanismos de rotura estão identificados e continuam no presente [e.g. 11, 12, 13] a serem considerados nas actividades de projecto e avaliação de segurança de barragens gravidade em exploração, nomeadamente a (i) rotura da fundação por excesso de compressão, (ii) o derrubamento da estrutura e (iii) o deslizamento ao longo de um plano.

Na realidade, observa-se que um mecanismo de rotura experimenta os 3 fenómenos descritos, pelo menos na fase inicial de formação, desencadeando com frequência um colapso final por deslizamento. Com especial interesse deve ser verificada a hipótese de deslizamento segundo um plano da fundação, como o plano horizontal de contacto entre a barragem e a fundação ou outro que se identifique com um potencial plano de rotura.

Conforme pode ser observado na Figura 1, os potenciais planos de rotura relacionam-se com a geometria das famílias de diaclases presentes no maciço rochoso. Alguns dos parâmetros que caracterizam esta geometria estão identificados na referida figura. A existência de imbricamento faz com os planos não sejam contínuos e para que ocorra um deslizamento é necessário que se verifique a rotura de blocos, o que faz aumentar consideravelmente a resistência ao corte. Esta lógica está condicionada pela existência de falhas, que na própria formação já experimentaram determinado grau de deslizamento e assim estão mais susceptíveis de repetirem movimento semelhante.

Em conjunto com o cenário de deslizamento segundo um plano, deve ser analisada a acção da subpressão. De facto a subpressão actuando em planos de descontinuidade tem um efeito global, com importância na estabilidade da barragem, mas também local, na própria evolução desta descontinuidade através de um processo de fissuração. No que diz respeito a base de barragens fissuradas, o efeito da subpressão não é tratado de forma consensual, nomeadamente quando na presença de um sistema de drenagem.

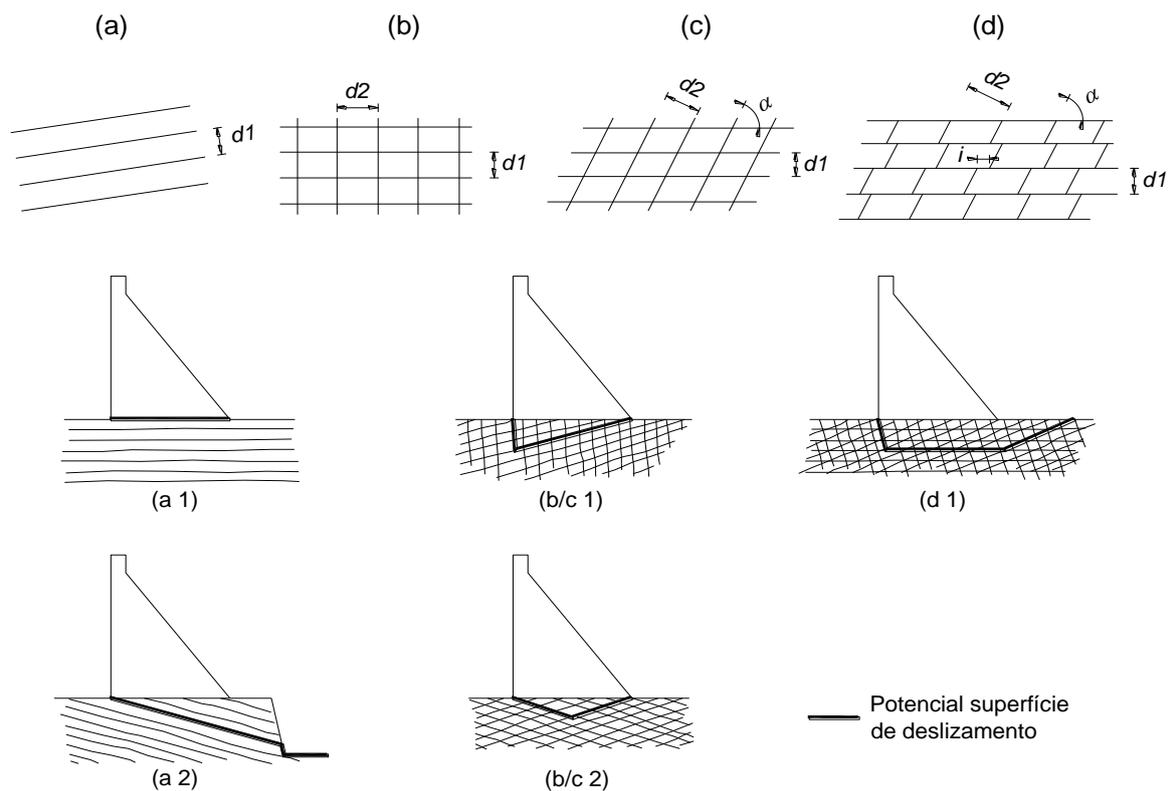


FIGURA 1 – Potenciais superfícies de deslizamento segundo planos de descontinuidade da fundação [adaptado de 14, 15]

A Figura 2 resume os procedimentos preconizados pelo USBR (Bureau of Reclamation), FERC (Federal Energy Regulatory Commission) e USACE (U.S. Army Engineer Research and Development Center) para o caso em que a fissura (a) não alcança a cortina de drenagem e para caso em que a fissura se desenvolve (b) para além da cortina de drenagem. Como pode ser observado os regulamentos têm entendimento controverso sobre o tema, desde uma interpretação mais conservadora que considera a perda total de efectividade do sistema de drenagem desde que a base se encontre fissurada e independentemente da sua extensão, como USBR (a), ou que o sistema de drenagem mantém a sua efectividade mesmo no caso da fissura se desenvolver para além da cortina de drenagem, como em FERC (b).

Para além do aspecto da resistência da fundação à rotura, outra questão diz respeito a sua eventual deformabilidade excessiva que pode induzir tensões na estrutura e colocar em causa a sua funcionalidade. Este aspecto importante não é abordado no presente trabalho. Todos os cenários de rotura que envolvam aspectos relacionados com a fundação, devem ser analisados com cautela, pois dependem de aspectos específicos de cada obra e necessitam ser contextualizados com os dados disponíveis do local ou a serem recolhidos com este objectivo. Caso não se adopte este procedimento a análise pode basear-se em pressupostos incorrectos.

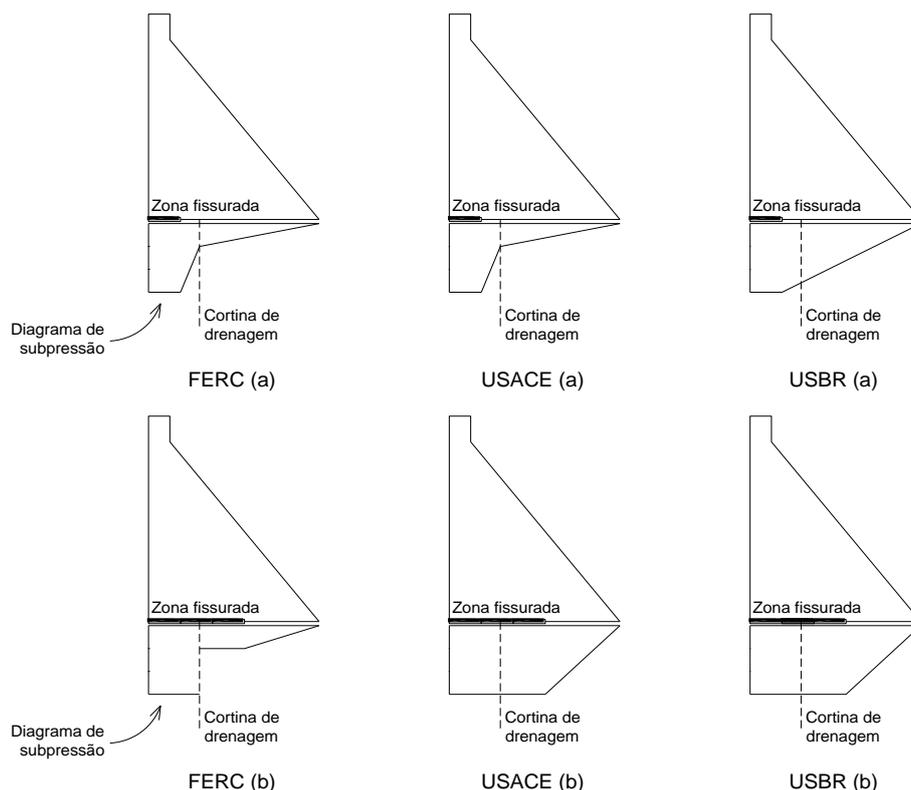


FIGURA 2 – Tratamento preconizado pela USBR, FERC e USACE para avaliação da subpressão no caso em que fissura (a) não alcança a cortina de drenagem e para caso em se desenvolve (b) para além da cortina de drenagem [adaptado de 16]

### 3. MÉTODOS DE ANÁLISE DE BARRAGENS GRAVIDADE

A avaliação da segurança estrutural de barragens gravidade deve iniciar-se através de procedimentos simplificados que permitam de forma expedita, e à custa de resultados mais conservadores, determinar as variáveis determinantes, nomeadamente os mecanismos de rotura fundamentais e as propriedades mais condicionantes dos materiais utilizados. Estes procedimentos baseiam-se na análise de equilíbrio limite da secção transversal [e.g. 17], em que se considera uma distribuição linear de tensões nos vários planos horizontais ao longo do corpo da barragem.

Identificados os cenários e mecanismos determinantes, devem ser empreendidos estudos mais sofisticados de forma a validar os resultados e soluções propostas. Os modelos desenvolvidos com elementos discretos têm sido utilizados com frequência no estudo de barragens [e.g. 18, 19], principalmente por permitirem a modelação directa de discontinuidades, tanto na fundação como no corpo da barragem, como é o caso das juntas de contracção. O Método dos Elementos Discretos (MED), desenvolvido inicialmente para aplicações na área da Mecânica das Rochas, considera explicitamente estas discontinuidades, permitindo a utilização de um modelo constitutivo próprio. Esta característica reflecte-se principalmente na capacidade do MED em prever os mecanismos e cargas de rotura.

As aplicações numéricas UDEC [20] e 3DEC [21] permitem o desenvolvimento de modelos em elementos discretos. Ambas se baseiam na integração no tempo da equação de movimento (2ª Lei de Newton) de cada grau de liberdade, recorrendo ao método da diferença central, em que as análises estáticas e dinâmicas são efectuadas através de um mesmo esquema de cálculo, sendo as primeiras obtidas por um processo de relaxação dinâmica, à custa da aplicação de uma força de amortecimento, suficientemente alta para que haja dissipação de energia cinética de forma à solução convergir para um estado de equilíbrio estático.

Um importante aspecto desta formulação é que a sua estabilidade numérica depende do passo de cálculo, pois este processo é apenas válido se o tempo é discretizado em intervalos suficientemente pequenos, nos quais se consideram as grandezas constantes, o que permite que em cada passo o movimento de um ponto possa ser determinado de forma independente dos restantes.

A principal vantagem deste tipo de solução explícita, em relação à solução implícita em que à partida é estabelecida a relação entre os vários graus de liberdade, é notória em modelos com muitos graus de liberdade. Na solução implícita a montagem da matriz de rigidez é obrigatória, exigindo considerável espaço de memória para o seu registo, bem como grande esforço computacional para resolução do sistema de equações que daí advém. Já na solução explícita, apesar de exigir vários passos de cálculo até a convergência, o esforço computacional despendido em cada passo de cálculo é diminuto, pois o processo reduz-se à aplicação de um esquema recursivo em que cada grau de liberdade é tratado de forma individual.

Outra vantagem verifica-se em análises fortemente não lineares. Na solução explícita, os deslocamentos são incrementados passo a passo, consoante a relação constitutiva adoptada, o que permite, após um grande número de passos, a obtenção de resultados estáveis, que apresentem grandes deformações, sem necessidade de se reequacionar a geometria e as relações de rigidez entre os graus de liberdade, como seria espectável numa solução implícita.

No MED, os modelos são constituídos por blocos que se relacionam através de juntas, materializadas por contactos. Estes contactos, caracterizados por um ponto de aplicação e uma orientação, são criados, actualizados e eliminados automaticamente, no decurso da análise, traduzindo o movimento relativo dos blocos, incluindo deslizamento, rotação e a completa separação.

Os blocos podem ser definidos como rígidos, caso em que as juntas desempenham papel preponderante, ou deformáveis, para os cenários em que a deformabilidade do elemento bloco não pode ser negligenciada. Nesta última hipótese os blocos são discretizados interiormente por uma malha de elementos finitos.

O modelo constitutivo das juntas mais utilizado é de Mohr-Coulomb com um limite de tracção, definido a partir dos parâmetros de coesão ( $c$ ), ângulo de atrito ( $\phi$ ), resistência à tracção ( $t$ ), rigidez normal ( $k_n$ ) e rigidez tangencial ( $k_s$ ). A deformação elástica das juntas é controlada pelas rigidezes normal e tangencial. A Figura 3 representa a relação constitutiva para ambos os casos. A tensão normal está limitada pela resistência à tracção. Já a tensão tangencial é controlada pelo modelo de rotura de Mohr-Coulomb. Em regra, verifica-se que o valor da coesão residual é nulo, pelo que após excedido o valor da tensão tangencial máximo (valor de pico), o

comportamento passa a ser condicionado apenas pelo ângulo de atrito. É também possível adoptar uma redução progressiva da coesão, entre o valor de pico e o valor residual.

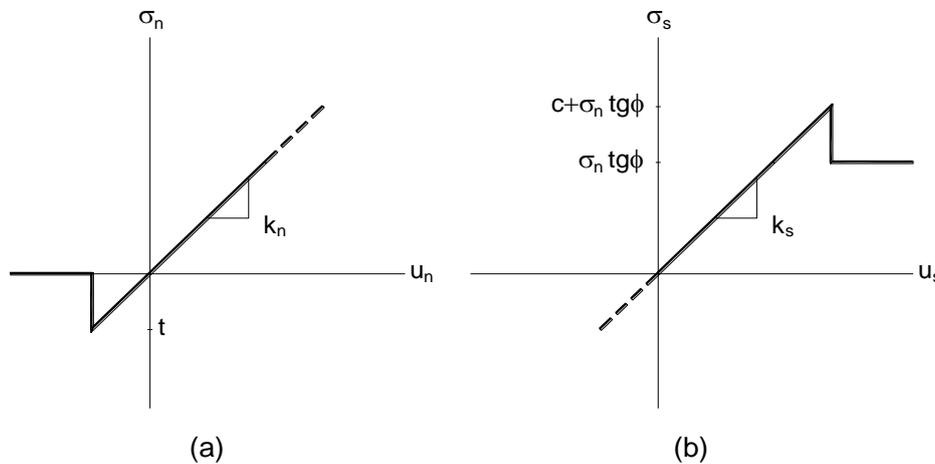


FIGURA 3 – Modelo constitutivo das juntas, (a) direcção normal e (b) direcção tangencial

A implementação numérica dos contactos entre blocos permanece como um tema de interesse científico relevante e relaciona-se com o modelo de distribuição de tensões adoptado, aspecto importante quando o objectivo é o desenvolvimento de estudos hidromecânicos.

#### 4. EXEMPLO DA ANÁLISE DE UMA BARRAGEM GRAVIDADE

Apresenta-se em seguida o caso de uma pequena barragem gravidade em betão, localizada no Canadá (Figura 4), que se desenvolve segundo um alinhamento recto em planta, com secção descarregadora que apresenta uma altura de 2.9m e uma base com largura de 3.7m. A barragem não possui sistema de drenagem, pelo que o diagrama subpressão varia linearmente entre os níveis de água a montante e jusante.

Os cenários considerados estão descritos na Tabela 1 e representados graficamente na Figura 5. Inicialmente foi efectuada uma análise para os dois cenários de acções descritos, com base no método de equilíbrio limite. Foi considerado um peso volúmico para o betão de  $24\text{kN/m}^3$  e para água de  $10\text{kN/m}^3$ . Para a superfície de contacto barragem-fundação foi utilizado um ângulo de atrito de  $45^\circ$ , com uma coesão nula.

Verifica-se para o primeiro caso, referente às condições normais de exploração (Cenário A), que o Factor de Segurança ao Derrubamento (FSDer) é de 1.6 e o Factor de Segurança ao Deslizamento (FSDes) é de 1.4. Observa-se também, com base nesta avaliação inicial, que não se verificam tensões de tracção no pé de montante, pelo que não é de esperar que surjam fissuras nesta zona.



FIGURA 4 – Vista geral da barragem descarregadora

Cenário	Nível da água [m]	
	Montante	Jusante
A – Cenário corrente	3.62	0.62
B – Cenário de cheia	4.81	1.81

TABELA 1 – Níveis de água para os diferentes cenários de ações

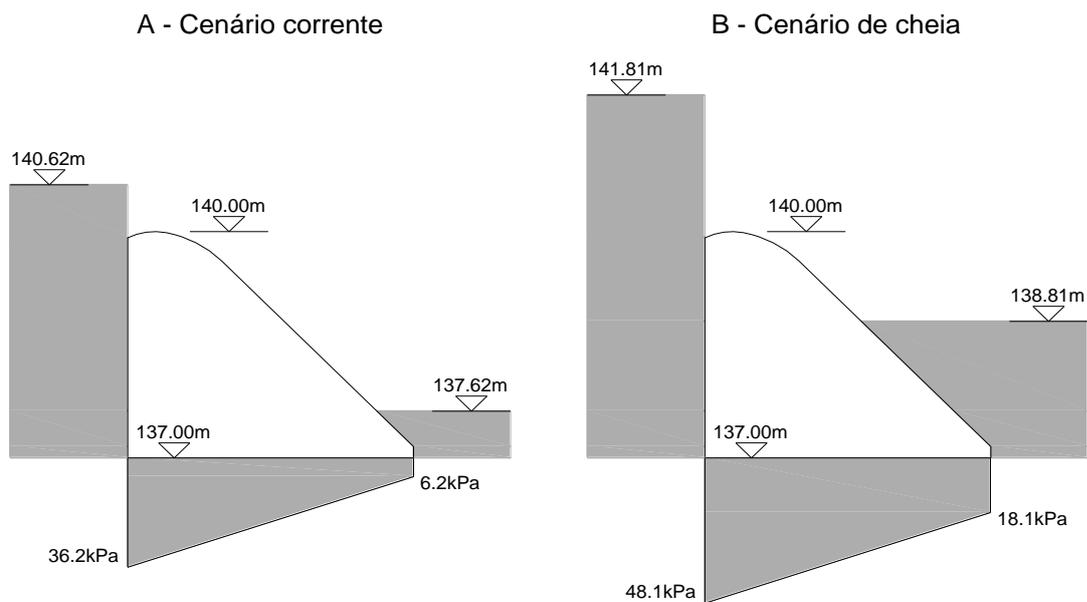


FIGURA 5 – Níveis de água para os diferentes cenários de ações

Já em relação ao caso de cheia (Cenário B), a análise preliminar indica que as condições de segurança ao deslizamento já não se verificam, sendo o FSDer de 0.4. Na realidade a secção não é estável, pois o FSDer é igual a 1.0 pelo a resultante estática está praticamente fora da secção e, não havendo resistência à tracção, não é possível que se estabeleça o equilíbrio. Estes resultados encontram-se representados na Figura 6.

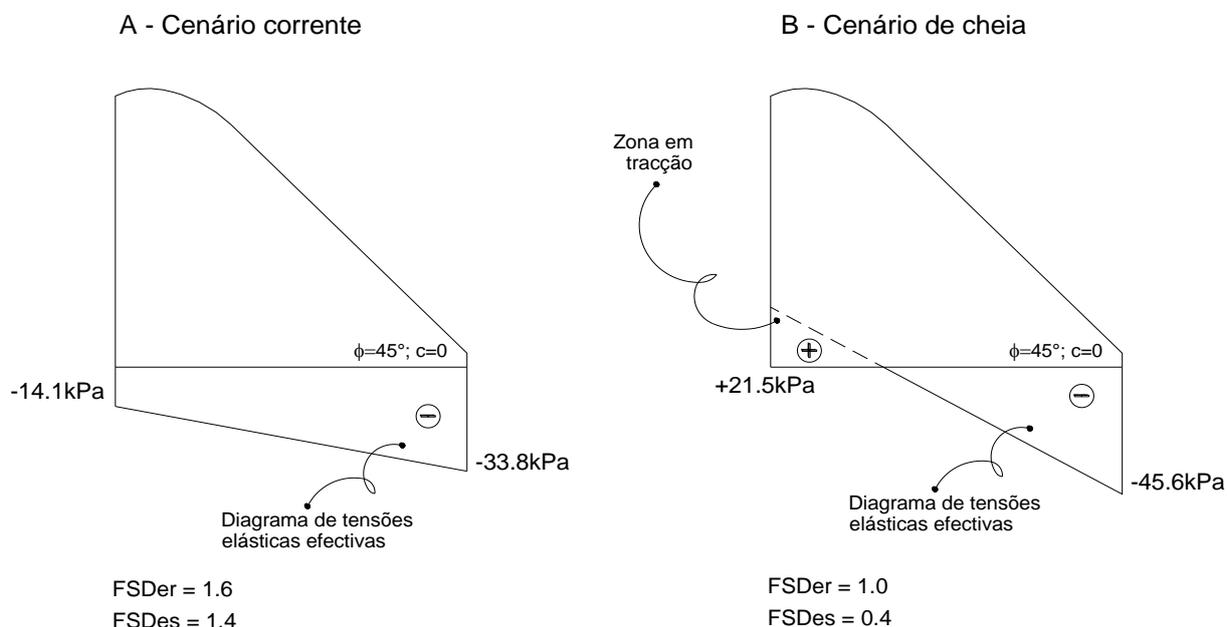


FIGURA 6 – Resultados obtidos através da análise preliminar pelo método do equilíbrio limite

Os resultados obtidos para o caso do cenário de cheia apontam para a necessidade que medidas de reforço da estabilidade da estrutura sejam tomadas, pois existe a possibilidade da barragem deslizar ao longo do plano de fundação. Para o tipo e dimensão da estrutura em causa, a técnica adoptada tem sido a aplicação de ancoragens passivas, introduzidas pelo coroamento, ao longo do corpo da barragem, para além do plano de contacto barragem-fundação.

Para avaliação da efectividade desta solução, ou seja, se a ancoragem é capaz de impedir o deslizamento e se a carga a resistir pela ancoragem está de acordo com a sua capacidade resistente, foi efectuado um modelo de elementos discretos (Figura 7), através da aplicação numérica 3DEC, em que foi adoptado um estado plano de deformação para a fundação e um estado plano de tensão para a barragem.

Na Figura 7 também é possível observar a modelação explícita da junta do plano de fundação e a discretização interna em elementos finitos tetraédricos, de tensão constante, da barragem e da fundação. Optou-se pela utilização de uma discretização mais fina para a barragem (lado máximo de 0.5m) do que para bloco da fundação (lado máximo de 1.0m), aumentando assim os pontos de contacto entre os dois elementos. Os materiais (Tabela 2) seguem a distribuição indicada na mesma figura, para a barragem (Material 1), fundação (Material 2) e para junta barragem-fundação foram considerados três materiais distintos (J-Mat. 1, 2 e 3) no âmbito de uma análise paramétrica. As rigidezes, normal e tangencial, foram determinadas com base no pressuposto da junta introduzir um aumento de flexibilidade de 10%, porém este aspecto só é determinante no domínio elástico não

sendo relevante na avaliação de um cenário de rotura por deslizamento. Para as restantes propriedades foram adoptados valores habitualmente utilizados na ligação betão-rocha.

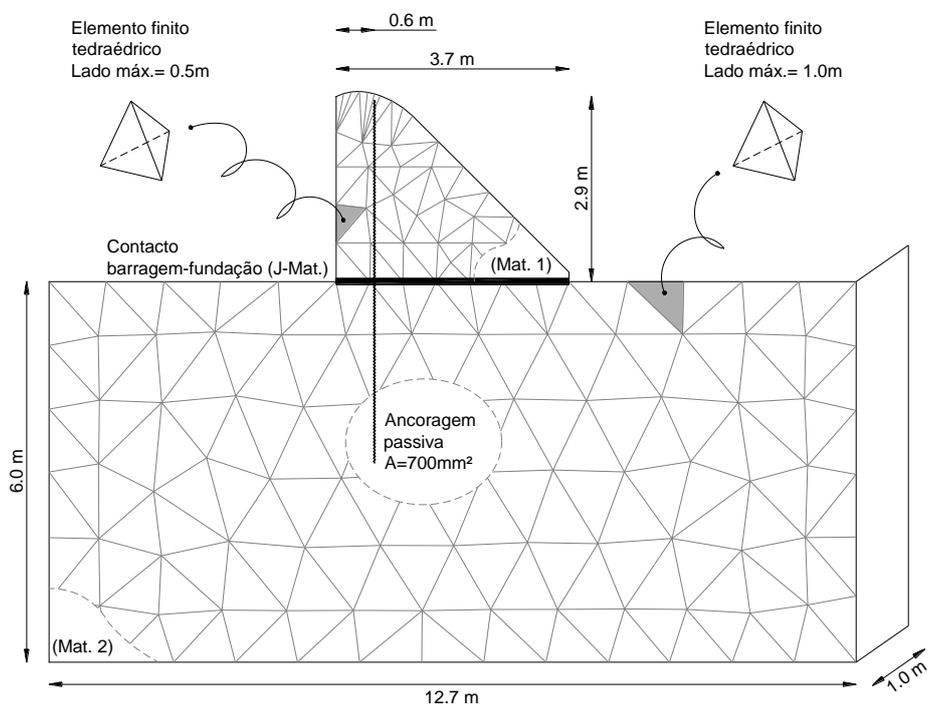


FIGURA 7 – Modelo de elementos discretos desenvolvido com a aplicação 3DEC: detalhes da discretização e distribuição de materiais

Parâmetro	Barragem (Material 1)	Fundação (Material 2)	Junta barragem-fundação		
			J-Mat. 1	J-Mat. 2	J-Mat. 3
Peso volúmico	24kN/m <sup>3</sup>	24kN/m <sup>3</sup>	-	-	-
Módulo de elasticidade	27.5GPa	27.5GPa	-	-	-
Coefficiente de Poisson	0.2	0.3	-	-	-
Ângulo de atrito	-	-	45°	55°	38°
Coesão	-	-	-	-	50kPa
Rigidez normal	-	-	30.5GPa	30.5GPa	30.5GPa
Rigidez tangencial	-	-	11.5GPa	11.5GPa	11.5GPa

TABELA 2 – Propriedades dos materiais utilizados para o meio contínuo e para a junta barragem-fundação

A ancoragem passiva adoptada apresenta um diâmetro de 29.9mm, resistência à tracção de 400MPa, módulo de elasticidade de 200GPa, coeficiente de Poisson de

0.29, rigidez normal de 3.1GPa e tangencial de 1.1GPa. Tendo em conta estes dados a carga máxima de tracção é estimada em 280kN e de corte em 168kN.

Por se tratar de uma análise não linear, a sequência de aplicação das solicitações pode ter influência nos resultados finais. Assim, adoptou-se o esquema representado na Figura 8. Importa referir que neste caso não houve necessidade de considerar tensões iniciais na fundação, de forma a evitar que a aplicação do peso próprio da fundação induzisse tensões na estrutura, uma vez que se trata essencialmente de um modelo plano em representação de 1m do desenvolvimento linear da barragem, conforme já referido.

Ainda na Figura 8, os quadros identificados pelos números 6, 7 e 8 correspondem à aplicação iterativa da subpressão sobre a zona fissurada, até obter uma solução estabilizada.

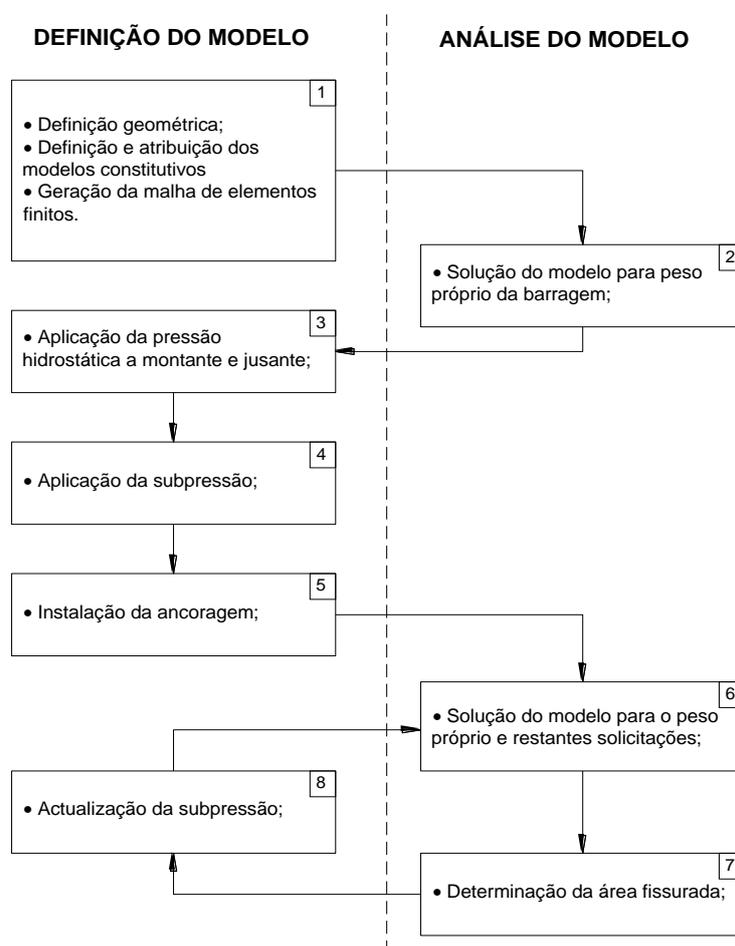


FIGURA 8 – Esquema de aplicação das solicitações no modelo de elementos discretos

Para os 3 materiais de junta considerados foram determinadas as tensões na base da barragem e a solicitação transferida para a ancoragem passiva (Figura 9). Para além disto, com base na Equação 1,

$$FSDes = \frac{\sum Vtg\phi + cL + fsm}{\sum H} \quad \text{(Equação 1)}$$

onde  $V$  representa as forças verticais,  $\phi$  o ângulo de atrito interno,  $c$  a coesão,  $L$  o comprimento não fissurado da base,  $fsm$  a carga máxima de corte da ancoragem e  $H$  as forças horizontais, foram estimados os factores de segurança ao deslizamento, tendo sido obtidos os valores de 2.3, 2.5 e 3.1, respectivamente para J-Mat.1, 2 e 3. Ainda assim, segundo os resultados, irá surgir uma fissura junto ao pé de montante, com comprimento 2.1m, igual para os 3 casos. Este comprimento final foi determinado após 3 actualizações da subpressão, conforme Figura 10.

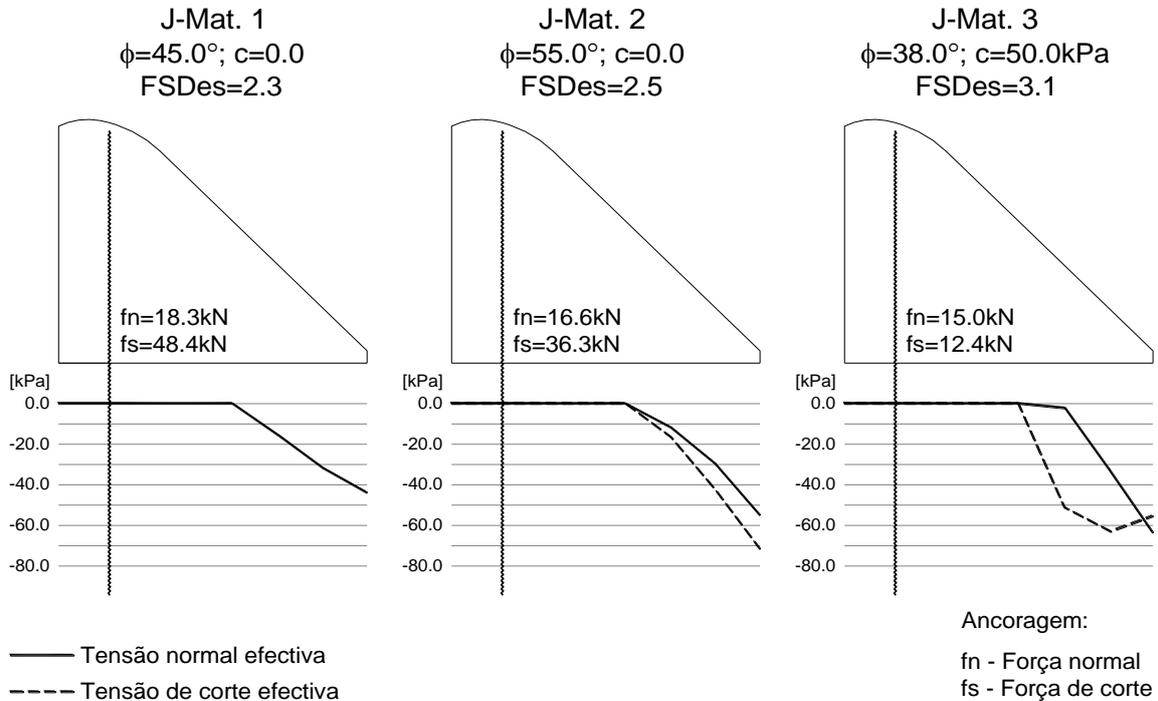


FIGURA 9 – Diagrama de tensões efectivas e participação resistente da ancoragem passiva

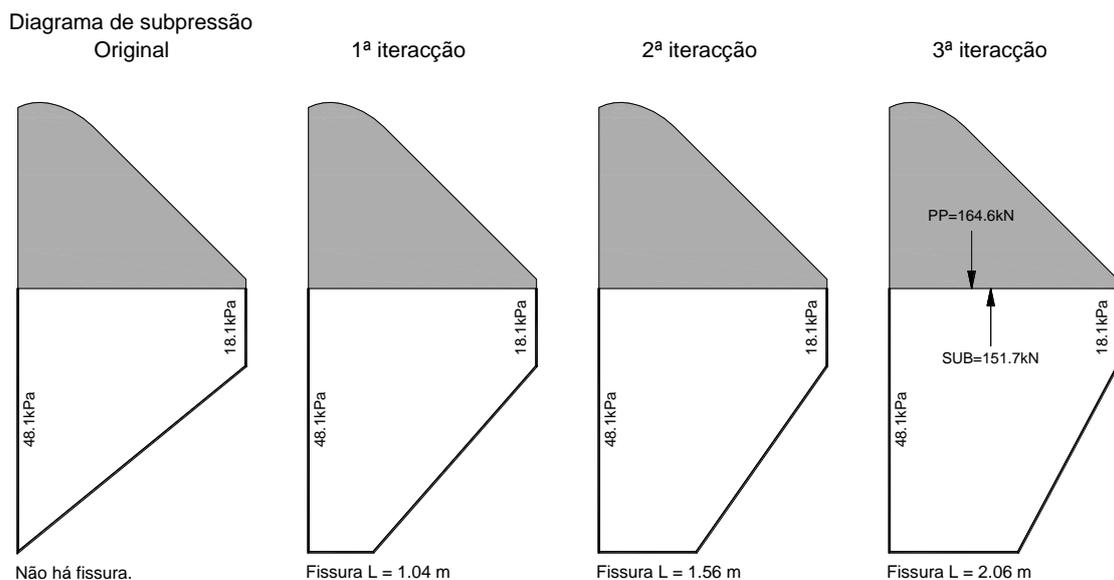


FIGURA 10 – Actualização da subpressão sob a zona fissurada

## 5. CONCLUSÕES

Para a correcta e objectiva análise da segurança de uma estrutura existente é fundamental perceber quais os cenários mais susceptíveis de causar o seu colapso, bem como as suas propriedades resistentes condicionantes. O facto de as barragens estarem dispostas sobre meios heterogéneos e anisotrópicos, faz com que a identificação destes cenários só seja possível a partir da observação contínua de cada obra específica.

Os métodos de análise com base no equilíbrio limite são ferramentas úteis na avaliação preliminar da estrutura e adequadas para identificação das propriedades e mecanismos relevantes para a segurança das barragens gravidade.

As análises desenvolvidas através do método dos elementos discretos permitem uma modelação explícita das descontinuidades do conjunto barragem-fundação. Este aspecto físico do modelo possibilita uma adequada representação do comportamento mecânico da estrutura. Para além disto, outros aspectos podem ser considerados de forma mais elaborada, como é o caso do reforço por ancoragem passiva que consta do exemplo apresentado.

## 6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, através da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/43585/2008, que o primeiro autor agradece.

## 7. PALAVRAS-CHAVE

Avaliação da segurança estrutural; Barragem gravidade; Método dos Elementos Discretos; Subpressão em meios fissurados; Modelação numérica.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PEDRO, J.O. (2001) – “Segurança e funcionalidade das barragens”, LNEC, Lisboa;
- [2] ICOLD (2000) – “General Report Question 78”, XX Congress on large dams, Beijing;
- [3] ICOLD (2003) – “World register of dam”, Paris;
- [4] PEDRO, J.O. (2007) – “Barragens Abóbada - Coeficientes de funcionalidade e segurança e probabilidades de incidente e acidente, para cenários de degradação do betão”, ICT Informação Técnica, LNEC, Lisboa;
- [5] SCHNITTER, N.J. (1994) – “A history of Dams – The useful pyramids”, A.A. Rotterdam, Rotterdam;
- [6] SAZILLY, J. (1853) – “Note sur un type de profil d'égal résistance proposé pour les murs de réservoirs d'eau”, Annales des Ponts et Chaussées, Paris;

- [7] DELOCRE, F. (1866) - "Mémoire sur la forme du profil à adopter pour les grands barrages en maçonnerie des réservoirs", Annales des Ponts et Chaussées, Paris;
- [8] RANKINE, W.J.M. (1881) – "Miscellaneous scientific papers: Report on the design and construction of masonry dams", Charles Griffin and Company, London;
- [9] SMITH, N. (1971) – "A history of dams", Peter Davies, London;
- [10] LÉVY, M.M. (1895) – "Quelques considérations sur la construction de grands barrages", Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris;
- [11] USBR (1987) – "Design of Gravity Dams", U.S. Bureau of Reclamation, 3rd ed., Denver;
- [12] FERC (2002) – "Engineering guidelines for the evaluation of hidropower projects", Federal Energy Regulatory Commission, Washington, D.C.;
- [13] USACE (1995) – "Engineering and design, gravity dams", U.S. Army Engineer Research and Development Center, Washington, D.C.;
- [14] ROCHA, M. (1978) – "Analysis and design of the foundations of concrete dams", Intertional Symposium on Rock Mechanics Applied to Dam Foundations, Rio de Janeiro;
- [15] ROCHA, M. (1965) – "Mechanical behavior of rock foundations in concrete dams", LNEC, Lisbon;
- [16] USACE (2000) – "Evaluation and comparison of stability analysis and uplift criteria for concrete gravity dams by three Federal Agencies", U.S. Army Engineer Research and Development Center, Washington, D.C.;
- [17] LECLERC, M., LÉGER, P. e TINAWI, R. (2003), "Computer aided stability analysis of gravity dams – CADAM", Advances in Engineering Software;
- [18] GIMENES, E. e FERNÁNDEZ, G. (2006) – "Hydromechanical analysis of flow behavior in concrete gravity dam foundations", Canadian Geotechnical Journal;
- [19] LEMOS, J.V. (2008) – "Block modelling of rock masses. Concepts and application to dam foundations", European Journal of Environmental and Civil Enginnering;
- [20] ITASCA (2006) – "UDEC - Universal Distinct Element Code - Theory and Background", Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis;
- [21] ITASCA (2007) – "3DEC - 3 Dimensional Distinct Element Code - Theory and Background", Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis.