

# ANÁLISE E REFORÇO DE BARRAGENS GRAVIDADE

Eduardo M. Bretas

Bolseiro de Doutoramento  
Universidade do Minho  
Guimarães  
ebretas@lnec.pt

Pierre Léger

Professor  
E. Polytechnique de  
Montréal  
pierre.leger@polymtl.ca

José V. Lemos

Investigador  
LNEC  
Lisboa  
vlemos@lnec.pt

Paulo B. Lourenço

Professor  
Universidade do Minho  
Guimarães  
pbl@civil.uminho.pt

José M. Ramos

Investigador  
LNEC  
Lisboa  
jmora@lnec.pt

## SUMÁRIO

As barragens são estruturas que representam risco potencial elevado pois em caso de rotura podem causar perdas humanas e materiais importantes. Através da sua observação criteriosa e com recurso a modelos numéricos faz-se a avaliação de cenários de rotura, obtendo-se factores de segurança que servirão como critérios de decisão para acções de reforço e reabilitação.

Neste contexto apresenta-se o caso de uma barragem localizada no Canadá cuja análise do cenário de rotura por deslizamento, sugere a aplicação de cabos de ancoragem de modo a serem alcançadas as condições de segurança pretendidas. Previamente é feita uma breve revisão das técnicas de reforço e reabilitação associadas aos principais cenários de deterioração relativos às barragens gravidade de betão e alvenaria.

**Palavras-chave:** Avaliação da segurança estrutural; Barragem gravidade; Método dos Elementos Discretos; Subpressão em meios fissurados; Modelação numérica.

## 1. INTRODUÇÃO

A decisão de intervir numa barragem por meio de obras de reforço e reabilitação ocorre, na maioria das vezes, após a identificação de fenómenos de deterioração que possam originar incidentes ou mesmo acidentes que precipitem o colapso da estrutura. Noutros casos, a alteração das condições de exploração ou mesmo dos regulamentos [e.g.1], leva a que a barragem passe a não cumprir os critérios de segurança estabelecidos, havendo assim a necessidade de fazer face a estas novas exigências através de obras de reforço. Ambos os casos são cada vez mais frequentes, pois a idade média destas estruturas é cada vez maior, já que se verifica uma diminuição progressiva da construção de novas estruturas, o que também faz com que os regimes de exploração das existentes sejam mais exigentes.

Segundo um levantamento efectuado em 1983 [2], para as barragens de betão e alvenaria, 75% dos casos de deterioração que ocasionaram acidentes ocorreram na fundação. Estes casos surgem principalmente devido ao cariz cíclico das acções em consequência da subida e diminuição do nível da albufeira, que acabam por alterar progressivamente o comportamento hidromecânico do maciço [3]. Assim, as técnicas de reabilitação utilizadas visam essencialmente aumentar a capacidade resistente da fundação e do interface barragem-fundação, diminuir os caudais drenados pela fundação e pelo corpo da barragem e diminuir a subpressão na fundação. A Fig. 1 ilustra alguns destes casos.

A melhoria das condições de estabilidade pode ser alcançada através da aplicação de ancoragens (Fig. 1a), como foi o caso da barragem de Dom Marco, no Brasil [4]. Outra solução visando o mesmo objectivo, é o aumento da secção da barragem e em consequência o seu peso próprio (Fig. 1b), como na solução adoptada para a reabilitação da barragem de Spullersee, na Áustria [5].

O tratamento do paramento de montante (Fig. 1c) visa impedir a percolação de água pelo corpo da barragem e pode ser efectuada através da aplicação de resina Epoxi, como efectuado na barragem de Freigil, ou através da instalação de uma cortina em PVC, como na barragem do Covão do Ferro, ambas em Portugal. Outra possibilidade para o tratamento do paramento de montante é a construção de uma laje em betão armado (Fig. 1d) e que permitir estabelecer junto ao pé de montante uma galeria de drenagem, como nas soluções adoptadas para as barragens de Vale do Rossim e de Lagoa Comprida, ambas em Portugal [6].

As soluções descritas são normalmente acompanhadas com o tratamento dos aspectos hidráulicos da fundação e da barragem, como o reforço da cortina de impermeabilização e a abertura de novos furos de drenagem (Fig. 1e), bem como o tratamento da fundação e da barragem através da injeção de calda de cimento e resinas acrílicas (Fig. 1f).

O objectivo deste trabalho é apresentar o estudo de uma solução de reforço de estabilidade idealizada para uma barragem gravidade localizada no Canadá, através da instalação de ancoragens passivas. Previamente abordam-se aspectos relacionados com os cenários de rotura e os critérios de estabilidade estabelecidos para este tipo de estrutura.

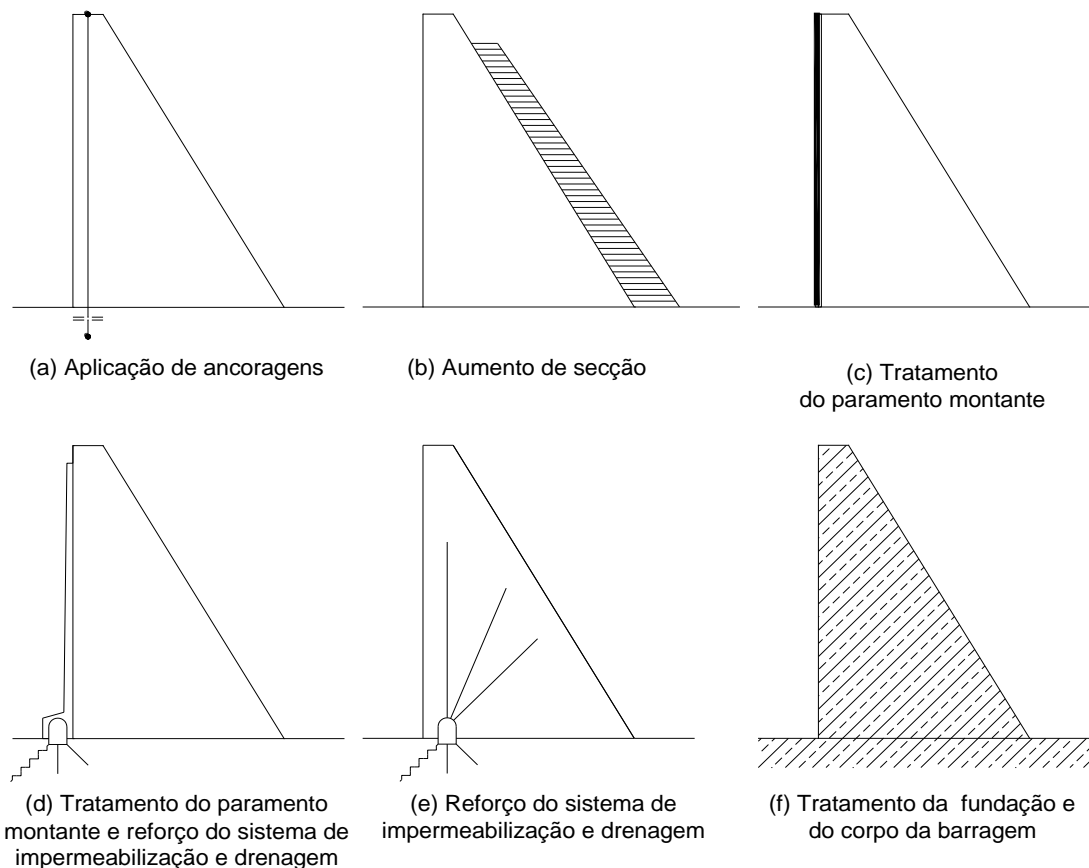


Figura 1. Algumas soluções de reforço e reabilitação de barragens [adaptado de 7]

## 2. ASPECTOS RELACIONADOS COM A ESTABILIDADE DE BARRAGENS GRAVIDADE

Desde o séc. XIX [8-10] a estabilidade de barragens gravidade é analisada através dos cenários de derrubamento e deslizamento segundo um plano, que pode ser o plano de contacto barragem-fundação ou outro menos resistente que se localize na fundação.

O cenário mais condicionante costuma ser o de deslizamento que ocorre normalmente em simultâneo com outros fenómenos, como de fissuração por tracção, esmagamento por excesso de compressão e derrubamento parcial da secção [11].

A ocorrência de fissuração em simultâneo com o deslizamento põe em evidência o papel da subpressão neste processo. Tradicionalmente [12] considera-se que a subpressão actua na base da barragem através de um digrama que varia consoante o nível da albufeira a montante e jusante. Não sendo um tema consensual [13], parece ser prudente considerar a instalação da subpressão total sob a zona fissurada.

A Fig. 2 representa a posição que a resultante estática ocupa, consoante o nível da albufeira, na base de uma barragem com 35m de largura e 50m de altura. A actualização da subpressão sob a zona fissurada, faz com que o gráfico apresente uma inflexão acentuada (linha à tracejado), e indica não ser mais possível a obtenção de um estado de equilíbrio para uma cota de água que coincida com a cota do coroamento.

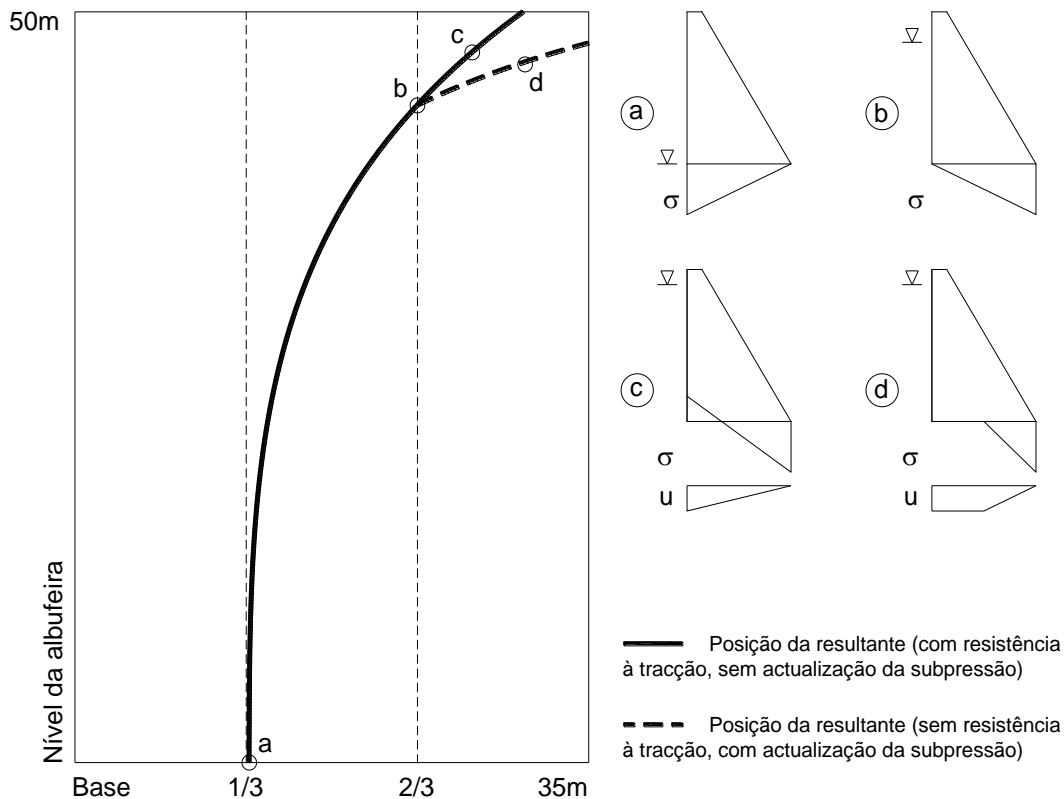


Figura 2. Posição da resultante estática na base de uma barragem com 35m de largura e 50m de altura, consoante o nível da albufera [adaptado de 1]

Pelo exposto, confirma-se a importância que a actualização da subpressão pode ter no processo de rotura de uma barragem gravidade e a necessidade que os estudos de segurança destas estruturas tenham em conta este fenómeno.

### 3. ANÁLISE DE UMA SOLUÇÃO DE REFORÇO COM ANCORAGENS PASSIVAS

A estrutura em estudo é uma pequena barragem gravidade em betão, localizada no Canadá, com perfil descarregador (Fig. 3), desprovida de juntas de contracção e sistema de drenagem, com uma altura de 3.0m e largura na base de 3.7m.

Foi efectuada inicialmente uma análise de equilíbrio limite, para um cenário de cheia, com uma aplicação numérica desenvolvida para o estudo de estabilidade de barragens gravidade [14], conforme as seguintes hipóteses de cálculo:

Nível da água a montante: 141.81m ( $h=4.81\text{m}$ );

Nível da água a jusante: 138.81m ( $h=1.81\text{m}$ );

Subpressão: aplicada sob a base da barragem, a variar linearmente entre os níveis de água a montante e jusante;

Peso volúmico do betão: 24 kN/m<sup>3</sup>;

Peso volúmico da água: 10 kN/m<sup>3</sup>;

Ângulo de atrito no contacto barragem-fundação:  $45^\circ$ ;

Coesão no contacto barragem-fundação: nula.

Verifica-se que nestas condições a barragem apresenta um factor de segurança ao deslizamento (FSDes) igual a 0.4 e de derrubamento (FSDer) igual a 1.0. O valor do FSDer indica que a resultante estática localiza-se junto ao pé de jusante e que cerca de um 1/3 da secção encontra-se em tracção. Se for considerada a hipótese de resistência nula à tracção, procedimento habitual em análises do género, já não é possível obter o equilíbrio estático da secção, pelo que, nestas condições, a secção é instável.

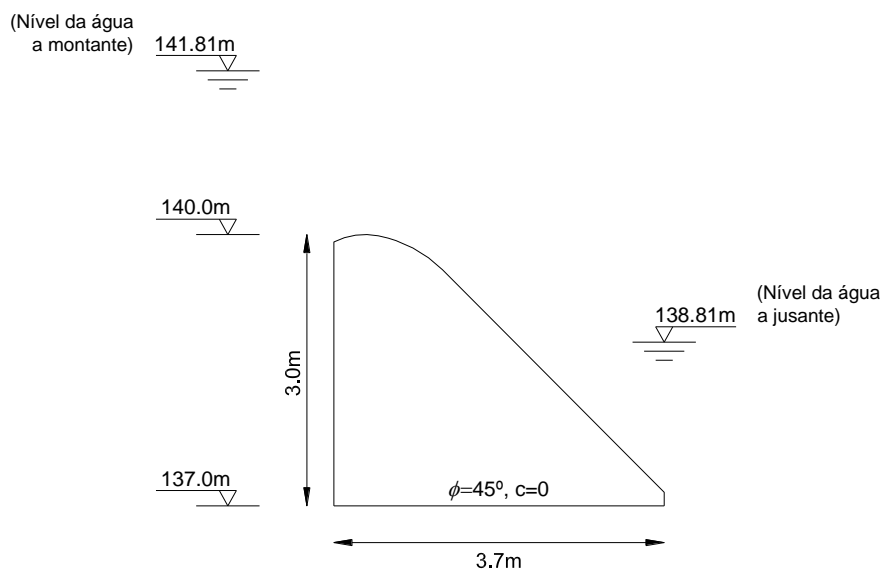


Figura 3. Geometria da secção e caracterização do cenário de cheia  
(nível da albufera igual a 141.81)

Este resultado preliminar sugere a necessidade que medidas de reforço da segurança sejam implementadas, tendo sido prevista uma solução com ancoragens passivas. Para validar esta solução foi desenvolvido um novo estudo como base num modelo de elementos discretos, com blocos deformáveis discretizados com uma malha de elemento tetraédricos, desenvolvido através da aplicação numérica 3DEC (Fig. 4).

Neste tipo de modelo é possível considerar explicitamente as discontinuidades sendo apropriado quando estas são determinantes no comportamento da estrutura como é o caso da junta barragem-fundação deste estudo. Ao longo da análise é possível analisar o processo de rotura e determinar a partilha da força de corte entre o a fundação e a ancoragem, aspecto relevante no caso das ancoragens passivas quando não se sabe à partida qual a solicitação a que estará sujeita, ao contrário do que ocorre quando está em causa o dimensionamento de ancoragens activas [15].

O modelo desenvolvido admite um estado plano de deformação para a fundação e um estado plano de tensão para a barragem, bem como as seguintes hipóteses de cálculo:

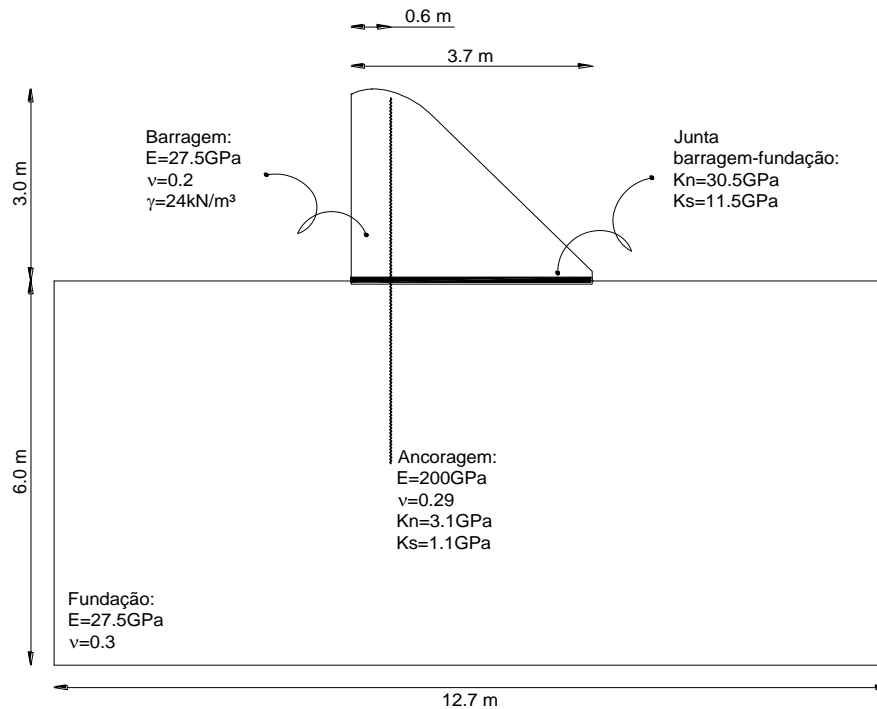


Figura 4. Modelo de elementos discretos

Nível da água a montante: 141.81m (h=4.81m);

Nível da água a jusante: 138.81m (h=1.81m);

Peso volúmico do betão: 24 kN/m<sup>3</sup>;

Peso volúmico da água: 10 kN/m<sup>3</sup>;

Módulo de elasticidade para a barragem: 27.5GPa;

Coefficiente de Poisson para a barragem: 0.2;

Módulo de elasticidade para a fundação: 27.5GPa;

Coefficiente de Poisson para a fundação: 0.3.

Para as propriedades da junta barragem-fundação foram consideradas 3 hipóteses distintas, conforme Quadro 1. A ancoragem passiva adoptada apresenta as seguintes características:

Diâmetro: 29.9mm;

Resistência à tracção: 400MPa;

Módulo de elasticidade: 200GPa;

Coefficiente de Poisson: 0.29;

Rigidez normal: 3.1GPa;

Rigidez tangencial: 1.1GPa;

Resistência ao corte: 168kN.

Quadro 1. Propriedades da junta barragem-fundação: Hipóteses 1, 2 e 3

Parâmetro	Junta barragem-fundação		
	Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 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

A ancoragem foi introduzida no modelo em simultâneo com a pressão hidrostática e a subpressão inicial, o que corresponde a situação em que o reforço é efectuado com a albufeira vazia. Verifica-se que na realidade esta operação é executada com a albufeira cheia ou, na maioria das vezes, com nível reduzido. Este aspecto pode ser relevante no estado de tensão que se vai estabelecer no final da intervenção [7], pelo que deve ser analisado consoante cada caso.

A actualização da subpressão foi efectuada de forma iterativa, sob a zona fissurada determinada no passo de cálculo imediatamente anterior, até a sua estabilização, conforme esquema representado na Fig. 5. No presente caso foram necessárias 4 iterações, o que representou um aumento de subpressão sob a base da barragem de aproximadamente 20%.

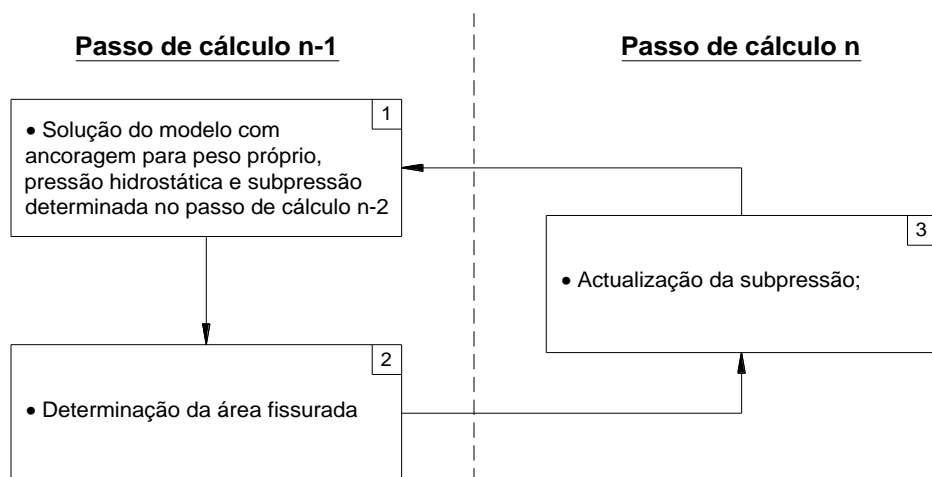


Figura 5. Processo iterativo para aplicação da subpressão

Com base nos pressupostos descritos foram determinados, para as 3 hipóteses de junta em análise, os factores de segurança ao deslizamento (FSDes) e a partilha das solicitações de corte pela ancoragem e pela fundação (Quadro 2). Os FSDes foram determinados a partir da seguinte equação,

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

Onde,

$V$  - somatório das forças verticais (obtido por integração do diagrama de tensão normal na fundação);

$H$  - forças horizontais;

$L$  - comprimento não fissurado da base;

$fsm$  - carga máxima de corte da ancoragem;

$\phi$  - ângulo de atrito interno;

$c$  – coesão.

Quadro 2. Factores de segurança ao deslizamento (FSDes) e forças de corte na ancoragem e fundação (nível da albufeira igual a 141.81)

Resultado	Junta barragem-fundação		
	Hipótese 1 $\phi=45^\circ$ ; $c=0\text{kPa}$	Hipótese 2 $\phi=55^\circ$ ; $c=0\text{kPa}$	Hipótese 3 $\phi=38^\circ$ ; $c=50\text{kPa}$
FSDes	2.3	2.5	3.1
Força normal na ancoragem [kN]	18.3	16.6	15.0
Força de corte na ancoragem [kN]	48.4	36.3	12.4
% da força de corte na ancoragem, em relação à solicitação de corte total	49%	37%	12.5%
% da base que se encontra fissurada	56%	56%	56%
Tensão máxima de compressão na base [kPa]	-43.9	-55.0	-63.6

As forças de corte na ancoragem, para os 3 casos em análise, são inferiores a resistência ao corte adoptado (168kN) e os factores de segurança encontrados são superiores ao que é normalmente exigido pelos regulamentos, pelo que a solução cumpre os objectivos. Outras questões, como a necessidade de reforçar localmente a secção da barragem na zona de aplicação das ancoragens e a capacidade da fundação resistir a acções pontuais, são também questões importantes que deverão ser verificadas [16].

Fez-se ainda o estudo da partilha da solicitação de corte entre a ancoragem e a fundação para vários níveis da albufeira (Fig. 6), para o caso do material de junta considerado na hipótese 1, sem actualização da subpressão. Apesar desta análise poder depender de aspectos relativos a modelação, nomeadamente quanto à discretização na zona de contacto,



é notória o aumento da solicitação da ancoragem a medida que se verifica a rotura da fundação.

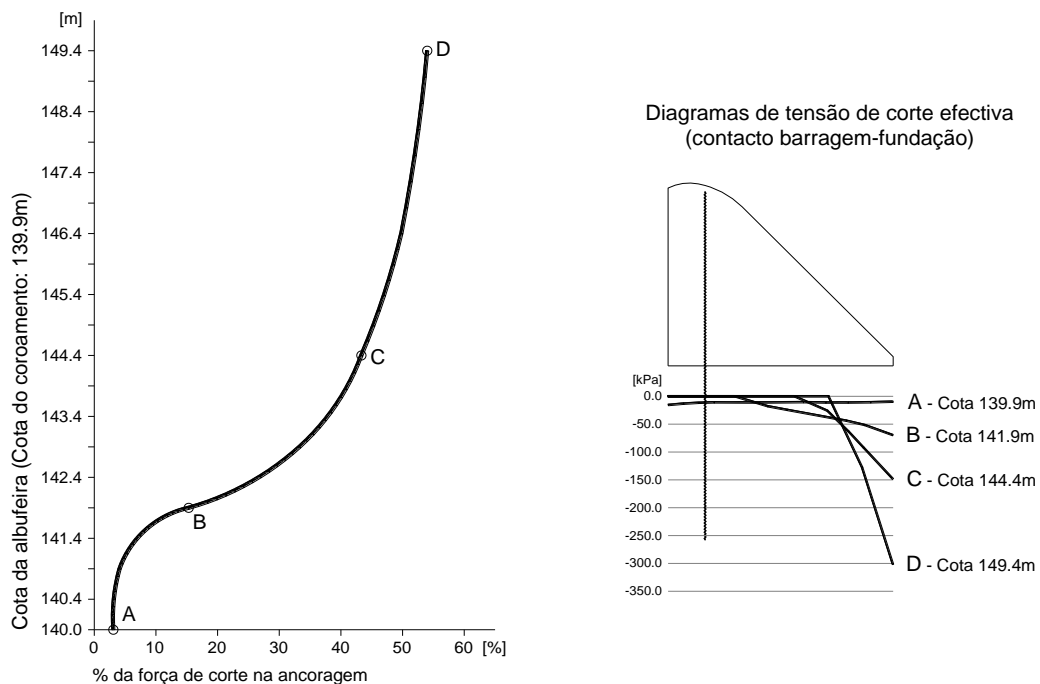


Figura 6. Estudo da partilha da solicitação de corte entre a ancoragem e a fundação para vários níveis da albufeira

#### 4. CONCLUSÕES

O método dos elementos discretos mostra-se adequado na avaliação de soluções de reforço de barragens através de ancoragens pois tem em consideração a rigidez relativa dos elementos estruturais em causa, betão e aço, permitindo a determinação da partilha de carga. No exemplo apresentado estabeleceu-se que a secção fissurada da base, onde se instala a subpressão total, não é capaz de se opor a forças de corte. Porém nos casos em que a superfície de fundação apresente mecanismos de imbricamento, este princípio poderá ser demasiadamente conservador.

A identificação de procedimentos simplificados de determinação da deformação relativa dos materiais e respectiva distribuição de carga para fins de dimensionamento de soluções de reforço do género e em complemento ao método de equilíbrio limite da secção, poderá ser uma área de desenvolvimento do presente trabalho.

#### 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.

## REFERÊNCIAS

- [1] Rissler, P., Rehabilitation of existing gravity dams in Germany with respect to safety philosophy and economy, in 18<sup>o</sup> Congress on large dams, ICOLD, Editor. 1994: Durban. p. 49-64.
- [2] CDDR, Deterioration of dams and reservoirs - Examples and their analysis. 1983, Paris: ICOLD.
- [3] Ramos, J.M., Deterioração e reabilitação de barragens de betão - Memória N.º 838. 2008, Lisboa: LNEC.
- [4] LNEC, Barragem de Dom Marco - Cálculos pelo Método dos elementos finitos - Proc. N.º 46/11/5272. 1975, LNEC: Lisboa.
- [5] Bremen, R., F. Amberg, and G. Lehmann, Strengthening the Spullersee Dams. International Journal on Hydropower and Dams, 2004.
- [6] Ramos, J.M. e J.V. Lemos, Barragens de alvenaria em exploração em Portugal - Deterioração, modelação, reabilitação - Memória N.º 823. 2000, Lisboa: LNEC.
- [7] Biener, E., Rehabilitation of old gravity dams, in 15<sup>o</sup> Congress on large dams, ICOLD, Editor. 1985: Lausanne. p. 21-33.
- [8] Sazilly, J., Note sur un type de profil d'égal résistance proposé pour les murs de réservoirs d'eau. Annales des Ponts et Chaussées, 1853. 6: p. 191-222.
- [9] Delocre, F., Mémoire sur la forme du profil à adopter pour les grands barrages en maçonnerie des réservoirs. Annales des Ponts et Chaussées, 1866.
- [10] Rankine, W.J.M., Miscellaneous scientific papers: Report on the design and construction of masonry dams. 1881, London: Charles Griffin and Company.
- [11] Fishman, Y.A., Stability of concrete retaining structures and their interface with rock foundations. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009. 46: p. 957-966.
- [12] Lévy, M.M., Quelques considérations sur la construction de grands barrages. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, 1895. 6: p. 288-300.
- [13] Ebeling, R.M., L.K. Nuss, and F.T. Tracy, Evaluation and comparison of stability analysis and uplift criteria for concrete gravity dams by three Federal Agencies. 2000, USACE: Washington, D.C.
- [14] Bretas, E.M., J.V. Lemos, and P.B. Lourenço, Masonry Gravity Dams - A numerical application for stability analysis, in 8th International Masonry Conference. 2010: Dresden.
- [15] Azuar, M.M. Le renforcement des massifs rocheux par armatures passives. in 4th ISRM Congress. 1979. Montreux.
- [16] Cummins, P.J., B.R. Smith, and R.C. Evans, Rehabilitation of Goulburn weir foundations and superstructures, in 15<sup>o</sup> Congress on large dams, ICOLD, Editor. 1985, ICOLD: Lausanne. p. 603-618.