

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA BARRAGEM DO CABRIL COM BASE NUM MODELO DE ELEMENTOS DISCRETOS CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DAS JUNTAS DE CONTRACÇÃO

J. V. Lemos^{1*}, Sérgio Oliveira¹, Paulo Mendes², Ivo Dias¹, Romano Câmara¹

1: Núcleo de Modelação Matemática e Física
Departamento de Barragens de Betão
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. do Brasil 101 1700 Lisboa
e-mail: vlemos@lnec.pt; soliveira@lnec.pt; idias@lnec.pt; romano@lnec.pt

2: Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Instituto Politécnico de Lisboa
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1 1950-062 Lisboa
e-mail: pmendes@dec.isel.ipl.pt

Palavras-chave: Modelos Numéricos, Comportamento Dinâmico, Frequências Próprias, Barragens Abóbada, Juntas de Contracção

Resumo. *Neste trabalho apresenta-se um modelo tridimensional de elementos discretos para análise do comportamento dinâmico da barragem do Cabril tendo em conta o efeito das juntas de contracção. Os resultados são comparados com os de um modelo de elementos finitos tridimensionais na hipótese de continuidade. O estudo da barragem é efectuado para diferentes cotas de água na albufeira, simulando-se o efeito das pressões hidrodinâmicas com base na hipótese de massas de água associadas, proposta por Westergaard. A influência do nível da água na resposta dinâmica do conjunto é estudada com base na análise das variações das frequências próprias comparando-se resultados numéricos e experimentais.*

1. INTRODUÇÃO

Actualmente, os modelos numéricos para análise do comportamento dinâmico de barragens abóbada são desenvolvidos não apenas na perspectiva de apoio a estudos de projecto mas também na perspectiva de apoio ao controlo da segurança sísmica de obras em serviço e na perspectiva de apoio a estudos de caracterização de processos de deterioração evolutiva (alterações estruturais associadas a processos de deterioração reflectem-se na resposta dinâmica das obras). Em qualquer destas perspectivas pode ser importante recorrer a modelos sofisticados que permitam simular adequadamente os efeitos de interacção água-estrutura (para diferentes cotas de água) e ainda efeitos não lineares e irreversíveis como os associados à ocorrência de movimentos em juntas de contracção e fissuras, ou à ocorrência de roturas pontuais no betão (devidas, p.ex., à actuação de sismos intensos).

Devido à inexistência de um número representativo de estudos experimentais fiáveis relativos à observação do comportamento dinâmico de grandes barragens não tem sido possível calibrar e verificar devidamente a fiabilidade dos modelos existentes para análise do comportamento dinâmico de sistemas barragem-fundação-albufeira (ver Figura 1).

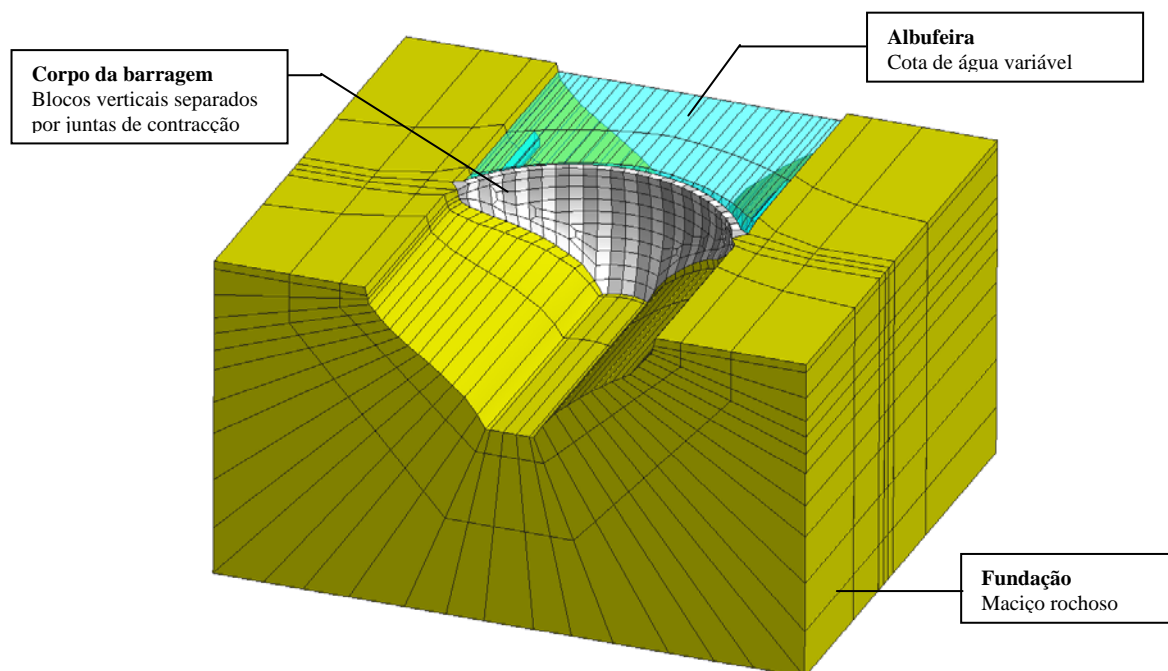


Figura 1. Componentes de um sistema barragem-fundação-albufeira.

Assim, no desenvolvimento deste tipo de modelos, constata-se que subsistem ainda diversas questões por esclarecer, nomeadamente:

i) o valor módulo de elasticidade a adoptar para o betão deverá corresponder ao determinado em ensaios estáticos ou ao valor determinado em ensaios dinâmicos de ultra-sons?

- ii) a interacção dinâmica água-estrutura poderá ser bem simulada com base no modelo de massas de água associadas de Westergaard ou será que a albufeira deverá ser representada por intermédio de elementos finitos de água?
- iii) será que os movimentos nas juntas de contracção influenciam de forma determinante o comportamento global do conjunto barragem-fundação-albufeira?
- iv) o amortecimento do sistema poderá ser bem simulado com base na hipótese de amortecimento viscoso e adoptando o modelo de Rayleigh?

No sentido de contribuir para o esclarecimento das questões anteriores apresentam-se neste trabalho alguns resultados numéricos relativos à análise do comportamento dinâmico da barragem do Cabril os quais são comparados com resultados experimentais obtidos com base em ensaios de vibração forçada e de vibração ambiente realizados em obra para diferentes cotas de água.

Tendo em conta a importância da informação experimental para a verificação da fiabilidade dos modelos numéricos para análise do comportamento dinâmico de barragens é de referir que também têm sido efectuados no LNEC diversos ensaios dinâmicos em modelo físico (alguns estão actualmente a decorrer), nomeadamente com vista ao estudo de cenários de rotura de barragens sob acções dinâmicas [1], [2] e com vista à caracterização da interacção água-estrutura. Relativamente a estes estudos sobre a interacção água-estrutura é de referir que foi desenvolvido recentemente um modelo físico para análise do comportamento dinâmico de uma parede de betão em consola (com 1 m de altura e 0,085 m de espessura) submetida à pressão da água [3]; os resultados obtidos, apresentados sumariamente na Figura 2 em termos da variação da 1ª frequência própria do sistema com a altura de água, mostram que os resultados experimentais podem ser adequadamente reproduzidos por intermédio de modelos de elementos finitos em que o efeito da pressão hidrodinâmica é simulado através de um modelo simplificado de massas de água associadas de Westergaard. A modelação da água por intermédio de elementos finitos formulados em deslocamentos [4], com módulo de distorção nulo, conduziu, neste caso, a resultados praticamente iguais aos obtidos com o modelo simplificado de massas de água associadas. É de salientar, neste caso, que os resultados numéricos obtidos para a situação sem água correspondem exactamente aos resultados experimentais quando se toma como módulo de elasticidade do betão o valor dinâmico determinado com base em ensaios de ultra-sons; para cotas de água elevadas nota-se que as frequências próprias determinadas numericamente são ligeiramente inferiores às determinadas experimentalmente o que indicia que o efeito da água é ligeiramente sobreavaliado com os modelos referidos para simulação das pressões hidrodinâmicas.

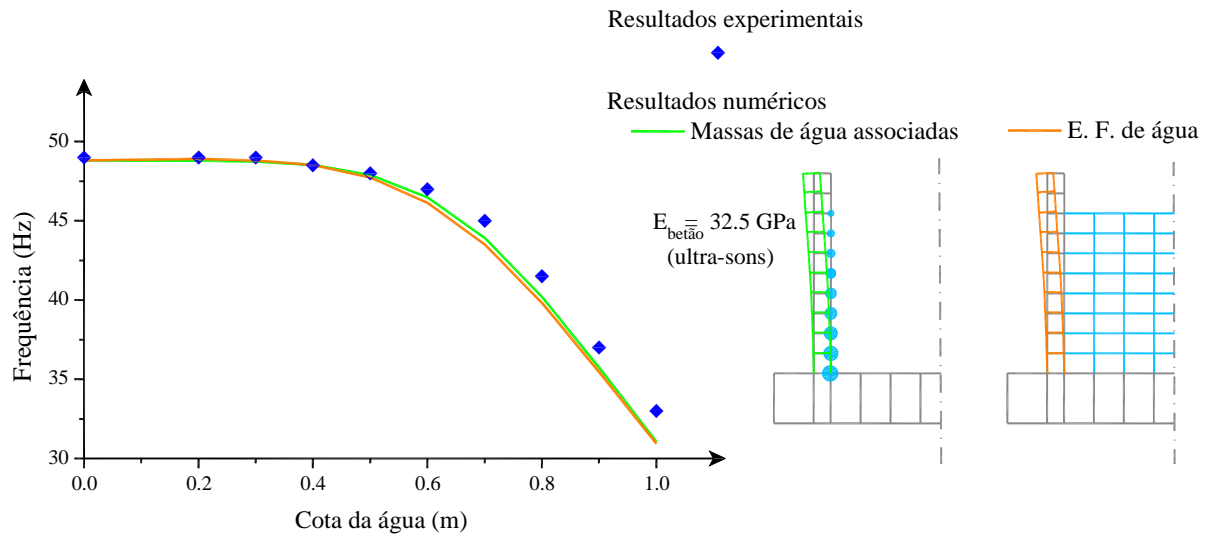


Figura 2. Estudo da interação água-estrutura: variação da 1ª frequência própria. Comparação de resultados experimentais e numéricos obtidos para o caso de uma parede de betão em consola. (figura adaptada de [3])

2. BARRAGEM DO CABRIL

Nesta secção descrevem-se as principais características da barragem do Cabril (Figura 3) e referem-se os ensaios de caracterização do comportamento dinâmico efectuados até à presente data.



Figura 3. Barragem do Cabril.

2.1 Descrição da obra

A barragem do Cabril é constituída por uma grande abóbada de dupla curvatura fundada num maciço granítico. Apresenta uma geometria aproximadamente simétrica e tem a particularidade de apresentar uma zona de maior espessura ao nível do coroamento (Figura 4).

O perfil central tem uma espessura na base de 20,2 m, junto ao soco e uma espessura mínima de 4,5 m à cota 290 m na concordância com a zona do coroamento; a partir desta cota (290 m) a largura aumenta linearmente até 8,3 m na cota máxima (297 m), como se pode ver no corte pela consola central apresentado na figura 4.

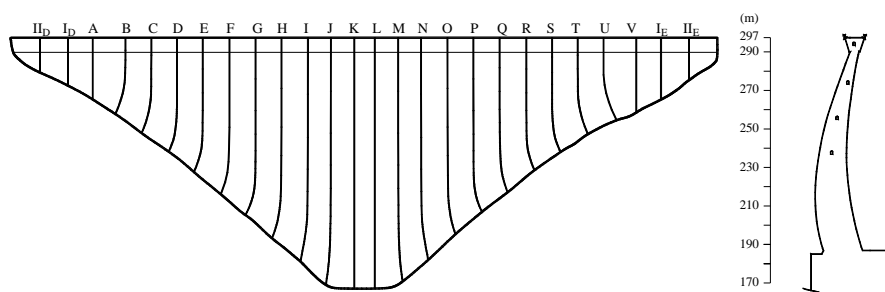


Figura 4. Alçado e corte pela consola central.

Na figura anterior mostra-se igualmente um alçado da barragem no qual estão diferenciados os blocos da barragem separados pelas juntas de contracção verticais.

2.2 Ensaios dinâmicos “in-situ”

Durante a vida útil desta barragem efectuaram-se dois ensaios de vibração forçada e mais recentemente três ensaios de vibração ambiental (ver Tabela 1). Relativamente aos ensaios de vibração ambiental houve a necessidade de recorrer a diferentes técnicas de identificação modal [5][6][7], para interpretar adequadamente o comportamento dinâmico observado [8].

Ensaio	Data	Cota da albufeira (m)
Vibração forçada	1981 (obras)	196.0
Vibração forçada	Nov. 1996	263.5
Vibração ambiental	Fev. 2002	267.0
Vibração ambiental	Mai. 2003	290.0
Vibração ambiental	Out. 2003	269.0

Tabela 1: Ensaios de vibrações efectuados na barragem do Cabril.

A informação experimental obtida nos ensaios anteriores foi utilizada neste trabalho como uma referência no ajuste de alguns parâmetros dos modelos numéricos que se descrevem na secção seguinte.

3. MODELOS NUMÉRICOS

A análise numérica efectuada baseou-se em dois tipos de modelos numéricos. O primeiro modelo de elementos finitos foi elaborado com o programa DTDIN desenvolvido no LNEC [9] e foi utilizado na análise da barragem como meio contínuo (sem juntas). No segundo

modelo foi utilizado o programa de elementos discretos 3DEC [10], que permitiu a consideração das juntas de contracção da barragem e do seu comportamento não linear. Neste modelo, no entanto, a discretização dos vários blocos verticais (separados pelas juntas de contracção) foi realizada com elementos finitos tridimensionais, semelhantes aos utilizados no programa DTDIN.

O programa 3DEC destina-se prioritariamente ao estudo de obras em maciços rochosos, pelo que apresenta um grande desenvolvimento ao nível das potencialidades relacionadas com a representação e simulação do comportamento de superfícies de descontinuidade. Em geral os modelos são constituídos por um conjunto de blocos separados por superfícies de descontinuidade, que podem corresponder às diaclases do maciço rochoso, a interfaces entre materiais, tais como a ligação betão-rocha na fundação da barragem, ou ainda às juntas na abóbada.

Em regra, nos modelos do 3DEC, os blocos do maciço rochoso são representados por blocos rígidos ou por blocos deformáveis formados por uma malha de elementos finitos tetraédricos, que se adequam bem à discretização de uma forma poliédrica arbitrária. Contudo, no estudo de uma abóbada de betão é essencial a representação correcta dos modos de flexão da casca, o que é obtido de modo muito mais eficiente com elementos finitos hexaédricos de 20 nós, com funções de interpolação de deslocamentos quadráticas. Estes elementos também estão disponíveis no programa [11] e foram utilizados no presente estudo (Figura 5). Como se admitiu um maciço rochoso de fundação contínuo e elástico, nos modelos em que se incluiu a fundação, esta também foi representada por elementos de 20 nós (Figura 6). Deste modo, foi possível utilizar a mesma malha de elementos finitos para todos os cálculos, quer com o DTDIN, quer com o 3DEC.

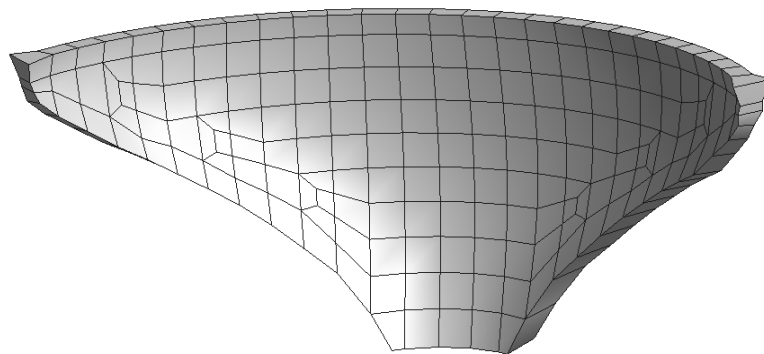


Figura 5. Malha de elementos do corpo da Barragem do Cabril.

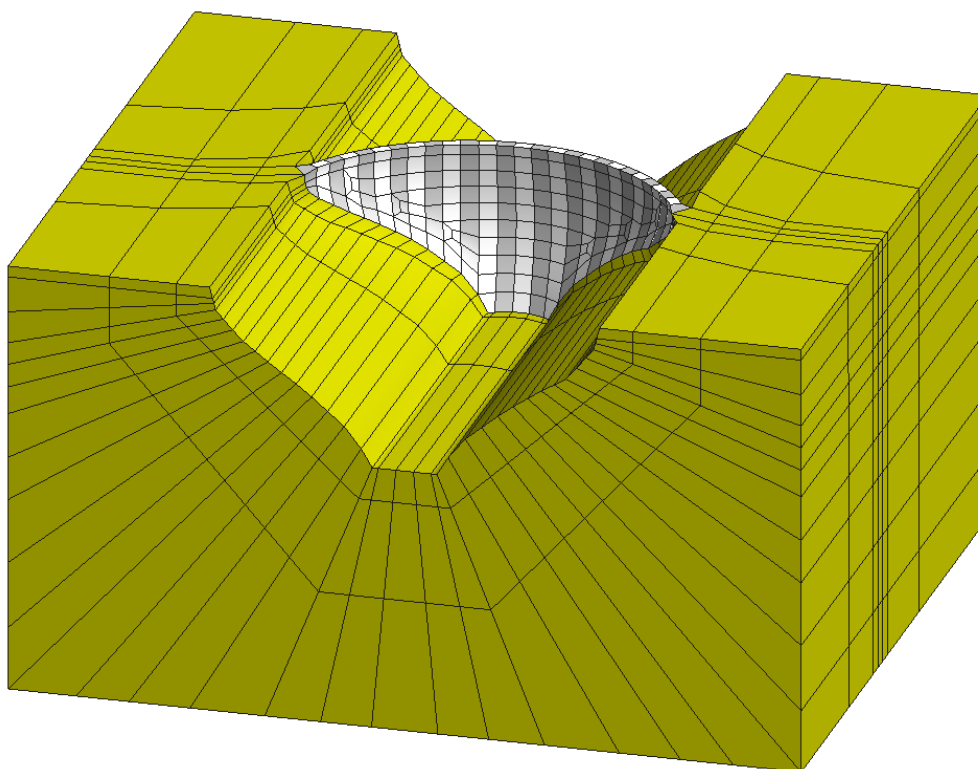


Figura 6. Malha de elementos da barragem e da fundação.

Apesar das malhas de cálculo serem idênticas, existem algumas diferenças de formulação entre os dois programas que conduzem a pequenas diferenças nos resultados.

Em primeiro lugar, o programa DTDIN utiliza uma matriz de massas consistente. O programa 3DEC, cuja solução se baseia num algoritmo explícito de diferenças finitas, emprega uma matriz de massas diagonal, em que os coeficientes correspondem aos elementos diagonais da matriz de massas elementar, escalados de modo a respeitar a massa total do elemento.

A interacção hidrodinâmica é representada em ambos os programas por massas associadas ao paramento de montante da barragem calculadas pela hipótese de Westergaard. No entanto, no 3DEC esta matriz é diagonalizada, o que não ocorre no DTDIN.

Nos cálculos dinâmicos com um modelo que inclui o maciço rochoso de fundação existe também uma diferença significativa. O programa DTDIN adopta a hipótese habitual de fundação sem massa, contribuindo os elementos do maciço apenas para a função de apoio elástico. O 3DEC, mais vocacionado para cálculos não lineares no domínio do tempo, utiliza uma fundação com massa, pelo que nas fronteiras inferiores e laterais do modelo se empregam fronteiras absorventes, na formulação de fronteiras viscosas de Lysmer-

Kuhlmeier, para simular um meio de extensão infinita [12].

Nas juntas entre blocos, o programa 3DEC utiliza as hipóteses habituais dos modelos de elementos discretos, em que a interacção mecânica é representada por um conjunto de contactos pontuais e não por elementos de junta. Dado que, no caso presente, a malha de elementos finitos de cada consola da barragem é geometricamente compatível, e não se atingem grandes deslocamentos, o modelo de contacto pontual corresponde essencialmente a uma matriz de rigidez de um elemento de junta diagonalizada, como se obtém, por exemplo, por integração numérica com base nos pontos nodais.

No modelo da abóbada (Figura 5) estão representadas todas as juntas verticais de contracção que definem as consolas, com um espaçamento da ordem de 13 m. Com o modelo do 3DEC foram efectuados cálculos para três hipóteses de comportamento destas juntas verticais. Em primeiro lugar, foram realizados cálculos na hipótese de abóbada sem juntas, por assimilação dos pontos nodais correspondentes de cada lado da junta, o que conduz a um modelo semelhante ao do programa DTDIN. Num segundo caso, foi admitida a hipótese de junta elástica, com resistência à tracção, sendo a rigidez definida pela rigidez normal e rigidez tangencial. No terceiro caso, considerou-se o comportamento não linear da junta, através de um modelo de Mohr-Coulomb, caracterizado por uma resistência à tracção nula, coesão nula, e ângulo de atrito de 45°.

O programa 3DEC recorre a um algoritmo passo a passo para a solução de problemas estáticos e dinâmicos. Trata-se de um algoritmo explícito de integração no tempo das equações do movimento dos pontos nodais dos elementos dos blocos, pelo método das diferenças centrais. Deste modo, torna-se conveniente adoptar a hipótese de massas concentradas nos pontos nodais, quer para as massas da barragem e fundação, quer para as massas associadas ao paramento de montante que representam a interacção hidrodinâmica. Nos cálculos estáticos, a aplicação deste algoritmo de solução designa-se habitualmente por relaxação dinâmica, e implica a introdução de um amortecimento viscoso elevado para forçar a convergência para a solução estática. Para otimizar o processo, controla-se o valor do amortecimento por uma técnica adaptativa, e utilizam-se também massas escaladas [10]. Nos cálculos dinâmicos, adopta-se amortecimento de Rayleigh, que pode ser definido pela frequência e percentagem do amortecimento crítico no ponto correspondente ao mínimo do diagrama amortecimento-frequência. O programa permite também utilizar apenas a componente proporcional à massa ou a componente proporcional à rigidez. A análise das frequências próprias do modelo 3DEC para situações em que as juntas de contracção se encontram parcialmente abertas, a discutir no ponto seguinte, foi baseada em histórias de acelerações obtidas em cálculos dinâmicos com cargas de curta duração aplicadas em vários pontos da abóbada.

3.1 Propriedades adoptadas para os materiais

Nos dois programas utilizados foram adoptadas as seguintes propriedades para os materiais: módulo de elasticidade 32.5 GPa (para o betão e para a fundação), estimado a partir de ensaios de ultra-sons realizados na barragem do Cabril [13]; coeficiente de Poisson 0.2; peso específico do betão 24 kN/m³; e peso específico da água 10 kN/m³. No caso do 3DEC foram ainda adoptadas juntas de contracção (com deformabilidade equivalente a uma espessura de 1m de betão): rigidez na direcção normal $k_n=32500$ MPa/m e rigidez na direcção tangencial $k_s=13542$ MPa/m; ângulo de atrito 45°; coesão e resistência à tracção nulas quando se efectuaram cálculos com movimentos de abertura e fecho das juntas e com valores muito elevados quando se efectuaram cálculos elásticos (para garantir a elasticidade do modelo). Finalmente nos cálculos dinâmicos em que se considerou o efeito das juntas utilizou-se um amortecimento de Rayleigh de 0.2% para 3 Hz, este valor é relativamente baixo tendo sido colocado para evitar algum ruído numérico.

4. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

4.1 Determinação das frequências próprias

Antes de se passar à análise e comparação dos resultados obtidos é importante referir o processo utilizado para calcular os parâmetros necessários para estudar o comportamento dinâmico do modelo da barragem (nomeadamente frequências próprias e configurações modais).

No DTDIN admitiu-se a hipótese de continuidade e a de material com comportamento elástico linear, pelo que o processo de cálculo utilizado baseou-se na usual técnica de determinação de valores e vectores próprios, que correspondem às frequências naturais da estrutura e respectivas configurações modais.

Relativamente aos resultados obtidos a partir do 3DEC, utilizaram-se dois processos distintos. O primeiro é em tudo semelhante ao utilizado no DTDIN, enquanto que para as situações em que se pretendeu estudar o comportamento dinâmico do modelo da barragem considerando o efeito das juntas de contracção verticais, utilizou-se um processo alternativo. Este processo baseou-se no facto de o 3DEC permitir efectuar cálculos dinâmicos em que o modelo pode ser excitado através da aplicação de histórias de cargas temporais (em determinados pontos), o que origina histórias de acelerações mensuráveis em qualquer ponto do modelo. Desta maneira, tendo como objectivo excitar os principais modos de vibração do modelo, aplicou-se ao modelo um conjunto de cargas dinâmicas de curta duração (idênticas a cargas impulsivas) em alguns pontos criteriosamente escolhidos (para excitar quer modos simétricos quer anti simétricos); foi igualmente seleccionado um conjunto de pontos nos quais foram recolhidas histórias de acelerações. Finalmente, a partir das histórias de acelerações calculadas com o

3DEC foram identificadas as principais características dinâmicas do modelo (frequências próprias e configurações modais). Este processo de identificação modal baseou-se na aplicação do conhecido método da selecção de picos, tendo sido utilizado um programa desenvolvido em MatLab que permitiu identificar com sucesso as frequências próprias e as respectivas configurações modais associadas [3].

Foram utilizadas histórias de acelerações, geradas a partir do 3DEC com uma duração de 50 segundos. Embora estas histórias tenham sido geradas com frequências de amostragem relativamente altas, devido ao passo de cálculo utilizado (o qual depende das propriedades adoptadas e das características geométricas do modelo), foram posteriormente filtradas para uma frequência de amostragem de 100 Hz. No processo de identificação modal utilizaram-se janelas com 4096 pontos (com um comprimento de cerca de 41 segundos) o que permitiu obter uma boa resolução em frequência.

De referir que as cargas dinâmicas aplicadas são de pequena intensidade, não alterando significativamente o deslocamento normal das juntas de contracção. Deste modo, embora o modelo tenha comportamento não linear, os cálculos dinâmicos efectuados correspondem a uma pequena perturbação em torno da solução estática obtida para uma dada altura de água na albufeira. Desta forma admite-se que, para cada cota de água, são determinadas as frequências próprias de uma abóbada com comportamento essencialmente elástico-linear em que não existe contacto em parte da superfície das juntas, e onde, portanto, a rigidez da junta é nula.

4.2 Comparação entre modelos numéricos

Dadas as diferenças acima referidas entre os dois modelos numéricos, foram efectuados alguns cálculos para verificar a sua influência nos resultados. Em primeiro lugar, considerou-se a abóbada encastrada ao longo da superfície de fundação, portanto sem os elementos do maciço rochoso, e eliminaram-se as juntas verticais, donde resulta um comportamento de meio contínuo e elástico. A diferença entre os programas reduz-se à matriz de massas, consistente no DTDIN e concentrada no 3DEC. A Figura 7 mostra a linha de influência das primeiras quatro frequências próprias, em função da altura de água na albufeira. Para os primeiros quatro modos, observa-se a diminuição das frequências próprias devida ao efeito da interacção hidrodinâmica, em ambos os programas representada pelas massas associadas de Westergaard. Verifica-se globalmente uma boa concordância entre os modelos. As pequenas diferenças acentuam-se para os modos superiores, e para as cotas de água mais elevadas.

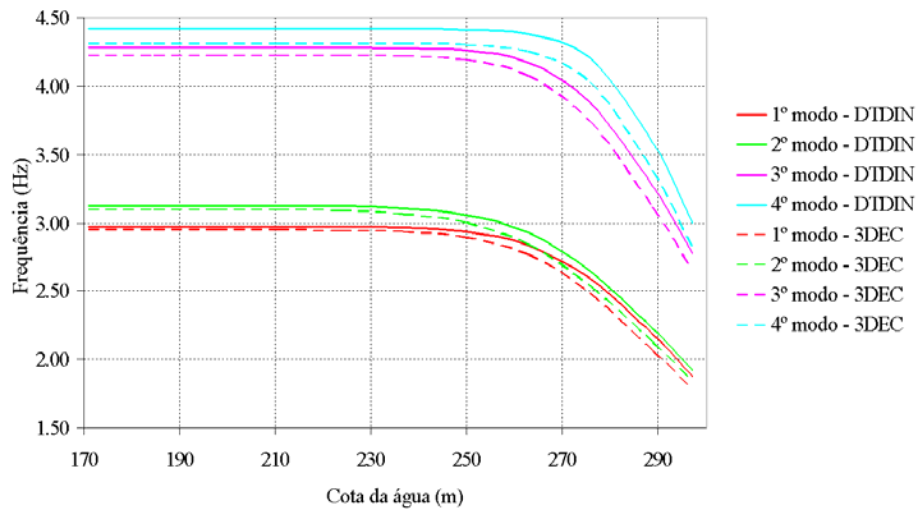


Figura 7. Comparação das linhas de influência dos 4 primeiros modos de vibração obtidos a partir do 3DEC e do DTDIN.

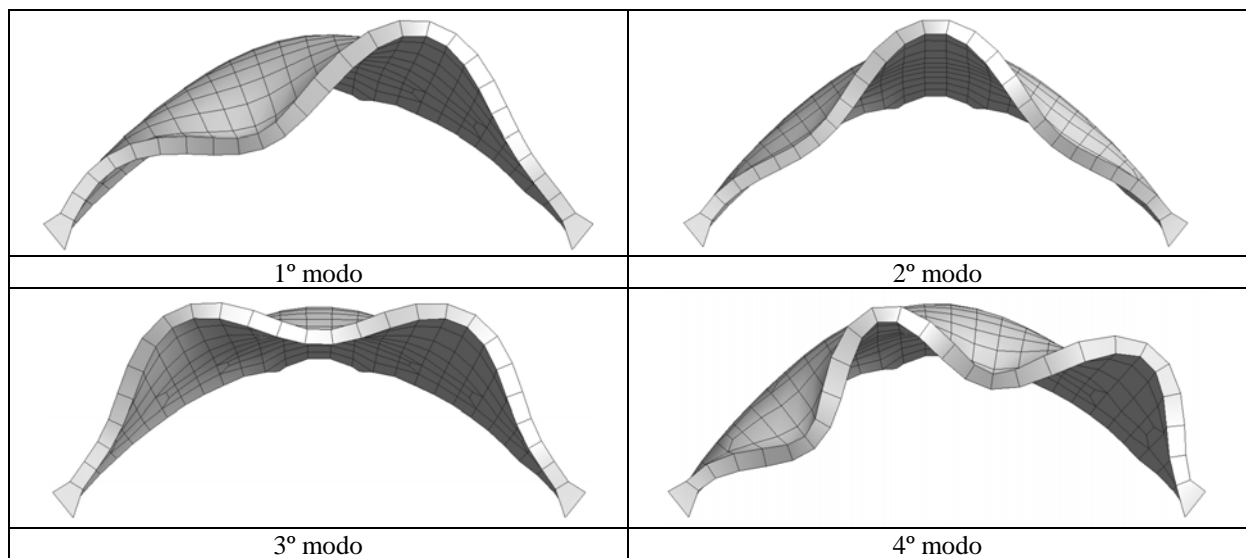


Figura 8. Representação dos 4 primeiros modos de vibração do modelo elástico linear contínuo, para o corpo da barragem encastrado.

Um segundo aspecto analisado foi o efeito da fundação nas características dinâmicas do sistema. Na Figura 9 compara-se a linha de influência que traduz a variação com a cota de água da 1ª frequência própria da barragem na hipótese de modelo contínuo e encastrado (tal como na Figura 7), com a hipótese de modelo com fundação elástica (maciço rochoso). Este cálculo foi efectuado com o modelo DTDIN, com fundação sem massa. A deformabilidade da fundação reduz as frequências em cerca de 0.2 Hz para a albufeira vazia, e um pouco menos

para a água ao nível do coroamento. Cálculos preliminares efectuados com o 3DEC, considerando uma fundação com massa e fronteiras dinâmicas absorventes, são consistentes com estes resultados do programa DTDIN.

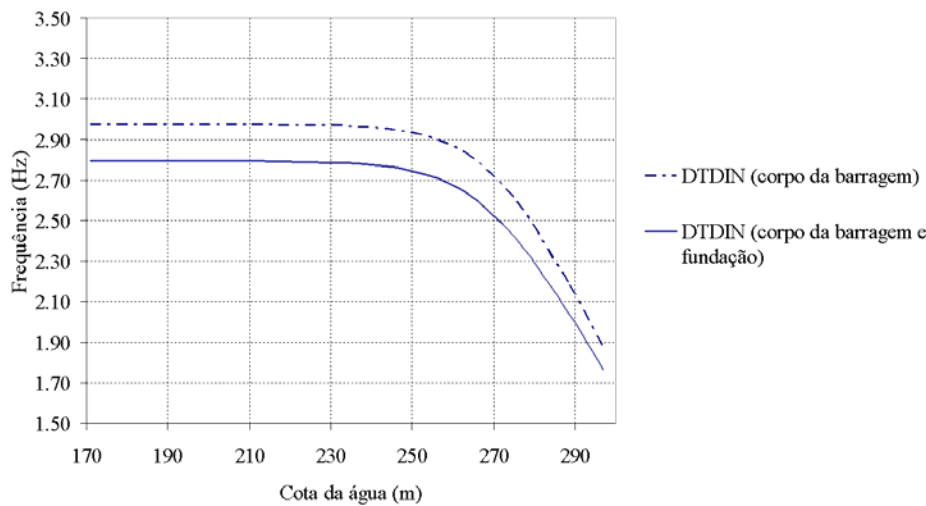


Figura 9. Comparação das linhas de influência do 1º modo de vibração considerando só o corpo da barragem e o corpo da barragem e fundação.

O efeito da deformabilidade das juntas de contracção no modelo 3DEC deve ser também examinado. O comportamento elástico das juntas é caracterizado por uma rigidez k_n na direcção normal, e uma rigidez k_s na direcção tangencial. Não existe muita informação experimental nesta área, mas é sabido que a presença das juntas contribui para aumentar a deformabilidade da abóbada. Uma vez que a rigidez das juntas se define por uma relação entre tensão e deslocamento relativo, tomar uma rigidez infinita corresponde ao caso contínuo e elástico.

Foram adoptados para a rigidez das juntas valores elevados, que alteram muito pouco as frequências, pelo que um modelo 3DEC sem juntas e um modelo 3DEC em que as juntas se admitem elásticas, portanto com resistência à tracção e corte, conduzem a resultados praticamente idênticos.

O efeito do comportamento não linear das juntas de contracção foi finalmente analisado. Foram realizados cálculos estáticos para diversas cotas de água, nos quais se admitiu a não resistência à tracção das juntas e uma resistência ao corte limitada por um ângulo de atrito de 45° . Para a situação de albufeira vazia existem diversas juntas com zonas abertas, sem contacto. A subida da água provoca o fecho gradual das juntas de contracção, tendendo para a situação de abóbada contínua. Na Figura 10 apresenta-se uma comparação das frequências do primeiro modo obtidas com o modelo 3DEC sem juntas e com o modelo não linear, para o caso de barragem encastrada. Para as cotas de água mais baixas, a abertura das juntas conduz

a uma diminuição da rigidez da abóbada, e a uma frequência mais baixa. Para as cotas de água mais altas, é o efeito da interação hidrodinâmica que domina, verificando-se uma clara diminuição da frequência própria, e os resultados dos dois modelos aproximam-se uma vez que as juntas tendem a fechar em praticamente toda a sua extensão.

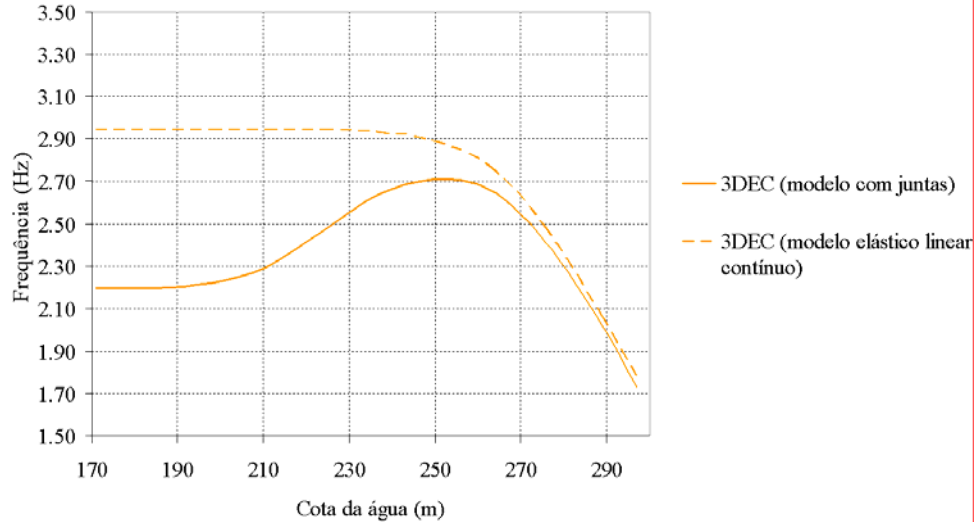


Figura 10. Comparação das linhas de influência do 1º modo de vibração determinadas com o 3DEC considerando o modelo com juntas e o modelo elástico linear contínuo.

Apresentam-se na Figura 11 os 4 primeiros modos de vibração identificados com o modelo com juntas (3DEC), para uma cota de água de 288m.

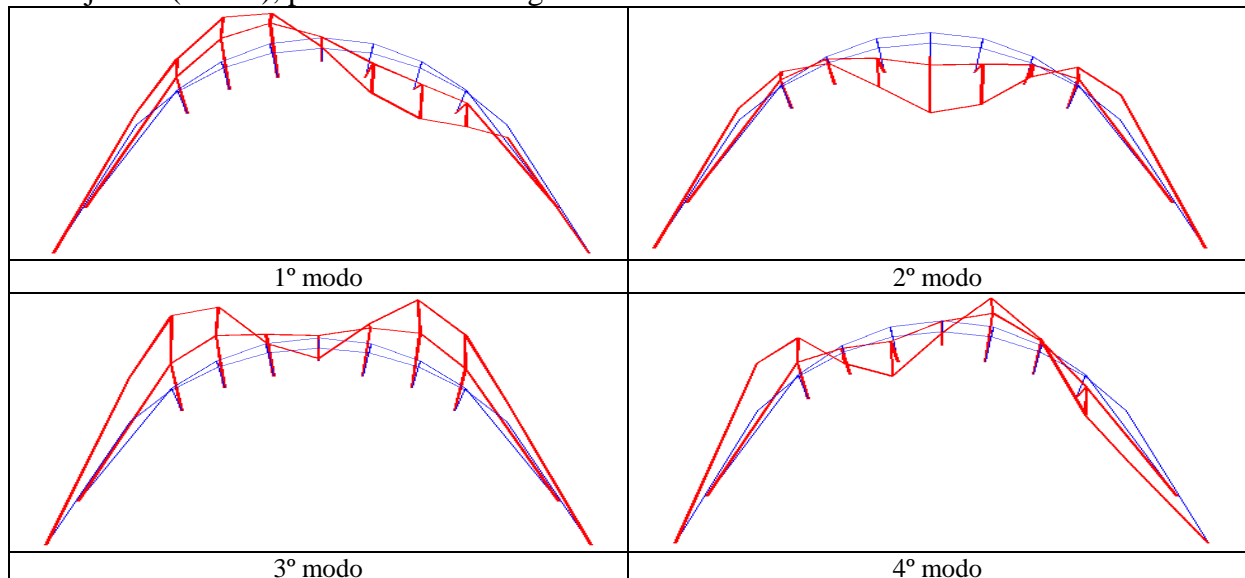


Figura 11. Representação dos 4 primeiros modos identificados a partir do modelo com juntas, para o corpo da barragem encastrado.

4.3 Comparação de resultados numéricos com experimentais

Os resultados experimentais obtidos nos ensaios de vibração forçada e ambiental anteriormente referidos permitem examinar o desempenho dos modelos numéricos. Na Figura 12 apresentam-se os 5 valores experimentais da primeira frequência sobrepostos à linha de influência obtida com os modelos 3DEC, com e sem juntas (Figura 10). Verifica-se que 2 dos valores obtidos para cotas de água entre 260 e 270 m são muito próximos da curva numérica para o modelo com juntas, sendo o terceiro um pouco superior. Os resultados experimentais mostram também a tendência já discutida de redução da frequência, quer para a cota mais alta da água, devido à interação hidrodinâmica, quer para as cotas mais baixas, devido à abertura das juntas de contracção. Estes resultados mostram que os modelos numéricos têm a capacidade de representar os fenómenos físicos dominantes, embora seja ainda necessário o seu aperfeiçoamento e calibração através de mais dados experimentais.

Verifica-se, nomeadamente, que o efeito da interação hidrodinâmica dado pelo modelo de massas associadas parece ser excessivo, uma vez que as frequências experimentais diminuem menos para cotas altas do que os modelos prevêem. Na Figura 13 comparam-se os resultados experimentais com o modelo DTDIN com fundação, já referido, e ainda com outro modelo semelhante em que se reduziram as massas associadas para 70% do valor teórico. Esta redução permite aproximar melhor a tendência dos resultados experimentais, tal como havia sido concluído no ensaio laboratorial já referido [3].

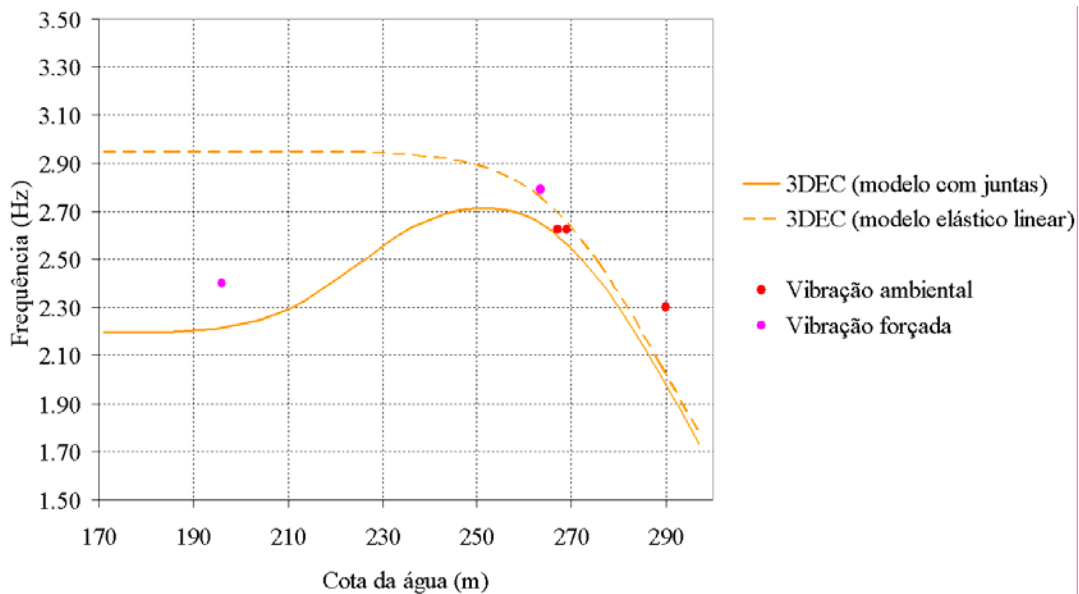


Figura 12. Comparação das linhas de influência do 1º modo de vibração obtidos a partir do 3DEC com os resultados experimentais.

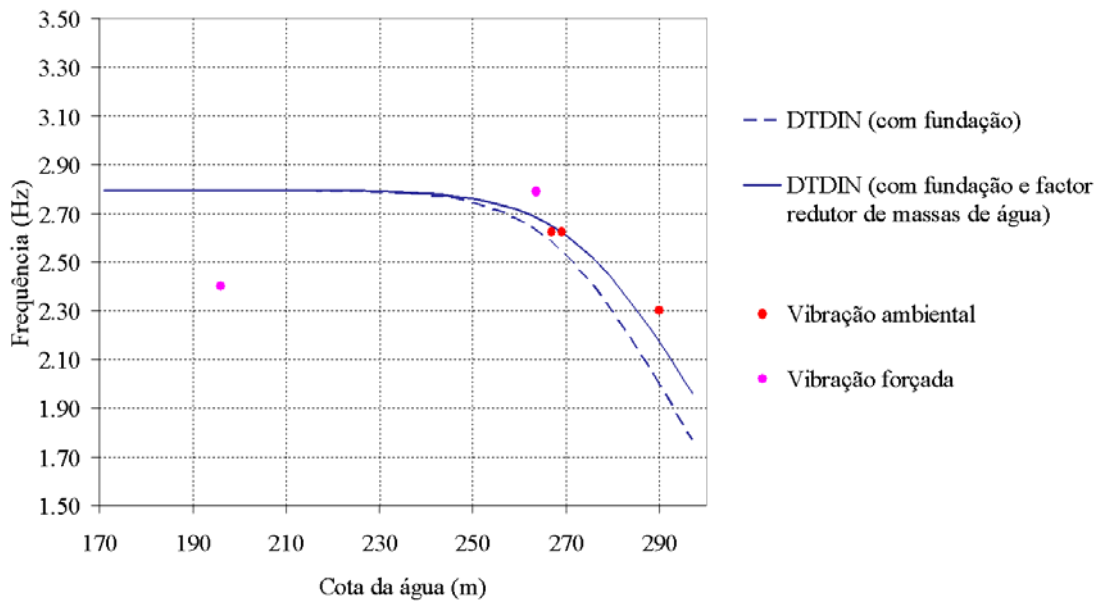


Figura 13. Comparação das linhas de influência do 1º modo de vibração obtidas a partir do DTDIN com resultados experimentais.

5. CONCLUSÕES

No presente artigo, foi apresentado um conjunto de resultados de estudos de investigação em curso no LNEC sobre o comportamento dinâmico de barragens abóbada. Os modelos numéricos utilizados, com as diferenças de hipóteses e formulações discutidas, mostraram um desempenho consistente entre si. A comparação com os resultados experimentais demonstra a capacidade dos modelos numéricos reproduzirem os aspectos fundamentais do comportamento dinâmico destas estruturas. Em especial, é possível representar adequadamente nos modelos os efeitos da interacção hidrodinâmica entre a barragem e a albufeira, e os efeitos do comportamento não linear das juntas de contracção. Existem ainda algumas discrepâncias que requerem o aperfeiçoamento dos modelos, e que só poderão ser resolvidas com um maior volume de dados experimentais. No âmbito de um projecto de investigação em curso, a barragem do Cabril vai ser instrumentada com um sistema de monitorização dinâmica [14], que deverá fornecer dados importantes para a validação dos modelos numéricos, contribuindo para aumentar a fiabilidade das suas previsões.

REFERÊNCIAS

- [1] Borges J. Ferry, Pereira, Jervis, Ravara A., Pedro J., *Seismic Studies on Concrete Dam Models. Symp. on Concrete Dam Models*, LNEC, Paper 22, Lisboa (1963).
- [2] Gomes J., *Análise experimental de cenários de rotura em fundações de barragens de betão. Ensaios estáticos e dinâmicos*. Tese de Especialista do LNEC e Tese de Doutoramento da UFRJ, LNEC, Lisboa, (2005).
- [3] Mendes P. e Oliveira S., *Study of dam-reservoir dynamic interaction using vibration tests on a physical model*, IOMAC 2007, Dinamarca, (2007).
- [4] Azevedo N.M., Câmara R., Lemos J.V., *Modelação numérica da interacção fluído-estrutura através de uma formulação de elementos finitos em deslocamentos*, Relatório LNEC, Lisboa (em preparação) (2007).
- [5] Brincker R., Zhang L., Andersen P., *Output-Only Modal Analysis by Frequency Domain Decomposition*, Proceedings of The ISMA25 Noise And Vibration Engineering Volume 11. Leuven, Belgium, pp. 717-723, September 13-15, (2000).
- [6] Peeters B., *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*. Tese de Doutoramento, (2000).
- [7] Rodrigues J., *Identificação Modal Estocástica. Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, (2004).
- [8] Mendes P., *Observação e Análise do Comportamento Dinâmico de Barragens de Betão sob Excitação Ambiente*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, (2005).
- [9] Oliveira S., *Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulações de dano*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, (2000).
- [10] 3DEC, *Three Dimensional Distinct Element Code, Version 3.0*. Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA (2003).
- [11] Lemos J.V. *Development of an arch dam analysis module for the program 3DEC*, Relatório 316/98 – NDE/NEE, LNEC, (1998).
- [12] Lemos J.V. *Discrete element analysis of dam foundations*, in *Distinct Element Modelling in Geomechanics* (eds. Sharma, Saxena & Woods), Balkema, pp. 89-115 (1999).
- [13] Farinha M. L., Pinho J., *Avaliação da profundidade das principais fendas existentes no paramento de jusante da barragem do Cabril com base em ensaios de ultra-sons*, Relatório 328/2002 – NO, LNEC, (2002).
- [14] PNRG (LNEC-FEUP), *Estudo de processos de deterioração evolutiva em barragens de betão. Controlo da segurança ao longo do tempo*. Programa de Candidatura ao Programa Nacional de Reequipamento Científico da FCT, (2002).