

# ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE UMA BARRAGEM ABÓBADA COM FUNDAÇÃO DIACLASADA\*

Experimental and numerical study of an arch dam on a jointed  
foundation

J.V. LEMOS\*\*

C.A.B. PINA\*\*

C.P. COSTA\*\*

J.P. GOMES\*\*\*

RESUMO - Apresenta-se uma comparação entre modelos físicos e numéricos num estudo de uma barragem abóbada, tendo em vista avaliar a influência na segurança da estrutura de deslizamentos em descontinuidades do maciço rochoso de fundação. No modelo físico geomecânico, a barragem apoiava-se numa fundação de blocos, definidos por 3 famílias de diaclases. Os estudos numéricos foram realizados com um modelo de elementos discretos e conduziram a resultados em boa concordância com o comportamento observado no modelo experimental.

SYNOPSIS - A study of an arch dam by means of physical and numerical models was carried out, with the aim of assessing the influence of rock joint slip on the safety of the structure. A physical model was built, in a geomechanical material, with the foundation composed of blocks defined by three joint sets. Numerical analyses performed with a discrete element model provided a good agreement with the observed behaviour.

## 1 - INTRODUÇÃO

A avaliação do comportamento do maciço rochoso de fundação de uma barragem abóbada é determinante no estudo da segurança da estrutura. Com efeito, os cenários de rotura mais graves para este tipo de obra estão geralmente associados a deslizamentos em superfícies de descontinuidade do maciço de fundação. No projecto destas estruturas há que ter em conta possíveis mecanismos de rotura de volumes de rocha definidos pelas várias famílias de diaclases. Na análise da estabilidade destes volumes utilizam-se, em regra, métodos simples de equilíbrio limite. O desenvolvimento de modelos matemáticos com a capacidade de representar a compartimentação do maciço, como é o caso do método dos elementos discretos, permite dispor actualmente de ferramentas mais elaboradas para estes estudos. Estes métodos, contudo, devem ser validados por meio de resultados experimentais ou de observação das obras. No caso de estudos de rotura, a comparação com modelos físicos é a forma mais adequada de verificar a fiabilidade dos métodos matemáticos e definir as suas condições de utilização.

---

(\*) Comunicação apresentada ao 8º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, Tóquio, Setembro, 1995

(\*\*) Engenheiro Civil, Investigador Principal, LNEC

(\*\*\*) Engenheiro Civil, Assistente de Investigação, LNEC

Neste artigo, apresenta-se um estudo realizado no LNEC, em que se procedeu à comparação entre resultados de modelos físicos e numéricos, o qual teve por base um modelo geomecânico de uma barragem abóbada com uma fundação composta por blocos (LNEC, 1983). Com este modelo, pretendeu-se reproduzir de forma aproximada as três famílias de diaclases existentes no maciço, e ainda considerar a existência de uma descontinuidade horizontal de baixo atrito sob o encontro da margem direita. Os ensaios consistiram na aplicação de uma pressão no paramento de montante da barragem, com medição dos deslocamentos. O objectivo principal do estudo experimental foi avaliar a influência na segurança da obra de possíveis deslizamentos nas diaclases da fundação e, principalmente, na superfície horizontal de baixa resistência.

As simulações numéricas foram realizadas com o programa de elementos discretos 3DEC (Cundall, 1988; Hart et al., 1988). Foi utilizada uma nova versão do programa que inclui um módulo destinado à análise de barragens abóbada, em desenvolvimento no LNEC (Lemos, 1996). Com estes modelos numéricos foi possível reproduzir, de forma aproximada, o comportamento observado, tendo-se verificado que os cálculos permitiram esclarecer melhor certos aspectos do comportamento observado no modelo físico, o que realça o interesse do uso integrado de modelos físicos e numéricos (Pina e Costa, 1993).

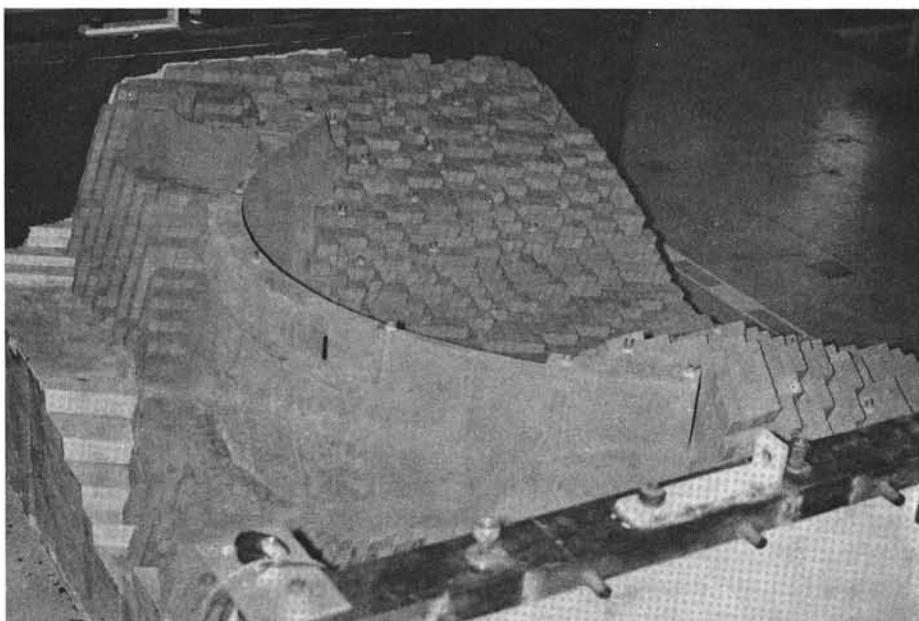


Fig. 1 - Modelo físico da barragem de Cambambe.

## 2 - MODELO FÍSICO

A barragem de Cambambe, em Angola, é constituída por uma abóbada de dupla curvatura com 85 m de altura, de arcos circulares de três centros, com dois encontros de betão, sendo o da margem esquerda protegido da acção directa da pressão hidrostática por um muro de ala cilíndrico. A inserção da barragem varia entre a cota 44 m, no fundo do vale, e a cota 105 m, sob os encontros. O

maciço de fundação é constituído por formações sedimentares heterogêneas, de grés, xistos argilosos e conglomerados, todas intensamente diaclasadas e cortadas por vários sistemas de falhas, e que assentam num fundo rochoso granítico (LNEC, 1984). Foram identificadas três famílias principais de diaclases, uma sub-horizontal e duas sub-verticais com orientação diferente nas duas margens. Ensaio de deslizamento, realizados *in situ* e no laboratório, conduziram a valores do ângulo de atrito entre 27° e 37°. No entanto, na margem direita, cerca da cota 85 m, foram detectadas com maior frequência diaclases sub-horizontais com preenchimento argiloso, que apresentavam valores muito baixos de ângulo de atrito (12° a 16°). O estudo em modelo físico teve como objectivo principal a avaliação da influência destas descontinuidades na segurança da obra.

O modelo físico (Fig. 1), construído à escala 1/200, é composto pela barragem e por uma fundação de blocos (LNEC, 1983). Os blocos são definidos por três famílias de descontinuidades, com orientações distintas nas duas margens, de modo a representar de forma aproximada a compartimentação do maciço rochoso. Neste modelo, foi utilizada uma argamassa de materiais de alta densidade, composta por areia de ilmenite, sílica, zarcão e gesso (Cruz Azevedo et al., 1983), desenvolvida para respeitar as relações de semelhança, entre as escalas de tensões ( $K_{\sigma}$ ), de pesos específicos ( $K_{\gamma}$ ), e geométrica ( $K_L$ ):

$$K_{\sigma} = K_{\gamma} K_L$$

Foram utilizadas composições distintas para a barragem e para os blocos da fundação, de modo a reproduzir as características mecânicas do betão e da matriz rochosa. Os valores das propriedades, referidas ao protótipo, são indicadas na secção seguinte.

Os valores do ângulo de atrito entre os blocos do modelo físico apresentavam uma certa dispersão, com valores entre 25° e 35°. De modo a representar uma eventual diaclase de baixa resistência, foi seleccionada uma descontinuidade horizontal na margem direita, à cota 80 m, 20 m abaixo do encontro. Esta descontinuidade foi tratada com um revestimento de verniz, com o qual foi possível reduzir o ângulo de atrito para valores entre 15° e 20°.

O sistema de carga utilizado baseou-se na aplicação de uma pressão no paramento de montante do modelo por meio de um fluido, contido num saco de borracha, com densidade 1,3, de modo a respeitar as relações de semelhança. Com este sistema foi possível representar não só o diagrama de pressão triangular, correspondente à cota de água no coroamento da barragem, mas também diagramas de pressão de forma trapezoidal, simulando cotas de água superiores (Gomes, 1995). Estes ensaios permitem, portanto, quantificar a segurança da estrutura em relação ao colapso, por majoração das cargas horizontais.

### 3 - MODELO NUMÉRICO

#### 3.1 - Programa de elementos discretos 3DEC

O método dos elementos discretos tem larga utilização em problemas de Mecânica das Rochas, uma vez que permite a representação da compartimentação dos maciços com bastante facilidade. Os modelos mais simples adoptam formulações de blocos rígidos; contudo, no estudo de fundações de barragens é preferível incluir a deformabilidade dos blocos de rocha. Na versão mais recente do programa 3DEC (Itasca, 1994), os blocos deformáveis consistem em volumes de forma poliédrica discretizados numa malha interior de elementos finitos tetraédricos. Na maioria dos casos, esta

discretização conduz a uma aproximação com rigor suficiente, sendo sempre possível refinar a malha em zonas em que se antevê um estado de tensão mais complexo. Para modelar uma estrutura como uma abóbada de betão, no entanto, os elementos tetraédricos não são eficientes, sendo preferível utilizar elementos com funções de interpolação de ordem superior. Com o objectivo de adaptar o programa 3DEC para o estudo destas estruturas, foi desenvolvido um novo módulo, o qual permite optar por uma discretização dos blocos em elementos isoparamétricos do 2º grau, com 20 pontos nodais (Lemos, 1996). No modelo apresentado neste trabalho, estes elementos foram utilizados na barragem, sendo os blocos da fundação modelados com elementos tetraédricos.

A associação dos dois tipos de discretização conduz a uma ferramenta eficiente em problemas de interação estrutura-macizo rochoso. Contudo, do ponto de vista numérico, algumas aproximações são necessárias na modelação do contacto. Os modelos de elementos discretos baseiam-se, em regra, em representações pontuais do contacto entre blocos. As forças de interacção são transmitidas através de pontos de contacto, aos quais são atribuídas áreas de influência, de modo a que as relações constitutivas da descontinuidade se possam expressar em relações tensões-deslocamentos, como é habitual. A não introdução de elementos de junta permite uma maior liberdade na escolha da discretização, e simplifica muito a consideração do regime de grandes deslocamentos. No presente modelo, as faces dos elementos quadráticos são aproximadas por uma superfície poliédrica de faces triangulares, a qual é utilizada no cálculo dos parâmetros geométricos do contacto. Obtém-se, deste modo, um esquema numérico eficiente, consistente com a formulação de contacto habitual em modelos de blocos discretos.

O presente modelo numérico adequa-se bem ao estudo do comportamento até à rotura de barragens abóbada, permitindo considerar cenários de deslizamento em superfícies de descontinuidade, e modelando também a rotura da estrutura de betão, para o qual se admite um comportamento elasto-plástico. O algoritmo de solução adoptado baseia-se no método de relaxação dinâmica, o qual permite a solução de problemas não-lineares de grande dimensão, sem requerer memória excessiva.

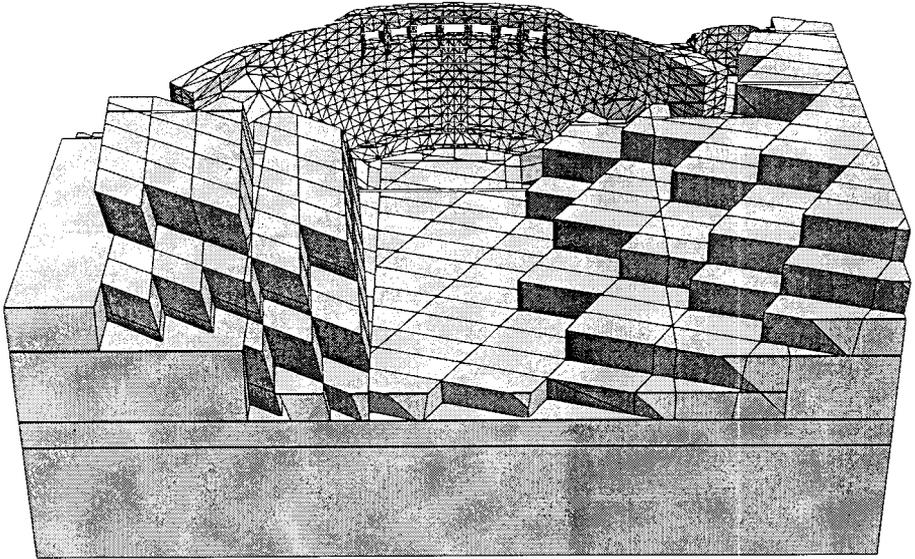
### 3.2 - Representação do modelo físico

No modelo de elementos discretos (Fig. 2), a barragem foi discretizada numa malha de 174 elementos finitos quadráticos de 20 pontos nodais. Para efeitos de representação gráfica, as faces destes elementos curvos são aproximadas por facetas triangulares. O maciço rochoso foi representado por 904 blocos discretos deformáveis, com malha interna de tetraedros. De notar, que se adoptou um espaçamento das descontinuidades quatro vezes superior ao do modelo físico, por forma a reduzir o esforço de cálculo. Uma vez que neste modelo simplificado existe ainda um número elevado de juntas, os principais modos de deformação e rotura do conjunto barragem-estrutura podem ser simulados com aproximação suficiente. Apenas foi necessário corrigir os valores da rigidez das descontinuidades, reduzindo-os por um factor de 4, de modo a manter a deformabilidade global do sistema. O número de graus de liberdade do modelo é de cerca de 31500, tendo os cálculos sido efectuados num micro-computador com 16 Mbytes de memória.

Nos elementos da barragem, adoptou-se um modelo elasto-plástico, com um critério de Mohr-Coulomb não associado, com as seguintes propriedades (referidas ao protótipo):

Módulo de elasticidade	31 GPa	Resistência à tracção	10MPa
Coefficiente de Poisson	0,2	Ângulo de atrito	37°
Coesão	12 MPa	Ângulo de dilatância	0°

(a) Vista de jusante



(b) Vista de montante

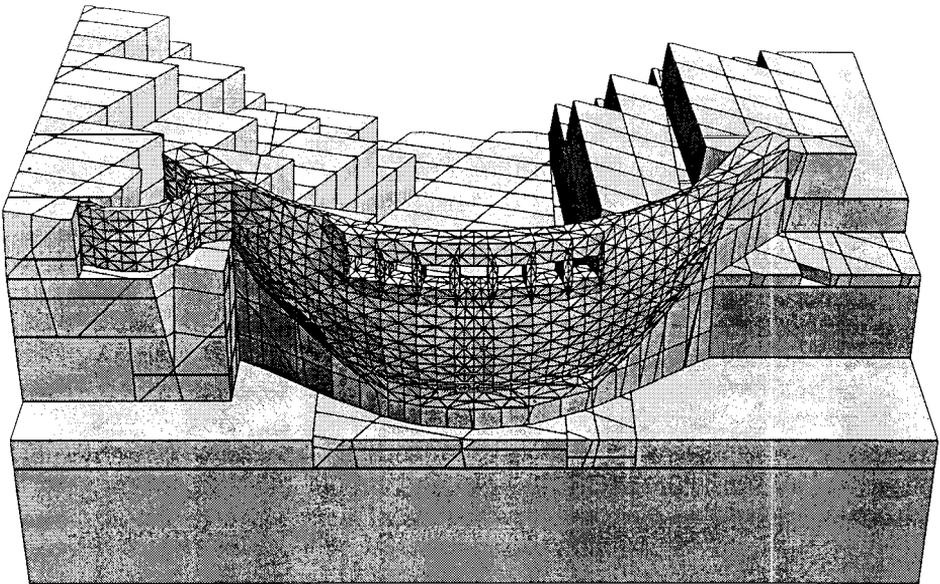


Fig. 2 - Modelo de elementos discretos. (a) Vista de jusante; (b) Vista de montante.

Os blocos da fundação foram considerados elásticos, com as constantes:

Módulo de elasticidade	51 GPa
Coefficiente de Poisson	0,2

Para todas as descontinuidades, foi utilizado um modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, com dilatação nula, e os valores de rigidez:

Rigidez normal	1000 MPa/m
Rigidez tangencial	500 MPa/m

As propriedades resistentes das descontinuidades foram as seguintes:

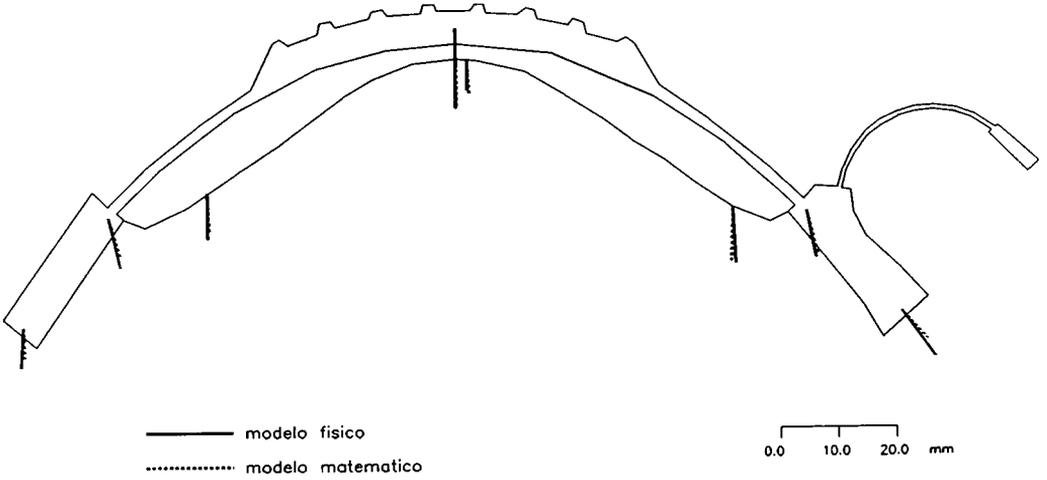
	Diaclases	Descontin. à cota 80	Superfície de fundação
Ângulo de atrito	30°	15°	30°
Coesão	0	0	10 MPa
Resistência à tracção	0	0	6 MPa

#### 4 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

No decurso dos ensaios foram medidos deslocamentos em diversos pontos da barragem e da fundação por meio de deflectómetros. As comparações com o modelo numérico apresentadas neste artigo referem-se a resultados obtidos em duas séries de ensaios. No primeiro grupo de ensaios, o nível do fluido foi elevado até à cota do coroamento (Costa, 1995). Na Fig 3a, comparam-se as componentes horizontais do deslocamento obtidas experimental e numericamente em diversos pontos da barragem: 5 pontos no coroamento e 3 pontos próximos da superfície de inserção. Os valores apresentados referem-se ao protótipo, verificando-se na consola central um deslocamento de 14 mm. Pode observar-se um bom ajuste entre os modelos físicos e numérico, nomeadamente na orientação dos deslocamentos nos encontros, o que reflecte a boa representação da deformabilidade do sistema diaclasado pelo modelo de elementos discretos, uma vez que para este patamar de carga não se produzem deslizamentos significativos nas diaclases.

Numa segunda série de ensaios pretendeu-se levar o sistema à rotura, por aplicação de cargas correspondentes a cotas de água acima do coroamento (Gomes, 1995), o que conduz a diagramas de pressão de forma trapezoidal. Devido a dificuldades com o sistema de carga, principalmente no ajuste do saco ao paramento de montante, o ensaio foi interrompido antes de se atingir a rotura. Em particular, verificou-se alguma falta de contacto na parte superior do paramento, junto ao coroamento, e na zona dos descarregadores. No modelo numérico, procurou-se simular aproximadamente este facto, não aplicando pressão nos 10 m superiores. Na Fig 3b, comparam-se os resultados experimentais e numéricos correspondentes a uma cota de água de 30 m acima do coroamento. Verifica-se um ajuste razoável, com o modelo numérico a reproduzir bem o comportamento global observado, embora se note insuficiente deslocamento nos encontros.

(a) Cota de água no coroamento;



(b) Cota de água 30 m acima do coroamento.

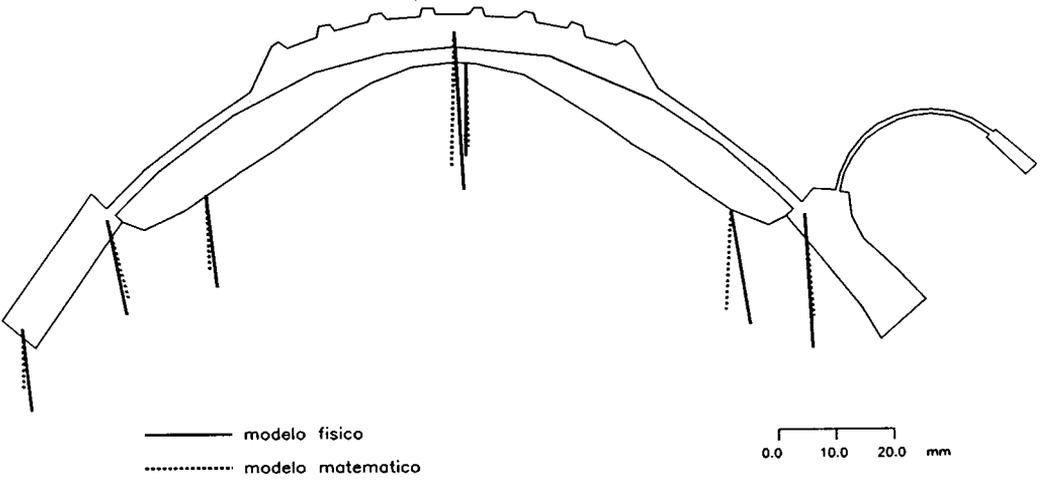


Fig. 3 - Comparação de deslocamentos obtidos nos modelos físico e numérico.  
(a) Cota de água no coroamento; (b) Cota de água 30 m acima do coroamento.

No modelo numérico, os cálculos foram prosseguidos até à rotura da barragem, a qual ocorreu para uma cota de água de 80 m acima do coroamento. Esta rotura é precipitada por um deslizamento na superfície de baixa resistência. Num modelo com a barragem apoiada numa fundação rígida, a rotura deu-se apenas para um nível de água de 130 m acima do coroamento. Conclui-se, portanto, que a presença da descontinuidade à cota 80 m reduz a carga de rotura, embora a margem de segurança da obra ainda seja apreciável, o que poderá ser explicado pela cota relativamente elevada daquela superfície. Este resultado confirma as conclusões obtidas por Dinis (1994), com base num modelo de elementos finitos, em cuja fundação foram representadas apenas as principais superfícies de descontinuidade, utilizando elementos de junta.

## 5 - CONCLUSÕES

Apresentou-se, neste artigo, uma comparação entre estudos realizados em modelos físicos e numéricos, com vista à avaliação da segurança em relação à rotura de uma barragem abóbada com uma fundação diaclasada. Verificou-se uma boa concordância entre o comportamento observado experimentalmente e o simulado numericamente. Para cotas de água ao nível do coroamento, ou pouco acima, obteve-se um bom ajuste quantitativo do campo de deslocamentos. Para cotas superiores, surgiram algumas diferenças, embora o acordo global seja aceitável.

Os modelos de elementos discretos constituem uma ferramenta muito útil no estudo de fundações de barragens, permitindo analisar com facilidade os efeitos do diaclasamento e da existência de falhas ou outras descontinuidades de baixa resistência. Neste trabalho, não se entrou em conta com a acção da pressão de água nas diaclases, uma vez que não existia no modelo físico, embora o modelo numérico permita tal consideração.

Este estudo demonstra finalmente o interesse dos modelos físicos, única via experimental de analisar cenários de rotura em obras como barragens de betão. A informação obtida neste tipo de ensaios é fundamental para a validação de modelos numéricos complexos e definição das suas condições de utilização prática.

## REFERÊNCIAS

- COSTA, C.P. - *Ensaio experimental da barragem de Cambambe*. Relatório, LNEC, 1996 (em preparação).
- CRUZ AZEVEDO, M.; ESTEVES FERREIRA, M.J.; COSTA, C.P. - *The use of geomechanical physical models at LNEC*. Memória nº 731, LNEC, 1988.
- CUNDALL, P.A. - *Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part I: A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 25, pp. 107-116, 1988.
- DINIS, P.M.C.B. - *Modelos de comportamento dos materiais para o estudo à rotura de barragens de betão*. Tese de doutoramento, IST, Lisboa, 1994.
- GOMES, J.P. - *Ensaio em modelos geomecânicos de barragens de betão*. Trabalho de síntese, LNEC, 1995.
- HART, R.D.; CUNDALL, P.A.; LEMOS, J.V. - *Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part II: Mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 25, pp. 117-125, 1988.

- ITASCA - *3DEC - 3-Dimensional Distinct Element Code, Version 1.5, User's Manual*. Itasca Consulting Group, Minneapolis, 1994.
- LEMOS, J.V. - *Desenvolvimento de um módulo do programa 3DEC para o estudo de fundações de barragens abóbada*. Relatório, LNEC, 1996 (em preparação).
- LNEC - *Estudo em modelo geomecânico da Barragem de Cambambe*. Relatório, LNEC, 1983.
- LNEC - *Estudos geotécnicos para o alteamento da Barragem de Cambambe e a construção da central II*. Relatório, LNEC, 1984.
- PINA, C.A.B.; COSTA, C.P. - *Failure analysis of rock foundations by experimental and numerical methods*. In *Dam foundations in rock masses*, pp. 105-128, LNEC, 1993.