

# MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO

## NUMERICAL MODELLING OF THE HYDRAULIC BEHAVIOUR OF CONCRETE DAM FOUNDATIONS

Farinha, Maria Luísa Braga, *LNEC, Lisboa, Portugal, lbraga@lnec.pt*

Lemos, José Vieira, *LNEC, Lisboa, Portugal, vlemos@lnec.pt*

Castro, António Tavares, *LNEC, Lisboa, Portugal, tcastro@lnec.pt*

### RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre a representação em modelos numéricos do escoamento na fundação de barragens de betão. Procura-se salientar a influência nos resultados quando, em modelos tridimensionais, se simplifica a representação da rede de drenagem. Apresenta-se uma aplicação ao estudo do escoamento na fundação de uma barragem abóbada, em que os resultados numéricos são comparados com as observações efectuadas na obra. Os cálculos foram efectuados recorrendo aos programas FLAC e 3DEC.

### ABSTRACT

In this paper a study about numerical modelling of seepage through the foundations of concrete dams is presented. Special reference is made to the effect of representing the drainage curtain in a simplified manner in 3D models. An example of application to the study of flow in an arch dam foundation is presented, which includes the comparison of the numerical results to the monitoring data on the hydraulic performance. The numerical analyses were performed with the codes FLAC and 3DEC.

### 1. INTRODUÇÃO

O controlo de segurança das barragens baseia-se, fundamentalmente, na interpretação dos resultados da observação do comportamento do conjunto barragem-fundação-albufeira. Esta interpretação deve ter em conta os resultados de modelos matemáticos representativos do comportamento em análise, bem como os resultados de ensaios de caracterização das propriedades mecânicas, térmicas e hidráulicas dos materiais constituintes da estrutura.

O estudo do comportamento hidráulico dos maciços rochosos de fundação das grandes barragens é particularmente difícil porque os maciços são, em regra, estruturas descontínuas, com elevados graus de heterogeneidade e de anisotropia. Os trabalhos de melhoria das características mecânicas dos maciços (injecções de consolidação), de controlo do escoamento das águas provenientes da albufeira (cortina de impermeabilização) e de alívio e verificação dos valores das subpressões instaladas na base da estrutura (cortina de drenagem e rede piezométrica), usualmente efectuados durante a fase construtiva, tornam as características dos maciços ainda mais complexas. Esta complexidade dificulta não só os estudos de caracterização das propriedades dos maciços e a observação do seu comportamento, mas também a elaboração de modelos matemáticos detalhados. O escoamento efectua-se principalmente através das descontinuidades dos maciços. No entanto, na maioria dos casos, dada a falta de informação sobre a geometria e as propriedades hidráulicas das descontinuidades, é difícil aplicar modelos

de meio descontínuo, pelo que é usual estudar o comportamento hidráulico de fundações de barragens recorrendo a modelos de meio contínuo equivalente.

Na análise do comportamento hidráulico da fundação de barragens os modelos planos de secções verticais da fundação são úteis, dada a sua simplicidade, e podem ser usados em zonas em que a geometria da barragem não varie na direcção perpendicular e em que se possa admitir que o escoamento se processa no plano do modelo. Contudo, para estudar o escoamento com detalhe deve-se recorrer a modelos tridimensionais. Nestes modelos, dada a dimensão dos problemas, é muitas vezes necessário simplificar a representação da rede de drenagem.

Neste trabalho os cálculos bi e tridimensionais são efectuados recorrendo aos programas FLAC e 3DEC, respectivamente [6, 7]. Para analisar o desempenho dos dois programas para o mesmo problema foi estudado o escoamento numa camada horizontal, em que os resultados de um modelo tridimensional foram comparados com os do modelo plano e com a solução analítica. Este estudo, cujos resultados se apresentam, permitiu analisar o efeito do modo de representação do dreno (com o seu diâmetro ou pelo eixo) e do refinamento da discretização em escoamentos predominantemente radiais. Apresentam-se os resultados de um estudo sobre a representação da fundação em modelos numéricos tridimensionais, referindo-se, em particular, a análise do efeito da permeabilidade da cortina de impermeabilização e do refinamento da discretização. Os resultados de um modelo tridimensional são comparados com os de um modelo plano equivalente, utilizando a mesma malha e o mesmo programa de cálculo. Por fim, apresenta-se uma aplicação ao estudo do escoamento na fundação de uma barragem abóbada, em que os resultados numéricos são comparados com as observações efectuadas na obra.

## **2. ESCOAMENTO NUMA CAMADA HORIZONTAL**

O desempenho dos dois programas utilizados neste trabalho foi comparado estudando o escoamento numa camada horizontal da fundação de uma barragem, onde são conhecidas as cargas hidráulicas a montante e a jusante [1]. Este modelo, que não considera a existência da cortina de impermeabilização, equivale a considerar que o escoamento, laminar, se dá entre uma fenda vertical que parte do pé do paramento de montante, onde se estabelece a pressão da albufeira, e uma fenda vertical que parte do pé do paramento de jusante, onde se estabelece a pressão da água a jusante. Deste modo, o caudal que entra no modelo por montante subdivide-se numa parcela que se escoia pelos drenos e noutra que passa para jusante.

Foram feitos estudos, recorrendo a este tipo de modelo [4, 5] em que os resultados numéricos, obtidos com diversas malhas bi e tridimensionais, são comparados com a solução analítica [1]. Na Figura 1 apresentam-se duas das malhas adoptadas. O estudo efectuado permitiu concluir que no caso em que o dreno, com 0,076 m de diâmetro, é representado pelo eixo o elemento da malha mais próximo do eixo não deve ser inferior a 27 cm. De referir que a representação do dreno pelo eixo se destina a permitir uma malha mais larga, para diminuir os tempos de cálculo.

A representação individual de todos os drenos em modelos tridimensionais da fundação de barragens origina malhas muito refinadas, de difícil utilização. Sempre que possível recorre-se a modelos planos, representativos de secções verticais do maciço de fundação. Nestes modelos, a representação da cortina de drenagem equivale à consideração de uma hipotética vala contínua que se desenvolve na direcção perpendicular à secção representada, pelo que os caudais drenados calculados são sobreestimados. Os estudos efectuados permitiram concluir que, no escoamento em camadas horizontais, quando em vez de considerar a existência da linha de drenagem se considera uma vala contínua na linha dos drenos, o caudal aumenta

- i) 15%, se os drenos de 0,076 m de diâmetro estão afastados de 3,0 m;
- ii) 45%, se os drenos de 0,076 m de diâmetro estão afastados de 6,0 m.

### a) Modelo plano



### b) Modelo tridimensional

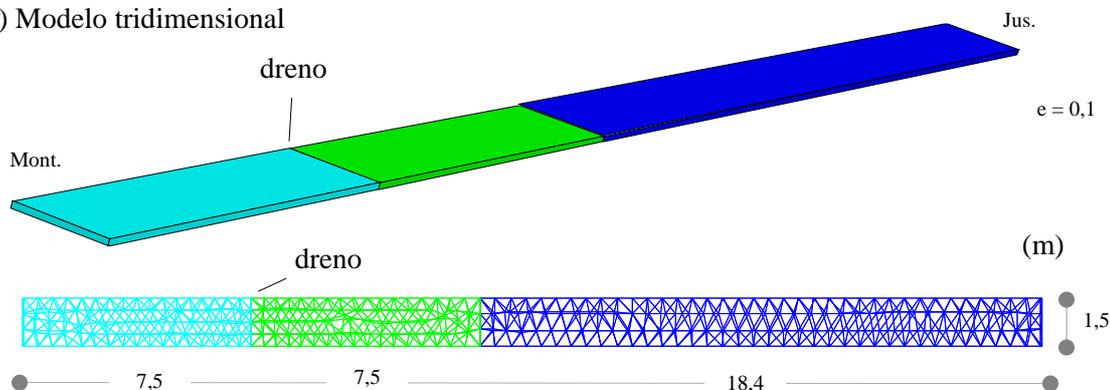


Figura 1 - Escoamento horizontal: a) malha adoptada no modelo plano e b) representação esquemática do domínio no modelo tridimensional (divisão em blocos e discretização interna).

## 3. MODELAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO ESCOAMENTO NA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM

### 3.1 Características do modelo

Neste trabalho, no estudo do escoamento na fundação de barragens recorrendo a modelos tridimensionais utilizaram-se, como referência, as dimensões de uma faixa vertical da fundação sob a consola central da barragem de Alqueva. O modelo considerado, com  $150,0 \times 78,0 \times 1,5$  m<sup>3</sup> foi dividido em treze blocos, discretizados em 189076 tetraedros, com um total de 49910 vértices (Figura 2). A divisão em blocos não tem significado físico, apenas facilita a geração da malha.

Admite-se que a cortina de impermeabilização, que atravessa toda a espessura do modelo, tem 1m de largura. Tirando partido da simetria, analisa-se o escoamento numa faixa correspondente a meia distância entre drenos, pelo que o modelo tem apenas 1,5 m de espessura. O dreno é representado pelo seu eixo (diâmetro nulo) e localiza-se na fronteira do modelo ( $z = 1,5$  m). Procurou-se não só que a malha fosse mais refinada na proximidade do dreno, mas também respeitar a posição das cortinas de impermeabilização e de drenagem. Assim, a malha foi definida pela dimensão média dos lados dos tetraedros, que aumenta, radial e gradualmente, de 0,4 m até 0,8 m, a partir do ponto superior do dreno até à fronteira exterior dos oito blocos centrais, que rodeiam as cortinas de impermeabilização e drenagem. Nos restantes blocos a dimensão média dos lados dos elementos é de 1,0 m. O número de elementos em espessura diminui gradualmente de 4 até 1 desde a zona superior do dreno até à fronteira inferior. Na Figura 3 indica-se a posição da cortina de impermeabilização e do dreno, cujo comprimento é cerca de metade do da cortina e, na malha, é limitado inferiormente pela junta horizontal, e representam-se os blocos que os rodeiam. Na mesma figura é apresentado um pormenor, na vizinhança do dreno, da malha de tetraedros gerada automaticamente.

Admite-se que o maciço de fundação é homogéneo e isótropo, com uma permeabilidade de  $1,0 \times 10^{-7}$  m/s. A cortina de impermeabilização tem uma inclinação para montante de 20°, localiza-se a cerca de 7,0 m do paramento de montante e tem 41 m de comprimento. A cortina de

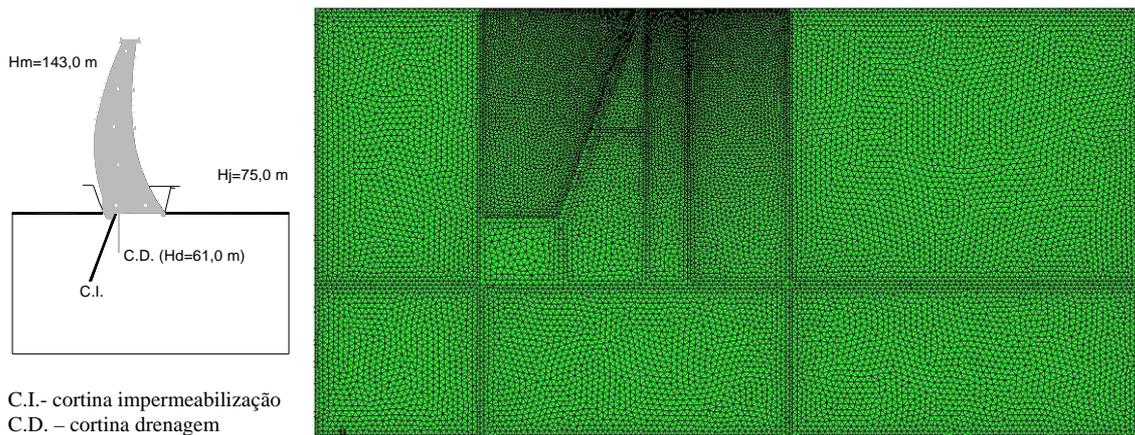


Figura 2 – Modelo tridimensional da fundação da barragem de Alqueva. Representação esquemática do domínio. Divisão em blocos e discretização interna dos blocos.

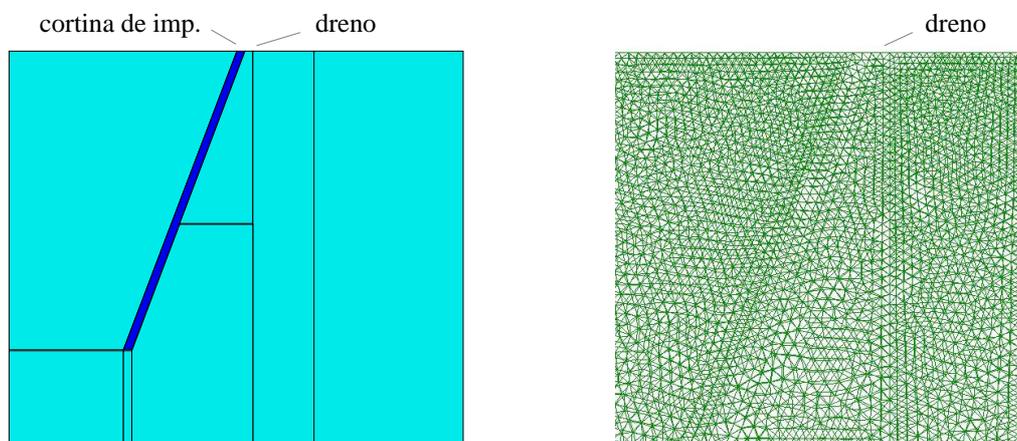


Figura 3 – Divisão em blocos da zona central da malha com representação da cortina de impermeabilização e do dreno e discretização interna do domínio na vizinhança do dreno.

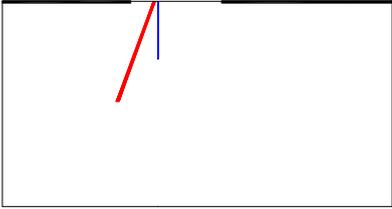
drenagem, localizada cerca de 0,5 m a jusante da cortina de impermeabilização, tem uma inclinação de  $5^\circ$  para montante, mas considera-se simplificada que é vertical. Os drenos têm 25,0 m de comprimento, 0,076 m de diâmetro e, como já foi referido, estão afastados de 3,0 m. Nos cálculos que se apresentam considera-se a albufeira à cota 143,0 m e a água a jusante da obra à cota 75,0 m. A pressão na boca dos drenos é nula.

Um estudo efectuado para definir as condições de fronteira mais adequadas para a análise do escoamento na fundação de barragens, em que se compararam os caudais e as equipotenciais na fundação para diversas situações [5], permitiu concluir que se devem admitir impermeáveis as superfícies de fronteira verticais, inferior e de inserção da barragem na fundação.

### 3.2 Efeito da permeabilidade da cortina

Para estudar o efeito da permeabilidade da cortina foram comparados os caudais e as equipotenciais na fundação nas situações de cortina 10, 100 e 1000 vezes menos permeável que o maciço. De referir que esta última situação corresponde, na prática, a simular uma cortina totalmente impermeável. No Quadro 1 apresentam-se os caudais obtidos e na Figura 4 as equipotenciais calculadas quando a cortina é 10 e 100 vezes menos permeável que o maciço.

Quadro 1 - Caudais calculados para  $k_{cortina}/k_{maciço} = 0,1; 0,01$  e  $0,001$ .

Condições de fronteira	$\frac{k_{cortina}}{k_{maciço}}$	Caudal ( $\times 10^{-6}$ ) ( $m^3/s$ )		
		montante	dreno	jusante
Hm=143,0 m   Hd=61,0 m   Hj=75,0 m	<b>0,1</b>	-13,792	13,303	0,3821
	<b>0,01</b>	-7,5598	7,2569	0,1910
	<b>0,001</b>	-5,5124	5,2863	0,1111

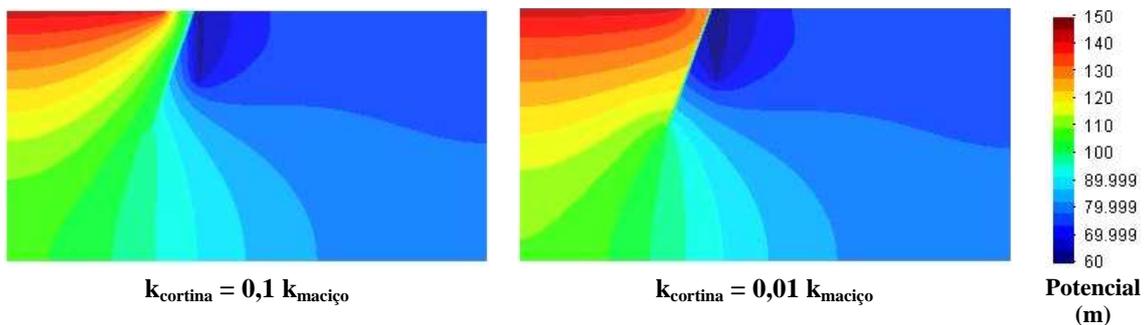


Figura 4 – Modelo tridimensional. Equipotenciais ( $H_m = 143,0$  m;  $H_j = 75,0$  m).

A análise dos valores apresentados no Quadro 1 permite concluir que, em relação à situação de cortina impermeável, os caudais de montante e afluentes ao dreno aumentam cerca de 37% e de 150% quando a cortina é 100 ou apenas 10 vezes menos permeável que o maciço, respectivamente. A diminuição da permeabilidade da cortina conduz a uma redução significativa dos caudais, mas, como se pode observar na Figura 4, tem, a jusante da cortina, pouca influência no valor dos potenciais.

### 3.3 Efeito da discretização

Para estudar o efeito do refinamento da discretização foi definida outra malha, semelhante à apresentada na figura 2, mas mais larga, em que a dimensão média dos lados dos tetraedros aumenta, radial e gradualmente, de 0,75 m até à espessura do modelo (1,5 m), a partir do ponto superior do dreno até à fronteira exterior dos oito blocos centrais. Nos restantes blocos a dimensão média dos lados dos elementos é de 1,5 m. Esta malha fica assim discretizada em 37422 tetraedros com 13107 vértices, ou seja, cerca de 20% do número de elementos e 26% do número de nós da malha do modelo inicial. A nova malha possui dois elementos em espessura nas proximidades do dreno e apenas um no restante domínio.

Nas duas malhas referidas no parágrafo anterior a dimensão média dos lados dos tetraedros aumenta radial e gradualmente, a partir do ponto superior do dreno até à fronteira exterior dos oito blocos centrais. A malha mais apertada possui, na zona superior do dreno, quatro elementos em espessura, pelo que a dimensão média dos lados dos tetraedros mais próximos da boca do dreno é de 0,375 m. No entanto, à cota da extremidade inferior do dreno, na zona onde aflui a maior parte do caudal, a malha possui apenas dois elementos em espessura. Assim, foi ainda definida outra malha, a partir da primeira, com uma zona mais refinada nas proximidades do

dreno, ao longo de todo o seu comprimento, em que a dimensão média dos lados dos elementos é de 30 cm. Esta malha, constituída por 20 blocos, tem 241303 tetraedros e 61949 vértices.

No Quadro 2 apresenta-se o valor dos caudais calculados com cada uma das malhas, admitindo que a permeabilidade da cortina é 100 vezes inferior à do maciço. A análise dos valores apresentados permite concluir que com a malha larga o caudal afluente ao dreno é apenas 5,7% superior ao obtido com a malha mais apertada. De referir que cerca de 42% do caudal drenado entra no dreno pelos seus 5,0 m inferiores. Os gráficos das equipotenciais calculadas com as três malhas são praticamente coincidentes, devendo-se as diferenças observadas ao facto de o número de elementos em espessura, em cada cota, ser diferente em cada um dos modelos. De referir que com a malha mais apertada a convergência no regime permanente é atingida ao fim de cerca de  $4,6 \times 10^5$  passos, o que corresponde, aproximadamente, a 27,5 horas de cálculo. Com a malha mais larga a convergência é obtida ao fim de cerca de  $1,32 \times 10^5$  passos, o que corresponde a cerca de hora e meia de cálculo.

Dos resultados apresentados pode-se concluir que a ampliação da zona em estudo, aumentando a espessura do modelo de modo a analisar o escoamento numa faixa de dimensão superior a meia distância entre drenos, e a eventual adopção de elementos com lados de dimensão superior, deve introduzir erros no valor dos caudais dentro de limites que se podem considerar aceitáveis e pequenas variações nos valores do potencial.

Quadro 2 – Efeito da discretização. Caudais calculados com diferentes malhas.

Modelo	Caudal ( $\times 10^{-6}$ ) (m <sup>3</sup> /s)		
	montante	dreno	jusante
Malha mais apertada (mais refinada na proximidade do dreno, ao longo de todo o seu comprimento)	7,5522	7,1602	0,2417
Malha apertada	7,5598	7,2569	0,1910
Malha larga	7,6421	7,5667	0,0377

### 3.4 Comparação dos resultados de um modelo tridimensional com os de um modelo plano equivalente

De modo a comparar os resultados de um modelo tridimensional com os de um modelo plano, sem introduzir alterações nos valores devido à utilização de malhas ou programas de cálculo diferentes, foi simulado um cálculo plano com o programa 3DEC, impondo, na linha de drenagem, o mesmo potencial através da espessura do modelo (corresponde a admitir a existência de uma vala contínua na linha de drenos, tal como nos modelos planos). Uma vez que a malha é a mesma, elimina-se o efeito da discretização.

A análise do valor dos caudais permitiu concluir que o caudal afluente ao dreno no modelo tridimensional é aproximadamente 94% do caudal que afluiria a uma vala. Assim, na situação de drenos com 0,076 m de diâmetro afastados de 3,0 m, se se impuser, num modelo plano, uma pressão nula na boca dos drenos, o caudal afluente ao dreno é apenas 6% superior ao que se obtém num cálculo tridimensional. De referir que, no caso de drenos afastados de 6,0 m, o valor é aproximadamente 84%.

O cálculo plano foi repetido impondo na vala o valor médio do potencial no plano dos drenos, 63,03 m, determinado tendo em conta a variação do valor médio do potencial em profundidade e a área de influência de diferentes níveis. No Quadro 3 apresentam-se, para comparação, os caudais calculados com os modelos tridimensional e plano, admitindo, neste caso, duas

hipóteses para o valor do potencial na boca dos drenos: i) igual à cota da boca; ii) igual ao valor médio do potencial no plano dos drenos. Os valores apresentados permitem verificar que impondo no modelo plano o valor médio do potencial na linha dos drenos, que é um pouco superior ao potencial na boca dos drenos, o caudal afluyente à vala diminui, aproximando-se do valor do caudal afluyente aos drenos no modelo tridimensional (apenas 0,5% superior). As curvas de variação do potencial ao longo de linhas horizontais a diversas cotas, permitiram verificar que a 5,0 m da linha dos drenos as diferenças no valor dos potenciais calculados com os dois modelos são inferiores a 1%, pelo que, a essa distância, os resultados dos modelos plano e tridimensional são praticamente iguais.

Quadro 3 - Caudais calculados com o modelo tridimensional e com o modelo plano.

	Modelo	Caudal ( $\times 10^{-6}$ ) ( $m^3/s$ )		
		montante	dreno	jusante
3 D	$H_d = 61,0$ m (cota da boca do dreno)	-7,560	7,257	0,191
	$H_d = 61,0$ m (cota da boca do dreno)	-7,728	7,712	-0,095
2 D	$H_d = 63,03$ m (valor médio do potencial na linha dos drenos)	-7,584	7,294	0,177

## 4. ESCOAMENTO NA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM ABÓBADA

### 4.1 Características gerais da obra e resultados da observação

A barragem de Alqueva situa-se no rio Guadiana e integra-se num grande empreendimento de fins múltiplos, destinado à rega, à produção de energia e ao abastecimento de água. A estrutura, do tipo abóbada de dupla curvatura, tem 96 m de altura máxima e dispõe de uma central do tipo pé de barragem, limitada a jusante por um muro-barragem, em betão, com 55m de altura máxima. Este muro-barragem protege a central e a subestação das águas da albufeira da barragem de Pedrógão e permite criar uma zona a jusante com altura de água suficiente para o funcionamento em bombagem dos grupos da central de Alqueva.

O maciço de fundação da barragem é constituído por xistos verdes de boas características resistentes, na margem direita e fundo do vale, e por filádios com maior deformabilidade na margem esquerda.

Para controlo e observação do escoamento foram executadas, a partir das galerias gerais de drenagem da barragem e do muro-barragem de jusante, as cortinas de impermeabilização e de drenagem, e a rede piezométrica, que em alguns blocos é constituída por leques piezométricos para observação de subpressões na direcção montante-jusante (Figura 5).

Para a determinação da permeabilidade da fundação foram efectuados ensaios do tipo Lugeon na abertura de furos verticais feitos a meio da base de cada um dos blocos. Os ensaios foram efectuados já com a barragem construída, mas sem ter ainda sido executada a cortina de impermeabilização.

Ao longo do primeiro enchimento da barragem de Alqueva, que ainda está a decorrer, têm sido observados, na fundação da zona central da barragem, caudais drenados pequenos e subpressões de valor reduzido. O comportamento hidráulico da fundação do muro-barragem é muito condicionado pelo nível da água a jusante.

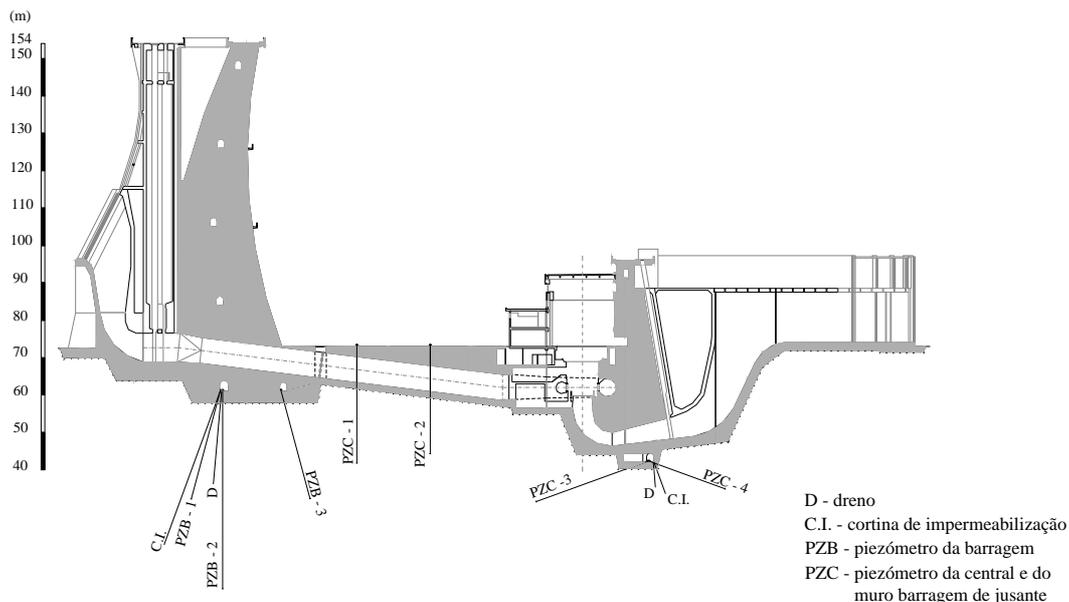


Figura 5 - Corte pela seção central da barragem de Alqueva.

#### 4.2 Modelo matemático de representação do escoamento hidráulico

Para representar o escoamento na fundação foi adoptado um modelo matemático bidimensional da zona da fundação sob a zona central da obra. O modelo considerado, com cerca de  $1000 \times 500 \text{ m}^2$ , tem as fronteiras suficientemente afastadas da zona de influência da obra. Apesar do escoamento se efectuar principalmente através das discontinuidades do maciço rochoso de fundação, admite-se que o espaçamento dessas discontinuidades é suficientemente pequeno à escala da obra para que possa ser considerado equivalente ao escoamento em materiais porosos, pelo que se adopta um modelo contínuo. Admite-se que os materiais apresentam permeabilidades homogéneas e isotrópicas e que o escoamento é laminar.

Na definição da malha procurou-se que o refinamento fosse maior na proximidade dos drenos e que a relação entre os lados dos elementos não fosse superior a 10. A malha adoptada tem um total de 3596 elementos. Cada uma das cortinas de impermeabilização, sob a base do bloco central e sob o muro barragem de jusante, é simulada por uma fiada de elementos com 1 m de largura. Os drenos e piezómetros, cujas posições se respeitam, são representados por linhas de comprimento igual ao dos furos feitos na fundação da obra.

A malha adoptada é composta por três zonas com permeabilidades ( $k$ ) diferentes: de acordo com os resultados de ensaios de permeabilidade efectuados, considera-se que, na zona em estudo, a permeabilidade da fundação é de  $1,0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  acima da cota 48,0 m e de  $0,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  abaixo dessa cota; nas cortinas de impermeabilização admite-se uma permeabilidade de  $0,5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ .

#### 4.3 Comparação dos resultados da observação com os resultados numéricos

No Quadro 4 apresentam-se os valores médios dos caudais observados na fundação da zona central da obra, em diversas datas, e os correspondentes valores calculados com o modelo numérico. As épocas analisadas, com a albufeira e a água a jusante a diferentes cotas, correspondem às datas do 2º patamar de enchimento (em que a pressão hidrostática corresponde a 82% da que vai ser atingida no NPA), e dos dias em que, até final de 2005, foram atingidos os níveis mais elevados a montante e a jusante, respectivamente. A análise dos valores permite concluir que os caudais calculados são da ordem de grandeza dos observados, embora na

Quadro 4 – Valor médio dos caudais observados. Comparação com resultados numéricos.

data	$H_m$ (m)	$H_j$ (m)	Valor médio dos caudais na zona central da obra ( $\times 10^6$ ) ((m <sup>3</sup> /s)/m)			
			Observados		Calculados	
			barragem	muro-barragem	Barragem	muro-barragem
2004.01.07	143,0	75,00	1,80	1,58	3,17	1,66
2004.05.11	148,53	74,83	3,36	1,49	3,38	1,69
2005.11.29	145,01	80,60	2,29	1,38	3,33	1,83

barragem tenham, para os níveis mais baixos da albufeira, diferenças superiores a 45%. Esta diferença deve-se ao facto de no modelo se terem utilizado os mesmos valores da permeabilidade nos diferentes cálculos, não tendo tido em consideração a variação da permeabilidade com o estado de tensão.

Na Figura 6 apresentam-se as equipotenciais calculadas na fundação da obra admitindo os níveis observados em 2005.11.29, e, na Figura 7, para a mesma data, a variação do potencial ao longo dos furos piezométricos feitos a partir das galerias da base da consola central (PZB 1, 2 e 3). De referir que, na data em análise, no piezómetro PZB - 2 os potenciais observados na fundação da zona central da obra variam entre 62,0 m e 74,0 m, com o valor médio de 67,2 m.

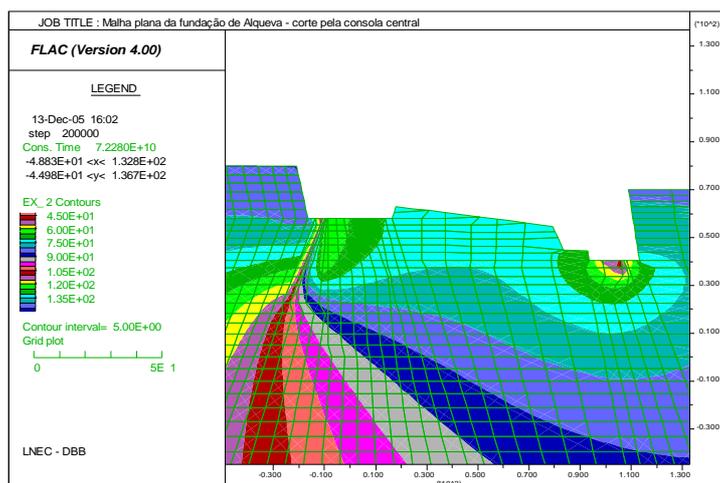


Figura 6 – Equipotenciais ( $H_m = 145,01$  m;  $H_j = 80,60$  m).

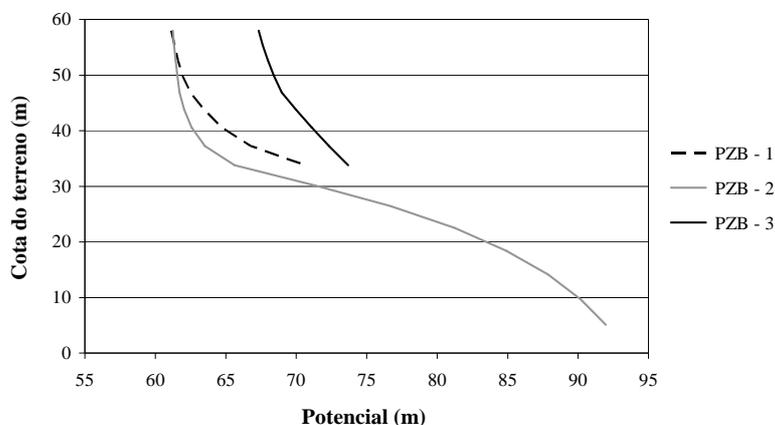


Figura 7 – Variação do potencial ao longo de furos piezométricos (modelo numérico).

## 5. CONCLUSÕES

Embora em casos particulares se possam utilizar modelos planos, o escoamento na fundação de barragens deve ser estudado recorrendo a modelos tridimensionais. No entanto, em modelos globais da fundação, com malhas relativamente largas, pode não ser possível a representação de drenos isolados, pelo que é necessário ter em conta a influência de simplificar a representação da rede de drenagem.

O estudo efectuado permitiu concluir que se uma rede de drenagem, com drenos de 0,076 m de diâmetro afastados de 3,0 m, for modelada por uma vala contínua à boca da qual se impõe uma pressão nula, o caudal afluente à vala é 6% superior ao que afluiria à rede de drenagem. No caso de drenos afastados de 6,0 m o aumento no valor do caudal é de 16%. No entanto, se se impuser na vala o valor médio do potencial no plano dos drenos, o caudal determinado é praticamente igual ao que se obtém num modelo tridimensional em que se representa cada um dos drenos.

Os modelos numéricos devem ser validados e aperfeiçoados através da comparação dos resultados obtidos com os resultados da observação hidráulica da fundação, nomeadamente caudais drenados e subpressões observadas nos diversos furos piezométricos executados na fundação das obras. Os resultados numéricos obtidos permitem verificar que a variação do potencial ao longo dos furos piezométricos é grande (Figura 7). No entanto, na maioria das barragens existentes em Portugal, estes valores obtidos com modelos numéricos não se conseguem validar com os resultados da observação, uma vez que os piezómetros instalados são de câmara longa e única, pelo que cada piezómetro indica apenas um valor de pressão. Na sequência do trabalho que se apresenta estão a ser programados, para melhorar a caracterização do comportamento hidráulico da zona da fundação da barragem de Alqueva em estudo e validar os valores da subpressão observados, ensaios de admissão de água com obturador duplo, que permitem determinar os potenciais em troços dos furos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EDIA, Empresa de Desenvolvimento e Infra-Estruturas do Alqueva, SA a autorização concedida para a publicação de elementos referentes à barragem de Alqueva.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Andrade, R.M. 1982 – “A drenagem nas fundações das estruturas hidráulicas. Análise e interpretação prática”. ENGEVIX, S. A. – Estruturas e Projectos de Engenharia. Rio de Janeiro.
- [2] Bear, J. 1988 – “Dynamics of fluids in porous media”. Dover Publications.
- [3] Castro, A.T.; Farinha, M.L.B.; Muralha, J. 2005 – “Análise do comportamento hidráulico da fundação do muro-barragem jusante de Alqueva”. Rel. 312/05–NO/NFOS, LNEC. Lisboa.
- [4] Farinha, M.L.B.; Lemos, J.V. 2005 – “Representação em modelos numéricos da rede de drenagem de fundações de barragens de betão”. Comunicação apresentada nas 2<sup>as</sup> Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, LNEC, 29-30 Setembro. Lisboa.
- [5] Farinha, M.L.B.; Lemos, J.V. 2005 – “Modelação numérica tridimensional do escoamento em fundações de barragens de betão”. Comunicação apresentada no seminário Barragens, Tecnologia e Interação com a Sociedade, LNEC, 27-29 Outubro. Lisboa.
- [6] ITASCA – FLAC 2002 – Fast Lagrangean Analysis of Continua. Versão 4.0 User’s Manual. Itasca Consulting Group, Minneapolis.
- [7] ITASCA – 3DEC 2003 – 3 Dimensional Distinct Element Code. Versão 3.0 User’s Manual. Itasca Consulting Group, Minneapolis.