

# ANÁLISE DO EFEITO DE NOORDEBERGUM POR MEIO DE MODELAÇÃO NUMÉRICA\*

## Analysis of the Noordebergum effect by numerical modelling

por  
RUI M. CORREIA\*\*

RESUMO — Descreve-se a análise de dois ensaios de bombagem por meio de um modelo numérico baseado na implementação da teoria de consolidação de Biot pelo método dos elementos finitos. Mostra-se que o modelo é capaz de reproduzir as manifestações do efeito de Noordebergum que foram observadas durante os ensaios. São apresentadas algumas considerações respeitantes à natureza dos mecanismos que estão na origem desse fenómeno de subida inicial da pressão da água.

SYNOPSIS — The analysis of two pumping tests, by means of a numerical model based on the finite element implementation of Biot's consolidation theory, is described. It is shown that the model is able to reproduce the observed manifestations of the Noordebergum effect. Some considerations are presented concerning the mechanisms that account for the inverted pore water pressure responses.

## 1 — INTRODUÇÃO

As análises de escoamentos de água subterrânea em regime variável que têm em consideração a deformabilidade do meio poroso são geralmente realizadas por meio de teorias de consolidação não acopladas. Tais teorias, que se baseiam em hipóteses simplificativas respeitantes à direcção do escoamento, ao modo de deformação e à evolução das tensões totais, permitem dissociar os fenómenos de escoamento da água subterrânea e de deformação do meio poroso no qual esse escoamento tem lugar. As formulações matemáticas dessas teorias conduzem à integração de uma equação diferencial de difusão na qual a única incógnita é a pressão da água.

\* Versão em língua portuguesa de uma comunicação apresentada na IX Conferência Europeia de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Dublin, Agosto/Setembro de 1987.

\*\* Engenheiro Civil, Investigador Principal do LNEC.

Apesar da sua natureza aproximada, as teorias não acopladas são muito utilizadas na análise dos escoamentos de água subterrânea. Existem várias soluções analíticas baseadas nessas teorias, especialmente para problemas axisimétricos relativos à extracção de caudal de um único poço (Hantush, 1964).

No decurso de alguns ensaios de bombagem tem sido observado que, em certas zonas, a pressão da água acusa inicialmente uma subida. Este fenómeno é conhecido por efeito de Noordebergum (Verruijt, 1969).

Nos processos multidimensionais de consolidação que se seguem à aplicação de carregamentos não drenados sobre solos saturados também se verificam respostas invertidas da pressão da água. Neste tipo de situações o fenómeno de subida inicial da pressão da água é designado por efeito de Mandel-Cryer (Mandel, 1953) (Cryer, 1963).

Ao contrário das teorias de consolidação não acopladas, a teoria de consolidação multidimensional de Biot (1941) é capaz de reproçuzir os fenómenos de subida inicial da pressão da água no decurso de ensaios de bombagem. Isto foi demonstrado pela primeira vez por Verruijt (1969), através do desenvolvimento de uma solução analítica para um problema de extracção de caudal do estrato superior de um aquífero múltiplo.

Rodrigues (1983) descreveu manifestações do efeito de Noordebergum observadas em dois ensaios de bombagem realizados no local do projecto mineiro de Rio Maior. O principal objectivo do presente trabalho é mostrar que é possível simular estas manifestações por meio de uma modelação numérica baseada na implementação da teoria de consolidação de Biot pelo método dos elementos finitos. Alguns dos resultados apresentados no trabalho mostram que, para além da interpretação das respostas invertidas da pressão da água, os modelos numéricos baseados em formulações acopladas também permitem a interpretação completa dos resultados de ensaios de bombagem, isto é, a determinação das características de deformabilidade e permeabilidade dos aquíferos e aquitardos em presença.

## 2 — TEORIA ACOPLADA DE CONSOLIDAÇÃO

A formulação matemática da teoria de consolidação de Biot e a sua implementação pelo método dos elementos finitos têm sido frequentemente descritas na literatura (Sandhu e Wilson, 1969) (Hwang *et al.*, 1972) (Correia, 1982) e por isso não são aqui apresentadas. Em todo o caso, é conveniente salientar os seguintes aspectos:

- No caso tridimensional é necessário proceder à integração simultânea de quatro equações diferenciais governativas (três equações de equilíbrio mais a equação de conservação da massa).
- As quatro incógnitas primárias do problema são as três componentes do vector deslocamento mais a pressão da água.

- Para efectuar a integração das equações governativas é necessário introduzir duas condições em cada ponto da fronteira, sendo uma delas de tipo estrutural (deslocamentos impostos ou tensões impostas) e outra de tipo hidráulico (pressão da água imposta ou fluxo imposto).

A teoria de consolidação de Biot foi originalmente desenvolvida (e tem sido quase exclusivamente usada) tendo em vista problemas que envolvem a aplicação de cargas a um solo de fundação; nestes problemas procura-se geralmente obter os deslocamentos do meio poroso e também o estado de tensão efectiva. No entanto, a teoria é perfeitamente aplicável a problemas de consolidação de tipo hidráulico, isto é, problemas nos quais a perturbação que altera o estado permanente inicial é uma variação do fluxo que atravessa uma certa região da fronteira; nestes problemas o interesse centra-se sobretudo na evolução da pressão da água. Um exemplo destes problemas de consolidação de tipo hidráulico é o fluxo de água subterrânea, em regime transitório, provocado pela extracção de caudal de um poço.

### 3 — O EFEITO DE NOORDEBERGUM NO LOCAL DO PROJECTO MINEIRO DE RIO MAIOR

Rodrigues (1983) relatou a existência de manifestações do efeito de Noordebergum durante dois ensaios de bombagem realizados na bacia do Rio Maior, situada 80 km a norte de Lisboa. Os ensaios fizeram parte dos estudos hidrogeológicos empreendidos na área onde se projecta a exploração, a céu aberto, de uma jazida de lenhites.

Na Fig. 1 é mostrado um corte vertical da bacia, na zona de um dos ensaios de bombagem em que se observaram respostas invertidas da pressão da água. É possível ver nessa figura que: *i*) existe um complexo composto predominantemente por lenhite e diatomite, com mais de 100 m de espessura, que cobre um depósito de areias brancas com pequena percentagem de caulino; *ii*) as variações da pressão da água provocadas pela bombagem no furo B4 foram observadas por meio de tubos piezométricos crepinados no aquífero arenoso (caso do tubo PC5/2) ou no complexo carbonífero-diatomítico (caso do tubo PC5/1).

O ensaio de bombagem em B4 foi realizado durante um período de cinco dias, com extracção de um caudal de  $44 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Foram observadas respostas invertidas (isto é, subidas do nível da água) nos tubos crepinados no complexo carbonífero-diatomítico (Fig. 2).

O outro ensaio de bombagem onde também se observaram manifestações do efeito de Noordebergum foi realizado no furo B3, situado a cerca de 2 km de B4. No entanto, e apesar de as condições geológicas serem aparentemente semelhantes, a evolução da pressão da água no complexo carbonífero-diatomítico durante a bombagem em B3 foi

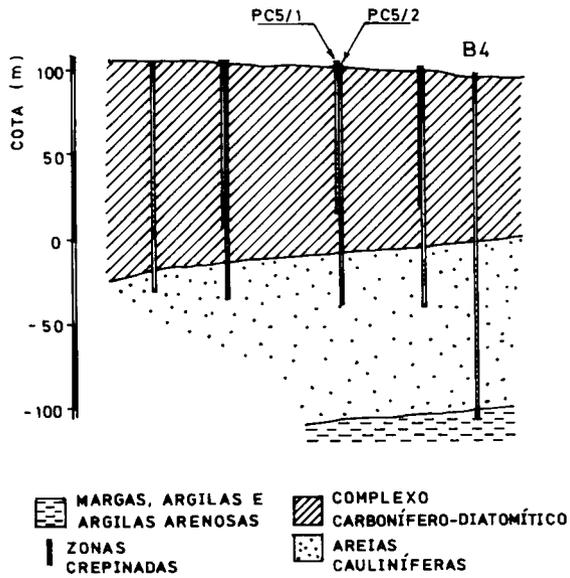


Fig. 1 — Corte vertical na bacia de Rio Maior, no local do ensaio de bombeamento no furo B4

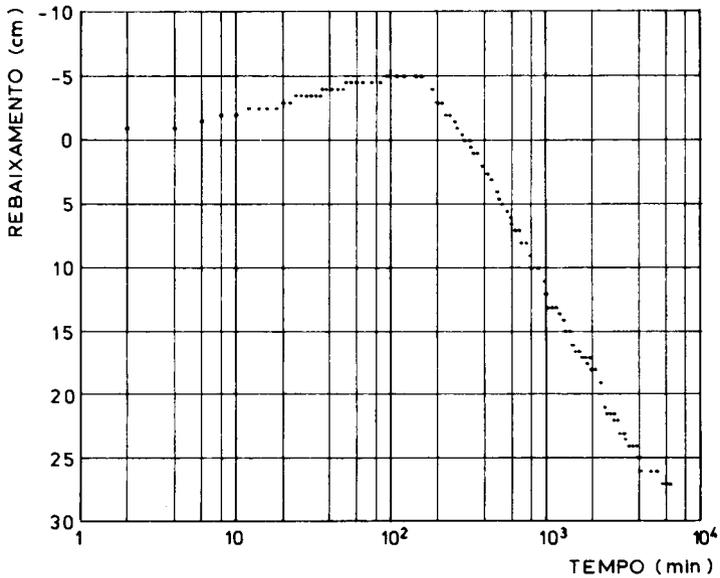


Fig. 2 — Valores medidos da variação do nível da água no tubo piezométrico PC5/1 durante o ensaio de bombeamento no furo B4 (segundo Rodrigues, 1983)

diferente da que se verificou durante a bombagem em B4. Com efeito, após uma subida na parte inicial do ensaio o nível da água baixou mas não chegou a passar abaixo do nível inicial. Rodrigues (1983) sugeriu que esta resposta se ficou a dever à ausência de fluxo na fronteira entre o complexo carbonífero-diatomítico e o aquífero arenoso, concluindo deste modo que a permeabilidade do complexo, segundo a direcção vertical, no local do furo B3, é muito mais baixa do que no local do furo B4.

#### 4 — MODELAÇÃO NUMÉRICA

Os ensaios de bombagem atrás mencionados foram ambos analisados por meio de um modelo numérico baseado na implementação da teoria de consolidação de Biot pelo método dos elementos finitos. Admitiu-se a hipótese de existência de simetria em torno do eixo do furo de bombagem; na Fig. 3 é apresentada a malha de elementos finitos utilizada (os dois ensaios foram analisados com a mesma malha) e são indicadas as condições de fronteira adoptadas. Foram usados elementos finitos quadrangulares com oito nós, isoparamétricos no que diz respeito aos deslocamentos e superparamétricos (incógnitas nos vértices) no que diz respeito à pressão da água (Correia, 1982).

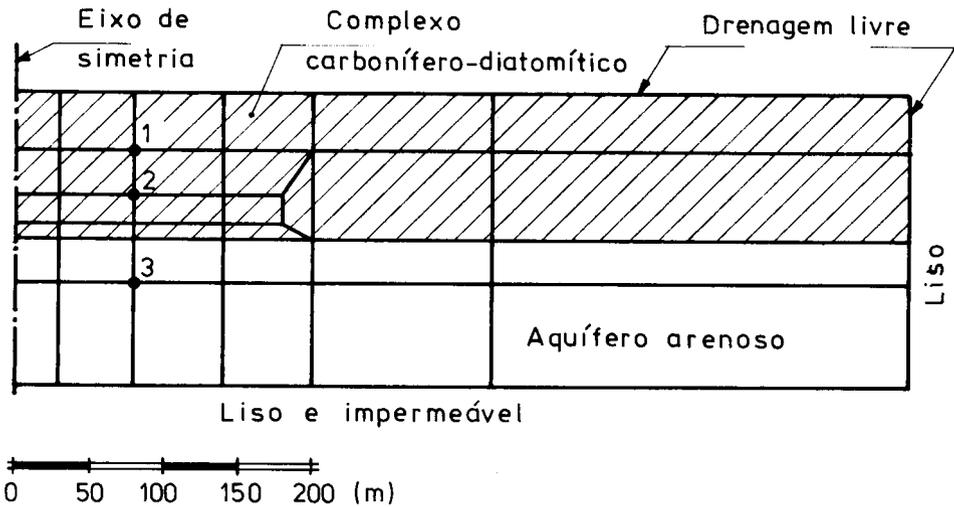


Fig. 3 — Malha de elementos finitos e condições de fronteira

O esqueleto sólido foi considerado isotrópico, com comportamento elástico e linear, e foi admitida a validade da lei de Darcy. Admitiu-se que o nível freático permanecia à superfície do terreno ao longo de todo o ensaio de bombagem.

Tanto o aquífero arenoso como o complexo sobrejacente foram considerados homogêneos. No que diz respeito ao complexo carbonífero-diatomítico esta hipótese corresponde a uma simplificação grosseira das condições geológicas reais, já que se ignora a alternância de finas camadas com características muito diversificadas (Rodrigues, 1986).

No cálculo correspondente ao ensaio de bombagem em B4 as características adaptadas para os materiais foram as seguintes:

**Aquífero arenoso**

Módulo de Young —  $E = 600 \text{ MPa}$

Coefficiente de Poisson —  $\nu = 0,4$

Coefficiente de permeabilidade —  $k = 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

**Complexo carbonífero-diatomítico**

$E = 60 \text{ MPa}$

$\nu = 0,3$

$k = 10^{-6} \text{ m/s}$

A integração no tempo, ao longo de um tempo total de bombagem de 5000 min, foi realizada em 11 intervalos de tempo de grandeza variável (crescente). Na Fig. 4 estão representados os resultados numéricos correspondentes à evolução da variação da cota piezométrica nos pontos 1 e 2 da Fig. 3, situados no complexo carbonífero-diatomítico. É possível verificar que: *i*) as evoluções calculadas são semelhantes à resposta observada no tubo piezométrico PC5/1; *ii*) os valores máximos, calculados e observados, da subida da cota piezométrica, têm a mesma ordem de grandeza.

A título ilustrativo, são apresentados na Fig. 5 os valores calculados (no ponto 3 da Fig. 3) e medidos (no tubo PC5/2) da descida da cota piezométrica no aquífero arenoso, a uma distância de 80 m de B4.

No cálculo correspondente ao ensaio de bombagem em B3 adoptaram-se características dos materiais idênticas às adoptadas para o ensaio em B4, com excepção do coeficiente de permeabilidade do complexo carbonífero-diatomítico, para o qual se adoptou um valor de  $10^{-8} \text{ m/s}$ . Na Fig. 6 são apresentados os resultados numéricos correspondentes à evolução da variação da cota piezométrica nos pontos 1 e 2 da Fig. 3. Como se pode verificar, mesmo quando o complexo carbonífero-diatomítico é considerado praticamente impermeável, as curvas de valores calculados da variação da cota piezométrica mostram a existência de respostas invertidas.

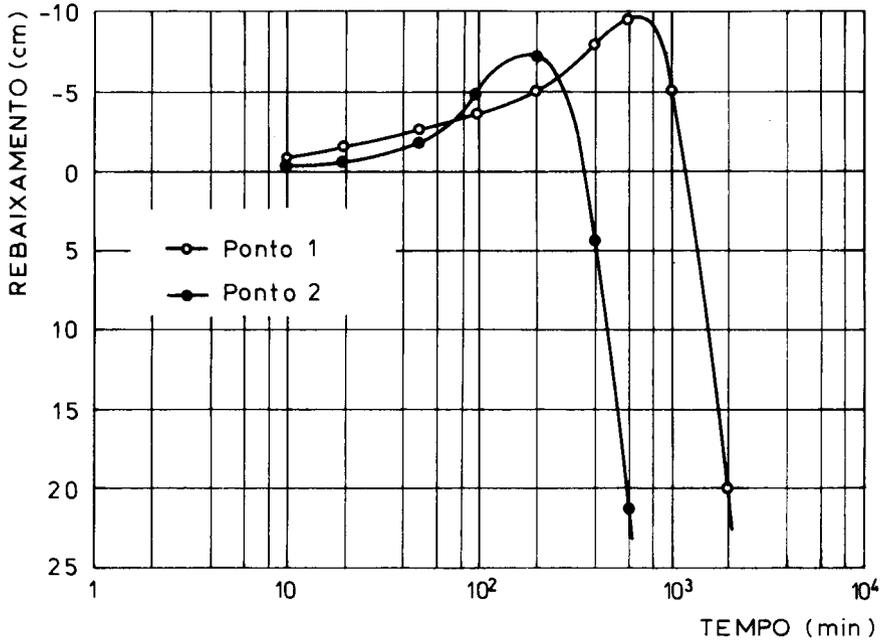


Fig. 4 — Valores calculados da variação da cota piezométrica em dois pontos (ensaio de bombagem no furo B4)

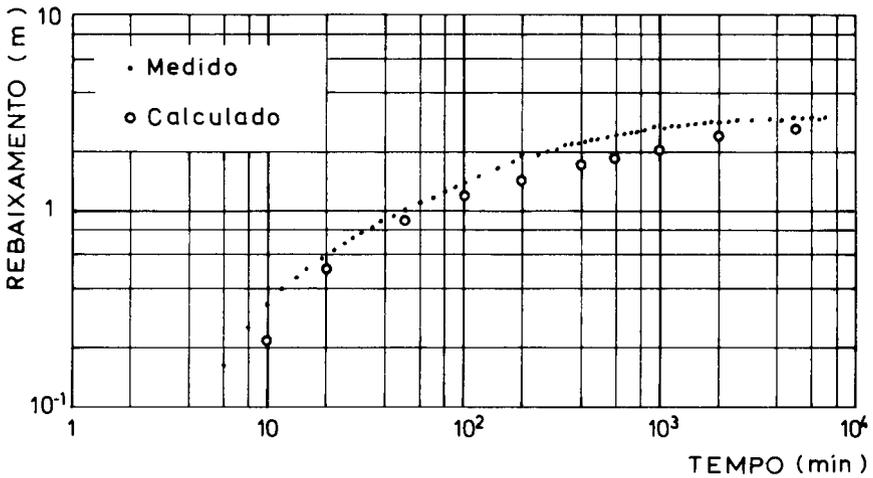


Fig. 5 — Valores medidos e calculados da descida da água no tubo piezométrico PC5/2 durante o ensaio de bombagem no furo B4 (os valores medidos foram obtidos de Rodrigues, 1983)

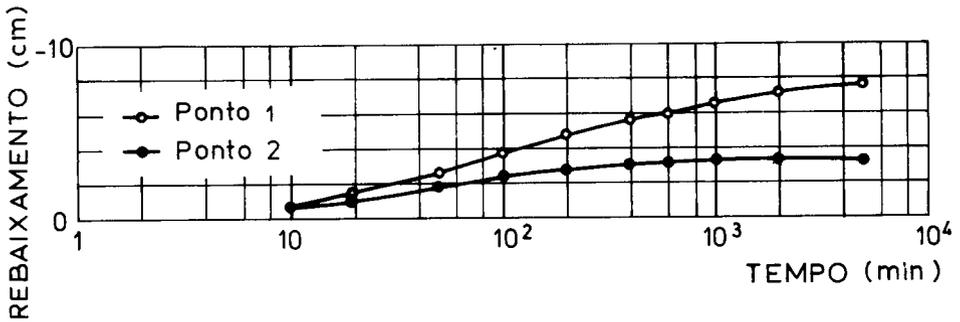


Fig. 6 — Valores calculados da variação da cota piezométrica em dois pontos (ensaio de bombagem no furo B3)

Os resultados completos dos cálculos efectuados (incluindo as distribuições dos deslocamentos e das forças de percolação) sugerem que as respostas invertidas da pressão da água no complexo carbonífero-diatomítico podem ser explicadas da seguinte forma:

- A despressurização conduz à deformação do aquífero arenoso; essa deformação processa-se quer segundo a direcção radial (devido à existência de forças de percolação dirigidas para o poço), quer segundo a direcção vertical. Note-se que nos métodos tradicionais de interpretação, baseados em formulações não acopladas, os deslocamentos radiais não são tidos em consideração.
- Por razões de compatibilidade, as deformações do aquífero arenoso provocam uma variação do estado de tensão total no complexo carbonífero-diatomítico. Sempre que esta variação seja no sentido de provocar uma diminuição de volume em regiões onde o comportamento permanece essencialmente não drenado, o resultado é uma subida da pressão da água nessas regiões. Este efeito "à distância" está na origem das respostas invertidas durante o ensaio em B3 e na parte inicial do ensaio em B4.
- Quando o processo de consolidação do complexo carbonífero-diatomítico atinge a vizinhança de uma certa região, manifesta-se nessa região um efeito local de aumento da pressão da água. Este efeito local, que se adiciona ao efeito "à distância", está associado ao processo de deformação do complexo.

## 5 — CONCLUSÃO

Ficou demonstrado que é possível reproduzir e explicar as manifestações do efeito de Noordebergum observadas no local do projecto mineiro de Rio Maior por meio de um modelo numérico baseado na implementação da teoria de Biot pelo método dos elementos finitos.

É de salientar que, devido ao carácter muito simplificador das hipóteses adoptadas no estabelecimento do modelo, o objectivo da modelação numérica empreendida foi principalmente conseguir reproduzir todos os aspectos qualitativos da evolução da pressão da água, e não a obtenção de uma boa concordância entre valores medidos e calculados.

Em princípio, é possível usar modelos baseados em formulações acopladas na análise de qualquer tipo de escoamento em regime variável, incluindo a interpretação completa dos resultados de ensaios de bombagem. No entanto, devido à complexidade de tais modelos e aos custos relativamente elevados que lhe estão associados, o seu uso em problemas práticos limita-se por enquanto a situações especiais. No que diz respeito a estudos de natureza teórica, a utilização deste tipo de modelos abre perspectivas muito interessantes, nomeadamente a possibilidade de quantificação dos erros resultantes da utilização dos métodos tradicionais de interpretação dos ensaios de bombagem.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIOT, M. A. (1941) — *General theory of three-dimensional consolidation*. J. Ap pl. Phys., vol. 12, pp. 155-164.
- CORREIA, R. M. (1982) — *Aplicação de modelos matemáticos ao estudo de aterros construídos sobre solos argilosos moles*. Tese para Especialista, LNEC.
- CRYER, C. W. (1963) — *A comparison of the three-dimensional consolidation theories of Biot and Terzaghi*. Quart. J. Mech. Appl. Math., vol. 16, n.º 4, pp. 401-412.
- HANTUSH, M. S. (1964) — *Hydraulics of wells*, em *Advances in Hydrosience*, ed. por V. T. Chow, Academic Press, pp. 281-432.
- HWANG, C. T.; MORGENSTERN, N. R.; MURRAY, D. W. (1972) — *Application of the finite element method to consolidation*, em *Applications of the Finite Element Method in Geotechnical Engineering*, ed. por C. S. Desai, USAEWES, pp. 739-765.
- MANDEL, J. (1953) — *Consolidation des sols (étude mathématique)*. Géotechnique, vol. 3, n.º 7, pp. 287-299.
- RODRIGUES, J. D. (1983) — *The Noordebergum effect and characterization of aquitards at the Rio Maior mining project*. Ground Water, vol. 21, n.º 2, pp. 200-207.
- RODRIGUES (1986) — *Estudos geotécnicos e hidrogeológicos na bacia de lignitos de Rio Maior*. Memória n.º 660 do LNEC.
- SANDHU, R. S.; WILSON, E. L. (1969) — *Finite element analysis of seepage in elastic media*. J. Eng. Mech. Div., ASCE, n.º EM3, pp. 641-652.
- VERRUIJT, A. (1969) — *Elastic storage of aquifers*, em *Flow through Porous Media*, ed. por R. de Wiest, Academic Press, pp. 331-376.