

ENSAIOS DE PERMEABILIDADE NA FUNDAÇÃO ALUVIONAR DO AÇUDE DE COIMBRA*

Permeability tests in the Coimbra dam alluvial foundation

por

E. MARANHA DAS NEVES**

R. CORREIA***

P. SÊCO E PINTO***

RESUMO — São analisados os resultados dos ensaios de bombagem efectuados num aquífero arenoso permeável não confinado, para condições de regime estacionário e não estacionário e variações de condições de fronteira, quer por métodos analíticos, quer através do método dos elementos finitos. Apresentam-se correlações entre a permeabilidade “in situ” e características granulométricas das areias.

SYNOPSIS — Pumping tests in a very pervious unconfined sandy aquifer were made and the results are analysed for steady and transient states and for changes on the boundary conditions by both analytical and finite element methods. Correlations between in situ permeability and grain size characteristics of sands are also presented.

INTRODUÇÃO

O açude de Coimbra, situado no rio Mondego, está fundado num vale aluvionar predominantemente arenoso encaixado por formações rochosas calcárias e margosas. Trata-se de uma barragem móvel cujos pilares e lajes descarregadores

*Trabalho apresentado na 3.^a sessão do X ICSMFE, Stockholm, Junho, 1981.

**Especialista em Geotecnia (LNEC).

***Assistente de Investigação do LNEC.

se apoiam em pegões constituídos por paredes moldadas que transmitem as cargas ao bed-rock (Fig. 1). Durante o represamento a percolação da água processa-se através do meio aluvionar sob as lajes e entre os pegões.

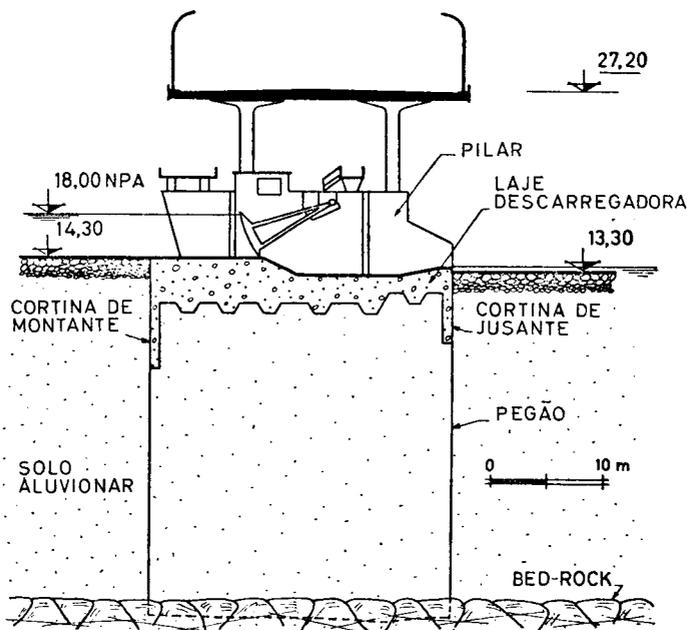


Fig. 1 — Secção transversal do açude-ponte de Coimbra

Nos estudos geotécnicos preliminares foram efectuadas determinações pontuais de permeabilidade do meio aluvionar. Esta informação revelou-se insuficiente no dimensionamento do rebaixamento do nível freático necessário à execução do encabeçamento dos pegões e construção das soleiras descarregadoras. Ponderou-se ser conveniente, tendo em vista o dimensionamento do sistema para efectuar o referido rebaixamento e a quantificação dos caudais de percolação no meio aluvionar sob a barragem, a realização de ensaios de bombagem. São analisados seguidamente os resultados desses ensaios podendo, para conhecimento mais detalhado do estudo efectuado, consultar-se o relatório apresentado oportunamente pelo LNEC (1978).

Características dos poços

Foram executadas duas captações, com revestimento em aço, de diâmetro de 0,6 m, com zonas drenantes asseguradas por ranhuras. Os poços atingiram 20 m de profundidade e o máximo caudal bombado foi de cerca de 330 m³/h. Foram realizados 4 ensaios de bombagem: n.º 2 e n.º 3 na captação C₂ e n.º 5 e n.º 6 na captação C₃. Por intermédio de três linhas de piezómetros adequadamente distribuídos em planta e a duas profundidades, determinou-se a evolução no tempo da superfície freática relacionada com o ensaio de bombagem (Fig. 2).

Análise dos resultados dos ensaios

Os resultados da bombagem foram analisados para condições de regime estacionário e não estacionário, quer por via analítica, quer recorrendo ao método dos elementos finitos. No tratamento da informação e em virtude da extrema complexidade do problema, foram utilizadas as seguintes hipóteses simplificativas:

- aquífero homogéneo e isotrópico
- peso específico da água e viscosidade constantes
- não existe fluxo natural e os níveis de água são horizontais
- a espessura do aquífero é constante
- admite-se válida a hipótese de Dupuit
- o coeficiente de armazenamento é constante no espaço e no tempo
- o caudal da bombagem é constante

Foi efectuada uma intensa caracterização granulométrica do material arenoso, no sentido de analisar correlações entre a granulometria das areias e os coeficientes de permeabilidade.

Regime estacionário

O Quadro I apresenta os valores de *k* (coeficiente de permeabilidade) calculados a partir do rebaixamento do nível de água resultante da bombagem no poço incompleto.

Das leituras efectuadas e interpretadas para cada piezómetro tendo em conta o efeito da penetração parcial do poço (Custódio e Galofré, 1976) deduziram-se

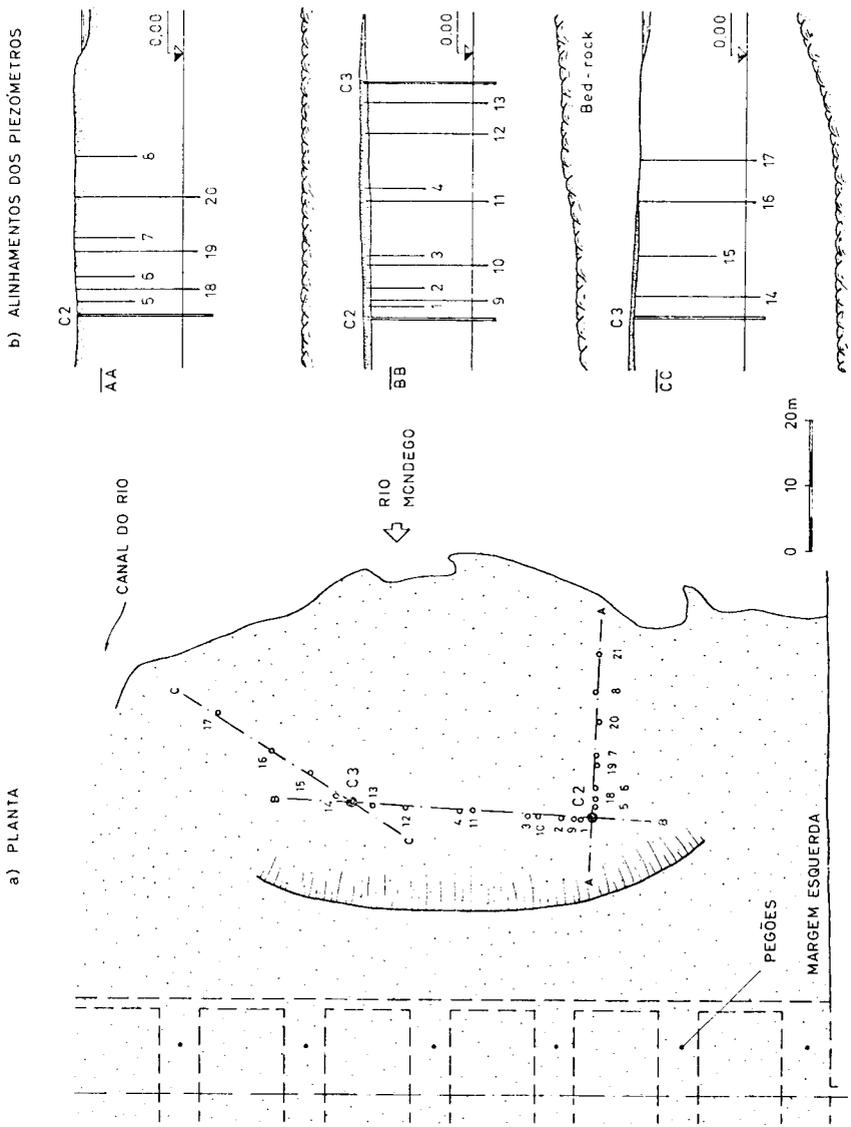


Fig. 2 — Localização dos ensaios. a) planta. b) cortes segundo os alinhamentos dos piezômetros.

os valores de k cujos valores médios no mesmo alinhamento e nas duas profundidades se apresentam na coluna (3). Os resultados da coluna (4) foram obtidos

QUADRO I — Fluxo estacionário

POÇO	ENSAIO no.	TNO (1964)			THIEM		
		k_{av}^*	no.	amp.*	k_{av}^*	no.	amp.*
(1)	(2)	(3)			(4)		
C 2	2	0.31	17	0.15	0.35	4	0.07
	3	0.29	10	0.38	0.29	3	0.08
C 3	5 and 6	0.31	22	0.46	0.26	6	0.09

* $m/s \times 10^{-2}$

pela aplicação da fórmula de Thiem. Nas colunas (3 e 4) figuram o n.º do ensaio e a amplitude dos valores de k . A Fig. 3 descreve a análise gráfica de uma linha de piezómetros pelo método de Thiem.

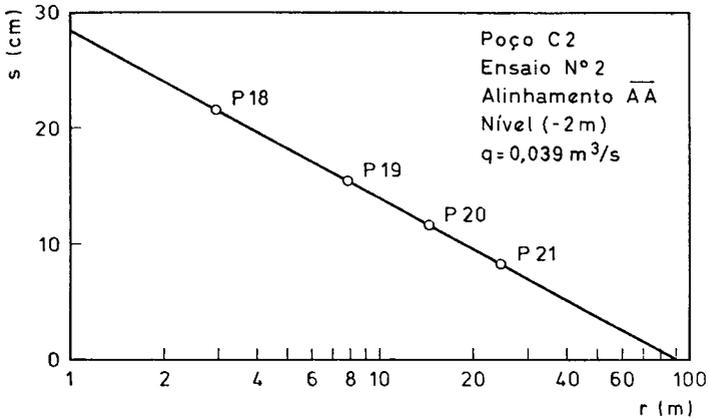


Fig. 3 — Rebaixamento no piezômetro (s) versus distância ao poço de bombagem (r) ($k = 0,35 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$).

Regime não estacionário

A análise em regime não estacionário foi efectuada por três métodos

a) método simplificado de Jacob, válido quando

$$v = \frac{r^2 S}{4 T t} < 0,03$$

em que r é a distância do piezómetro ao poço, S coeficiente de armazenamento, T a transmissividade e t o tempo que decorre do início da bombagem. A Fig. 4

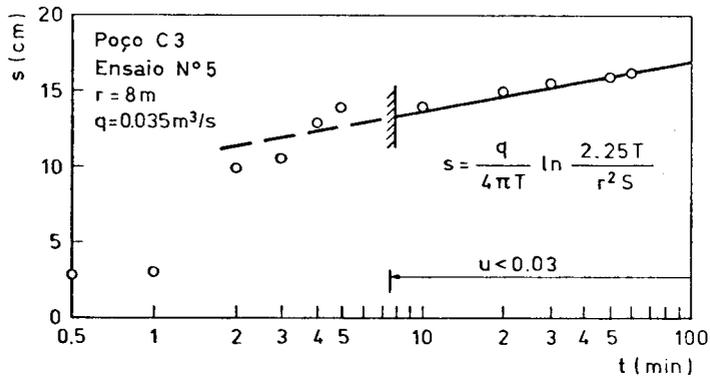


Fig. 4 — Aplicação típica do método simplificado de Jacob à resposta de carácter transitório do piezómetro n.º 15. ($k = 0,66 \times 10^{-2}$ cm/s).

ilustra a aplicação deste método no ensaio n.º 5 ao piezómetro n.º 15. No Quadro II apresentam-se valores médios de permeabilidade (k_{av}) e amplitude (amp.).

b) por sobreposição de duas curvas, isto, é a curva tipo de Theis

$$\log w(u) = f \left[\log \left(\frac{1}{u} \right) \right]$$

e a curva

$$\log s = f'(\log t)$$

que são do mesmo tipo, é possível quantificar as expressões

$$\log \frac{q}{2 \pi T}$$

$$\log \frac{4 T}{S r^2}$$

QUADRO II — Fluxo transitório

POÇO	ENSAIO no.	MET. a			MET. b			MET. c
		k_{av}^*	no.	amp.*	k_{av}^*	no.	amp.*	k_{av}^*
(1)	(2)	(3)			(4)			(5)
C 2	2	0.79	4	0.27	0.79	12	0.30	0.8
	3	0.82	3	0.20	0.84	10	0.42	
C 3	5 and 6	0.80	6	0.56	0.66	11	0.85	0.7

* $m/s \times 10^{-2}$

Conhecido o valor de δ os valores de k e S podem ser obtidos. A Fig. 5 representa as curvas experimentais ($\log s$, $\log t$) para o ensaio n.º 3 efectuado na

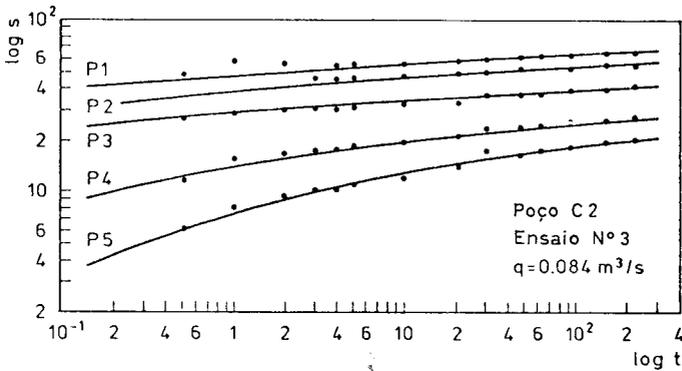


Fig. 5 — Resultados dum ensaio num gráfico (logs, logt).

captação C_2 . O Quadro II apresenta os valores médios e amplitude dos coeficientes de permeabilidade.

c) Foram determinados os valores de k em duas zonas diferentes através de uma análise de recuperação do nível de água nos piezómetros após a bombagem.

Em relação ao rebaixamento nos piezómetros no ensaio n.º 5, foi efectuada uma análise não linear em regime não estacionário pelo método dos elementos finitos. Recorreu-se a elementos quadrangulares isoparamétricos de 8 nós e à formulação de Galerkin, quer para a discretização espacial, quer para a integração no tempo. Pormenores do método utilizado podem ser encontrados em relatório do LNEC (1979). Na Fig. 6 apresentam-se as flutuações registadas no nível de

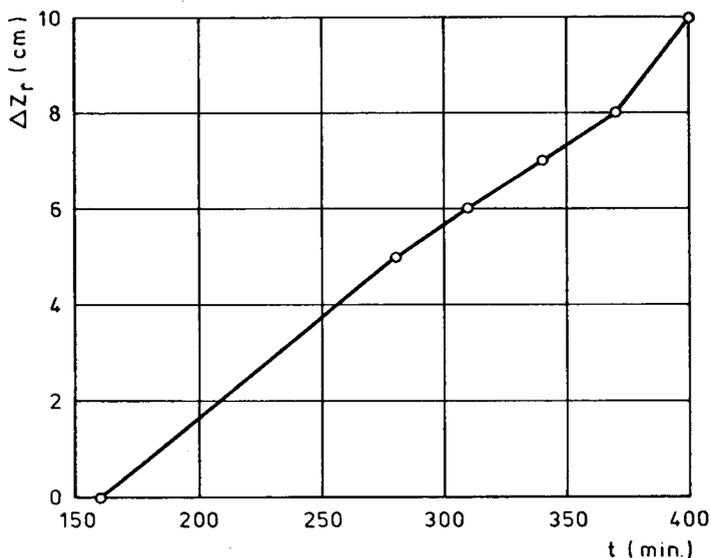


Fig. 6 — Flutuações do nível de água do rio durante o ensaio n.º 5.

água do rio durante o ensaio n.º 5. A determinação dos valores de k e S para os quais os resultados numéricos se aproximam mais dos valores observados foi efectuada por um método iterativo, tendo-se chegado a $k = 0,55 \times 10^2$ m/s e $S = 0,05$. Na Fig. 7 apresenta-se, para o piezómetro n.º 15, a comparação entre

a evolução dos rebaixamentos observados e a evolução dos rebaixamentos calculados usando estes valores de k e S .

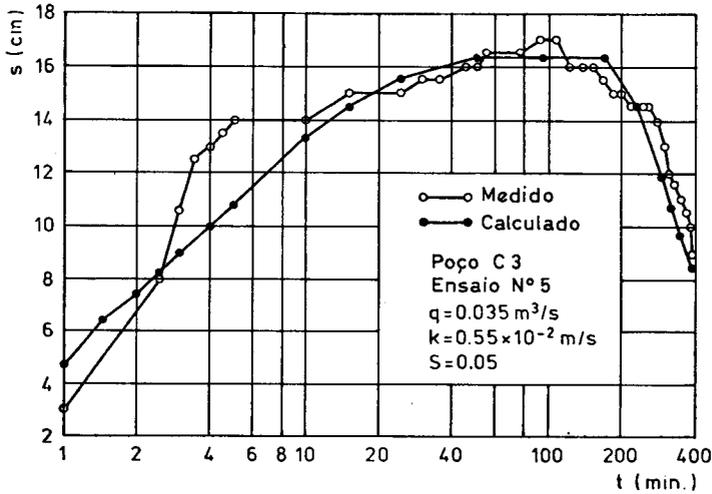


Fig. 7 — Evolução do rebaixamento no piezómetro n.º 5. Valores medidos e valores calculados.

Correlação entre a granulometria e coeficientes de permeabilidade

São frequentes as determinações indirectas das permeabilidades das areias uniformes através da análise de curvas granulométricas (correlação de Hazen, por exemplo). Muitos autores mostram-se reticentes quanto à determinação da permeabilidade *in situ* através de amostras ensaiadas em laboratório devido à perturbação inerente à colheita e ao facto de não representarem a heterogeneidade das formações.

Outros autores (por ex. Milligan, 1975) sustentam que a observação da macro-estrutura de “boas” amostras pode fornecer uma ideia qualitativa sobre a gama de permeabilidades possível. Em apoio desta posição Milligan cita os resul-

tados dos trabalhos de Loudon (1952) em ensaios de laboratório, de ensaios de bombagem realizados pela WES (1959) e de relatos de ensaios de bombagem em estratos profundos de areia fina a grossa com burgau (Ahmad et al., 1975). Estes últimos autores, considerando o valor médio de D_{10} de todo o estrato, determinaram uma excelente concordância entre o k deduzido dos ensaios de bombagem e o deduzido da expressão de Hazen.

O Quadro III mostra os valores de k obtidos pela correlação de Hazen com base nas análises granulométricas de amostras de solos arenosos obtidos na ex-

QUADRO III — Diâmetro efectivo e permeabilidade in situ

POÇO	Nº DE AMOSTRAS	$D_{10\text{ av}}$ (mm)	$k = D_{10}^2 \times 10^{-2}$ (m/s)
(1)	(2)	(3)	(4)
C2	11	0.5	≈ 0.3
C3	8	0.7	≈ 0.5

cução das captações C_2 e C_3 (ver Fig. 8). Posteriormente e com base em 97 amostras colhidas na escavação dos septos dos pegões 2 e 4 verificou-se que os valores de k_h deduzidos do valor médio de D_{10} para a espessura do aquífero são da ordem de grandeza dos valores atrás referidos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dos resultados dos ensaios anteriormente descritos e dos diferentes métodos de análise pode concluir-se o seguinte:

- a) O coeficiente de permeabilidade médio dos ensaios de bombagem na zona do material aluvionar permeável é cerca de 10 vezes superior aos valores mais elevados dos ensaios tipo Lefranc. Posteriormente, os caudais no

rebaixamento para a construção da soleira descarregadora confirmaram a ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade obtidos nos ensaios de bombagem.

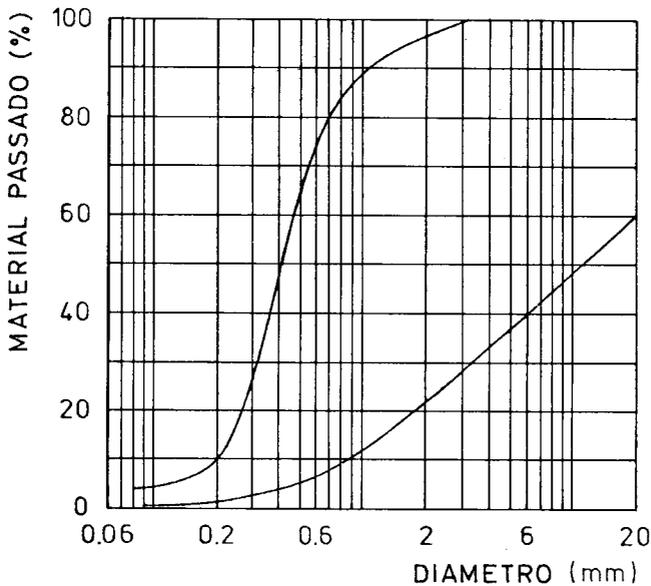


Fig. 8 — Fuso granulométrico das aluviões (poços C_2 e C_3).

- b) Para os tempos de ensaio e para as características de permeabilidade que se podem prever para o meio em causa, verificou-se que o tempo necessário para atingir a estabilização da superfície freática é superior ao tempo de ensaio.
- c) A análise em regime não estacionário utilizando métodos diferentes deu valores semelhantes para k .
- d) Análises utilizando métodos dos elementos finitos, que permitiram simular de uma maneira mais realista as condições de fronteira, confirmaram os valores obtidos pelos métodos analíticos.
- e) As correlações entre a granulometria de materiais arenosos e coeficientes de permeabilidade foram confirmadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Direcção-Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, que subsidiou a realização deste estudo, e ao Eng.º Tavares de Castro, Residente do Açude de Coimbra, a sua inestimável colaboração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, S., Y. LACROIX and J. STEINBACH (1975). "Pumping tests in an unconfined aquifer". Proc. of the Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties. Vol. I, Raleigh, North Carolina.
- CUSTÓDIO, E. and A. GALOFRÉ (1976). "Hidraulica de captaciones de água subterrânea". de E. Custodio e M. Llamas, Ediciones Omega, S.A., Barcelona.
- L.N.E.C. (1978). "Permeabilidade das aluviões do Mondego na zona do Açude — Ponte de Coimbra. Ensaio de bombagem". Lisboa, Setembro.
- L.N.E.C. (1979). "Análise dos escoamentos bidimensionais, horizontais em meios porosos em regime variável pelo método dos elementos finitos". Lisboa, Maio.
- LOUDON, A.G. (1952). "The computation of permeability from simple soil tests". Geotechnique, Vol. III, n.º 4.
- MILLIGAN, V. (1975). "Field measurement of permeability in soil and rock". Proc. of the Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties. Vol. II, Raleigh, North Carolina.
- WES (WATERWAYS EXPERIMENT STATION) (1956). "Investigation of underseepage and its control, Lower Mississippi River Levees". TM3-424, Vicksburg, Miss., October.