

## O USO DO MODELO HELE-SHAW VERTICAL PARA O ESTUDO DE AQUÍFEROS COSTEIROS

Marcos Imério Leão

Prof. do Instituto de Pesquisas Hidráulicas  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

### ABSTRACT

The study of fresh water and salt water interrelationships in coastal areas has been of great interest.

In Brazil, particularly, this subject is becoming very important since the greater part of the population is distributed along the 8.500 Km - long coast line.

Considering these facts we have tried to contribute to the study of the protection of these coastal aquifers.

A vertical Hele-Shaw model was built with two 13 mm thick plexi-glass plates, and the following size: 1,50m - long, and 0,50 m high.

To simulate fresh water and salt water, lubricating oil and a glicerine solution were used, respectively.

It was decided to use a homogeneous and isotropic aquifer, and all experiments were made at a constant flow-rate.

Once the scales had been established and the flow had been calibrated, several experiments were made trying to vary some parameters, such as distance from the pumping well to the coast, piezometric level, discharge and aquifer thickness.

Conclusions were obtained about well siting distances and optimum pumping discharges which showed that the vertical Hele-Shaw model is useful in studying saline intrusions.

### RESUMO

O estudo das interrelações água doce-água salgada em zonas costeiras tem apresentado grande interesse.

No Brasil, particularmente, esse assunto está se revestindo de grande importância pelo fato de as maiores concentrações populacionais estarem distribuídas ao longo dos 8.500 quilômetros de costa.

Tendo em vista tais fatos, procurou-se dar uma contribuição ao estudo da proteção destes aquíferos costeiros.

Construiu-se um modelo Hele-Shaw vertical com duas placas de plexy-glass de 13 mm de espessura, com as seguintes dimensões: 1,50 m de comprimento e 0,50 m de altura.

Para a simulação da água doce e da água salgada utilizaram-se óleo lubrificante e uma solução de glicerina, respectivamente.

Idealizou-se um aquífero homogêneo e isotrópico, e todas as experiências foram feitas em regime permanente.

Estabelecidas as escalas e calibrado o modelo realizaram-se várias experiências procurando-se variar alguns parâmetros tais como: distância do poço de bombeamento a costa, altura piezométrica, vazão e espessura do aquífero. Foi possível tirar conclusões a respeito de distâncias para colocação de poços e vazões ótimas de bombeamento, que vieram mostrar a utilidade do modelo Hele-Shaw vertical no estudo de intrusão salina.

## CONSTRUÇÃO DO MODELO

O modelo foi construído nas oficinas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, e encontra-se montado no Laboratório de Águas Subterrâneas (Foto nº 1).

Utilizaram-se duas placas transparentes de "Plexy-glass" de 13 mm de espessura, 1,80 m de comprimento e 0,50 m de altura.

Escolheu-se as placas com 13 mm de espessura para evitar o problema de flexibilidade das mesmas causada pela pressão dos líquidos que irão escoar entre elas. Esta flexibilidade poderia causar uma mudança no espaçamento entre as placas alterando, conseqüentemente, a permeabilidade do modelo.

Foram feitos uma série de furos numa das placas onde estão acoplados os piezômetros. Estes furos servem também como poços para simular o bombeamento. Construiu-se também, uma série de reservatórios de nível constante que irão servir para a introdução dos dois líquidos no modelo.

Os líquidos escolhidos foram: uma solução aquosa de glicerina e o óleo lubrificante Mobiloil SAE-30.

As viscosidades absoluta dos dois líquidos, foram determinadas com o auxílio do viscosímetro "Höppler" e obtiveram-se:

- solução aquosa de glicerina (20°C) - 271,6 cP
- óleo lubrificante (20°C) - 271,1 cP

Os pesos específicos dos dois líquidos, determinados com o piezômetro foram:

- solução aquosa de glicerina (20°C) - 1,238 g/cm<sup>3</sup>
- óleo lubrificante (20°C) - 0,877 g/cm<sup>3</sup>.

A solução de glicerina é incolor e o óleo lubrificante tem uma cor amarelada, não sendo necessário o uso de corantes para diferenciar os dois líquidos.

O óleo lubrificante representa a água doce e a solução de glicerina a água salgada.

## ESCALAS DO MODELO

É necessário definir a correspondência mais adequada entre os parâmetros e variáveis do modelo e seus homólogos do protótipo.

$$\text{Escala} = \frac{\text{magnitude do modelo (m)}}{\text{magnitude homóloga do protótipo (p)}}$$

JACOB BEAR (1960) descreveu as escalas do modelo partindo de que o fluxo bidimensional da água subterrânea com uma superfície freática em aquífero não isotrópico é descrito por:

$$K_{xp} \frac{\partial^2 \phi_p}{\partial x_p^2} + K_{zp} \frac{\partial^2 \phi_p}{\partial z_p^2} = S_{op} \frac{\partial \phi_p}{\partial t_p} \quad (1)$$

Para um ponto no aquífero,

$$K_{xp} \left( \frac{\partial \phi_p}{\partial x_p} \right) + K_{zp} \left( \frac{\partial \phi_p}{\partial z_p} \right) - \frac{\partial \phi_p}{\partial x_p} = n_p \frac{\partial \phi_p}{\partial t_p} \quad (2)$$

se a zona de capilaridade é negligenciada e não há movimento da superfície livre.

Estas duas equações podem ser escritas para o fluxo através do espaço entre duas placas paralelas verticais de um modelo de fluido viscoso. A diferença está no fato de que o modelo é isotrópico, ou seja,

$$K_m = \frac{1}{12} \rho \frac{b^2}{\nu}$$

$$\text{então} \quad K_m \left( \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial x_m^2} \right) + \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial z_m^2} = S_{om} \frac{\partial \phi_m}{\partial t_m} \quad (3)$$

$$K_m \frac{\partial \phi_m}{\partial x_m} + \frac{\partial \phi_m}{\partial x_m} - \frac{\partial \phi_m}{\partial z_m} = n_m \frac{\partial \phi_m}{\partial t_m} \quad (4)$$

## CONSTRUÇÃO DO MODELO

O modelo foi construído nas oficinas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, e encontra-se montado no Laboratório de Águas Subterrâneas (Foto nº 1).

Utilizaram-se duas placas transparentes de "Plexy-glass" de 13 mm de espessura, 1,80 m de comprimento e 0,50 m de altura.

Escolheu-se as placas com 13 mm de espessura para evitar o problema de flexibilidade das mesmas causada pela pressão dos líquidos que irão escoar entre elas. Esta flexibilidade poderia causar uma mudança no espaçamento entre as placas alterando, conseqüentemente, a permeabilidade do modelo.

Foram feitos uma série de furos numa das placas onde estão acoplados os piezômetros. Estes furos servem também como poços para simular o bombeamento. Construiu-se também, uma série de reservatórios de nível constante que irão servir para a introdução dos dois líquidos no modelo.

Os líquidos escolhidos foram: uma solução aquosa de glicerina e o óleo lubrificante Mobiloil SAE-30.

As viscosidades absolutas dos dois líquidos, foram determinadas com o auxílio do viscosímetro "Höppler" e obtiveram-se:

- solução aquosa de glicerina (20°C) - 271,6 cP

- óleo lubrificante (20°C) - 271,1 cP

Os pesos específicos dos dois líquidos, determinados com o piezômetro foram:

- solução aquosa de glicerina (20°C) - 1,238 g/cm<sup>3</sup>

- óleo lubrificante (20°C) - 0,877 g/cm<sup>3</sup>.

A solução de glicerina é incolor e o óleo lubrificante tem uma cor amarelada, não sendo necessário o uso de corantes para diferenciar os dois líquidos.

O óleo lubrificante representa a água doce e a solução de glicerina a água salgada.

## ESCALAS DO MODELO

É necessário definir a correspondência mais adequada entre os parâmetros e variáveis do modelo e seus homólogos do protótipo.

$$\text{Escala} = \frac{\text{magnitude do modelo (m)}}{\text{magnitude homóloga do protótipo (p)}}$$

JACOB BEAR (1960) descreveu as escalas do modelo partindo de que o fluxo bidimensional da água subterrânea com uma superfície freática em aquífero não isotrópico é descrito por:

$$K_{xp} \frac{\partial^2 \phi_p}{\partial x^2} + K_{zp} \frac{\partial^2 \phi_p}{\partial z^2} = S_{op} \frac{\partial \phi_p}{\partial t_p} \quad (1)$$

Para um ponto no aquífero,

$$K_{xp} \left( \frac{\partial \phi_p}{\partial x_p} \right) + K_{zp} \left( \frac{\partial \phi_p}{\partial z_p} \right) - \frac{\partial \phi_p}{\partial x_p} = n_p \frac{\partial \phi_p}{\partial t_p} \quad (2)$$

se a zona de capilaridade é negligenciada e não há movimento da superfície livre.

Estas duas equações podem ser escritas para o fluxo através do espaço entre duas placas paralelas verticais de um modelo de fluido viscoso. A diferença está no fato de que o modelo é isotrópico, ou seja,

$$K_m = \frac{1}{12} g \frac{b^2}{\nu}$$

$$\text{então} \quad K_m \left( \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial x_m^2} \right) + \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial z_m^2} = S_{om} \frac{\partial \phi_m}{\partial t_m} \quad (3)$$

$$K_m \frac{\partial \phi_m}{\partial x_m} + \frac{\partial \phi_m}{\partial x_m} - \frac{\partial \phi_m}{\partial z_m} = n_m \frac{\partial \phi_m}{\partial t_m} \quad (4)$$

Por substituição

$$K_{xp} = \frac{K_{xm}}{K_{xr}} ; K_{zp} = \frac{K_{zm}}{K_{zr}} ; X_p = \frac{X_m}{X_r} \quad (5)$$

$$Z_p = \frac{Z_m}{Z_r} , \phi_p = \frac{\phi_m}{\phi_r} , n_p = \frac{n_m}{n_r}$$

$$t_p = \frac{t_m}{t_r} , S_{op} = \frac{S_{om}}{S_{or}}$$

na equação 2 comparando o resultado com a equação 4, as relações são obtidas de acordo com as leis de similitude:

$$\frac{x_r}{K_{xr} \phi_r^2} = \frac{Z_r}{K_{zr} \phi_r^2} = \frac{Z_r}{K_{zr} \phi_r^2} = \frac{t_r}{n_r \phi_r} = \alpha \quad (6)$$

$\alpha$  pode ser um número, da definição de  $\alpha$  resulta  $\phi_r Z_r$ ; conseqüentemente as escalas do modelo são dadas por:

$$\frac{X_r^2}{K_{xr}} = \frac{Z_r^2}{K_{zr}} \left( \frac{X_r}{Z_r} \right)^2 = \frac{Q_{xr}}{K_{zr}} = \frac{K_{zp}}{K_{xp}} \quad (7)$$

e

$$t_r = \frac{n_r Z_r}{K_r} \quad \text{ou} \quad t_r = \frac{n_r X_r^2}{K_{xr} Z_r} \quad (8)$$

Para o problema de intrusão de água salgada em aquíferos costeiros temos:

- assumindo que a condutividade hidráulica do modelo é a mesma para as áreas ocupadas pelos dois líquidos diferentes, e usando o fato de que a condutividade hidráulica do solo é inversamente proporcional a viscosidade da água, então:

$$K_{mf} = \frac{1}{12} g \frac{b_m^2}{v_{mf}} ; K_{pfx} = C \frac{1}{v_{pf}}$$

$$K_{ms} = \frac{1}{12} g \frac{b_m^2}{v_{ms}} ; K_{psx} = C \frac{1}{v_{ps}}$$

e

$$K_{rf} = K_{rs}$$

então

$$\left( \frac{m}{v_p} \right)_f = \left( \frac{m}{v_p} \right)_s$$

A pressão em qualquer ponto do corpo do interface é a mesma em ambos os lados do interface.

A figura 2, mostra um aquífero costeiro freático, no ponto A a equação para o protótipo é:

$$\alpha_p \cdot \gamma_{sp} = (\alpha_p + h'_p) \gamma_{fp}$$

ou

$$\alpha_p \cdot \delta_p = h'_p$$

onde:

$$\delta = \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f}$$

similarmente, para o modelo

$$\alpha_m \cdot \delta_m = h'_m$$

e então

$$\alpha_r \cdot \delta_r = h'_r$$

$$\alpha_r = h'_r = Z_r$$

disto resulta que a escolha dos dois líquidos será governada pelas condições em que:

$$\alpha_r = 1$$

$$e \quad \left( \frac{\gamma_f - \gamma_s}{\gamma_f} \right)_m = \left( \frac{\gamma_f - \gamma_s}{\gamma_f} \right)_p$$

As escalas adotadas nas experiências realizadas estão abaixo relacionadas:

#### Escala de comprimento

$$\bar{X}_r = \frac{X_m}{X_p}$$

$$\bar{X}_r = 0,001 \text{ ou } 1:1000$$

#### Escala de altura

$$\bar{Z}_r = \frac{Z_m}{Z_p}$$

$$\bar{Z} = 0,02 \text{ ou } 1:50$$

#### Escala de Espaçamento

O espaço entre as placas do modelo foi calculado quando da calibração do modelo. Este valor foi obtido pela fórmula:

$$b_m^3 = \frac{q_m^2 \cdot 24 \cdot L \cdot v}{g (h_o^2 - h_f^2)}$$

tendo resultado

$$b_m = 0,0018 \text{ m}$$

O espaçamento adotado para o protótipo foi:

$$b_p = 5,0 \text{ m}$$

$$\bar{b}_r = \frac{b_m}{b_p}$$

$$\bar{b}_r = 0,0004$$

#### Escala de permeabilidade

A permeabilidade do modelo é obtida pela fórmula:

$$K_m = \frac{b_m^2}{12} \cdot \frac{g}{v}$$

sendo:

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$v = 0,000312 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$b_m = 0,0018 \text{ m}$$

$$K_m = 0,0096 \text{ m/s}$$

A permeabilidade do protótipo foi arbitrada em:

$$K_p = 7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$\bar{K}_r = \frac{K_m}{K_p}$$

$$\bar{K}_r = 1,37$$

#### Escala de Porosidade

A porosidade do modelo é:

$$n_m = 1$$

A porosidade do protótipo foi considerada igual a:

$$n_p = 0,30$$

$$n_r = \frac{n_m}{n_p}$$

$$n_r = 3,33$$

#### Escala de Tempo

Utilizando a equação abaixo obtem-se a escala de tempo

$$t_m = \frac{12}{g} \frac{K_p}{n_p} \frac{X_r^2}{Z_r} \frac{v}{b_m^2} t_p$$

$$t_m = 0,00025 t_p$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

#### Escala de Vazão

A escala de vazão foi obtida a partir da equação

$$Q_{xr} = \frac{K_{xr} b_r Z_r^2}{X_r}$$

Sendo:

$$K_r = 1,37$$

$$b_r = 0,00038$$

$$Z_r^2 = 0,0001$$

$$X_r = 0,001$$

$$Q_r = \frac{K_r b_r Z_r^2}{X_r}$$

$$Q_r = 0,0002$$

Como

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p}$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

## TESTES

Realizaram-se 12 testes, dos quais dois serão analisados neste trabalho.

Normalmente, este tipo de modelo deve ser operado em ambiente de temperatura constante. No presente caso não foi possível conseguir sala nestas condições mas a temperatura ambiental esteve em torno de 20°C com uma variação de  $\pm 3^\circ\text{C}$ . Esta variação provocou erros nos resultados em particular no que se refere as densidades e viscosidades dos líquidos, indo afetar a condutividade do modelo. Apesar disto, os resultados obtidos nas experiências dão uma perfeita noção do fenômeno da intrusão salina e da influência dos diferentes fatores.

Neste modelo não foi introduzido o fenômeno da precipitação.

Para as experiências foram admitidos uma série de condições inalteráveis, que são:

- a condutividade hidráulica do modelo ( $K_m$ ) igual a  $9,6 \times 10^{-3}$  m/s;
- a condutividade hidráulica do prototipo ( $K_p$ ) igual a  $7 \times 10^{-3}$  m/s;
- a largura entre as placas ( $b_m$ ) igual a 0,0018 m;
- a largura do prototipo ( $b_p$ ) igual a 5,0 m.

Todas as experiências finalizaram quando um dos casos abaixo ocorreu:

- intrusão salina no poço que estava sendo bombeado, ou;
- quando estabilizava o avanço da cunha salgada e não ocorria intrusão no poço.

Os resultados das experiências estão nas pranchas que estão no final do trabalho.

Os significados dos parâmetros que compõem estas pranchas estão explicados na figura nº 3.

Teste nº 1 ( ver plancha nº 1)

Para o teste nº 1 as seguintes condições foram admitidas, no modelo:

- distância do poço a costa ( $d_m$ ) = 10,0 cm
- espessura do aquífero ( $H_m$ ) = 22,0 cm
- profundidade do poço ( $Z_m$ ) = 16,5 cm
- gradiente ( $\frac{\partial \phi}{\partial x_m}$ ) igual a 0,06

Para o protótipo, aplicando-se as escalas, fica:

- distância do poço a costa ( $d_p$ ) = 100 metros
- espessura do aquífero ( $H_p$ ) = 22,0 metros
- profundidade do poço ( $Z_p$ ) = 16,5 metros
- o gradiente ( $\frac{\partial \phi}{\partial x_p}$ ) = 0,003

A temperatura média ambiente era igual a 20°C.

Os resultados do teste estão plotados na plancha nº 1 onde indicam-se os valores obtidos no modelo e seus homólogos no protótipo.

A vazão de bombeamento no modelo foi de  $Q_m = 0,14 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Este bombeamento durou 15 minutos (= 900 segundos) por que no final deste período ocorreu intrusão salina no poço.

Esta vazão  $Q_m = 0,14 \text{ cm}^3/\text{s}$  (=  $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$ ) corresponde a  $Q_p = 25 \text{ m}^3/\text{h}$  no protótipo.

O tempo total de bombeamento  $t_m = 15$  minutos (=900s) tem como homólogo no protótipo  $t_p = 1000$  horas que corresponde a aproximadamente 41 dias.

Isto nos mostra que seriam necessários em torno de 41 dias de bombeamento ininterrupto para que houvesse uma intrusão salina no poço bombeado.

O desenvolvimento da cunha salgada nos diferentes tempos pode ser observada nas fotos que compõem a plancha nº 1. Nesta plancha pode-se ver a variação do nível piezométrico no decorrer da experiência e a configuração tomada pela cunha salgada no momento da intrusão no poço.

Teste nº 2 ( ver prancha nº 2)

As condições iniciais para este teste foram, para o modelo:

$H_m$ (cm)	$Z_m$ (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	$Q_m$ (cm <sup>3</sup> /s)	$T_{oC}$	$d_m$ (cm)
26,0	20,5	0,04	0,06	20°	10,0

As mesmas condições transportadas para o protótipo tem-se:

$H_p$ (m)	$Z_p$ (m)	$\frac{\partial \phi_p}{\partial x_p}$	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /h)	$d_p$ (m)
13,0	10,25	0,002	1,08	100,0

Os resultados obtidos no teste estão plotados na prancha nº 2, onde pode-se ver os valores obtidos no modelo e seus homólogos no protótipo.

Após 35 minutos (= 2100s) de bombeamento no modelo, que corresponde a 2333 horas de bombeamento no protótipo, todos os níveis piezométricos estabilizaram sem ocorrer intrusão salina no poço.

CONCLUSÕES

O aquífero investigado nesse trabalho é imaginário, sendo admitido que o mesmo seja homogêneo e isotrópico.

Mostrou-se aqui 2 testes realizados mas, foram feitos 12 testes ao todo. Nos vários testes realizados procurou-se, ora manter os níveis piezométricos e variar a vazão de bombeamento, ora manter os níveis piezométricos e variar a vazão de bombeamento e a distância do poço bombeado.

Elaborou-se gráficos que deram uma melhor visualização dos fenômenos ocorridos durante os testes e que possibilitaram tirar uma série de conclusões.

Os gráficos nº 1 e 2 mostram a influência exercida pela vazão sobre o tempo de intrusão da água salgada para diferentes distâncias de bombeamento.

Pode-se observar no gráfico nº 1 que, se fosse efetuado no poço situado a 100 metros da costa um bombeamento com vazão igual a 6,0 m<sup>3</sup>/h, levaria cerca de 520 horas ou aproximadamente 22 dias para que houvesse intrusão de água salgada no poço. Enquanto que, com esta mesma vazão num poço situado a 500 metros da costa (gráfico nº 2), seriam necessárias 940 horas ou cerca de 40 dias de bombeamento para que a intrusão ocorresse.

Agora, se esta vazão foi reduzida para 1,0 m<sup>3</sup>/h, no poço situado a 100 metros da costa, levará cerca de 3800 horas de bombeamento ininterrupto ou 158 dias aproximadamente para estabilizar os níveis piezométricos sem que haja intrusão de água salgada, enquanto que, no poço situado a 500 metros este tempo será muitas vezes maior.

Pode-se dizer que a vazão de 6,0 m<sup>3</sup>/h (gráfico nº 1) é muito grande para este tipo de aquífero, levando-se em conta as condições, ou seja, espessura não muito grande do aquífero, condutividade hidráulica, gradiente muito baixo e a distância do poço ao mar muito pequena.

Pela observação do gráfico nº 3, pode-se ver que para uma vazão de 4 m<sup>3</sup>/h em um poço situado a 100 metros da costa a intrusão de água salgada ocorrerá em aproximadamente 600 horas ou cerca de 25 dias. Para esta mesma vazão de 4 m<sup>3</sup>/h, em um poço situado a 500 metros da costa, a intrusão de água salgada ocorrerá em aproximadamente 1300 horas ou cerca de 54 dias.

Este bombeamento, nos dois casos, é ininterrupto. Se associarmos com a realidade, veremos que o bombeamento contínuo durante 25 ou 54 dias praticamente não ocorre.

Lembre-se aqui, também, que o fenômeno precipitação pluviométrica não foi computado.

No gráfico nº 4 traçou-se as curvas de comprimento da cunha salgada x tempo de intrusão, isto para os testes nº 2, 8, 10 e 12, de onde pode-se tirar as conclusões abaixo:

- comparando-se o teste nº 2 com o teste nº 8 vê-se que, a espessura do aquífero é praticamente a mesma nos dois casos. A diferença está na vazão de bombeamento;

- observa-se que o avanço da cunha salgada nas primeiras 1000 horas de bombeamento é rápido, podendo haver intrusão no poço (teste nº 8) ou, diminuir a velocidade de avanço até estabilizar (teste nº 2);

- no teste nº 12 observa-se que a curva de avanço da cunha salgada conserva o comportamento semelhante a do teste nº 2, somente que de maneira mais suave. Varia o comprimento das duas cunhas, isto em função das vazões e também das temperaturas que são diferentes e que vem a alterar a viscosidade dos dois líquidos;

- no teste nº 10 pode-se observar que a tendência da cunha salgada, após haver intrusão no poço, é estabilizar, ou seja, diminuir a velocidade de avanço e o comprimento.

Concluindo, pode-se afirmar que a maior dificuldade encontrada foi na escolha dos dois líquidos que satisfizessem as condições para uso no modelo. A condição  $\alpha_r = 1$  que governa a escolha dos dois fluidos não pode ser alcançada.

Devido ao fato acima mencionado, a aplicação da fórmula Ghyben - Herzberg para o protótipo ficou comprometida pois os valores calculados são maiores que os transformados a partir das escalas.

Mas, este fato não tira a importância do trabalho, pois para um aquífero teórico como o que aqui foi estudado, os resultados nos mostram que o modelo está respondendo muito bem ao que dele se exige.

Com o acréscimo de algumas sofisticações no modelo, poder-se-á introduzir parâmetros, tais como a precipitação pluviométrica, possibilitando a sua aplicação para casos reais.

Afora os fatos acima citados, pode-se afirmar que o trabalho ora feito atingiu os propósitos, mostrando de maneira simples e objetiva a grande importância atual e futura do uso do modelo Hele-Shaw vertical na solução dos problemas de intrusão de água salgada em aquíferos costeiros.

#### SIMBOLOGIA

$h'$	- nível piezométrico da água doce sobre o nível do mar
$h_p$	- potencial puntual
$K$	- permeabilidade
$Q$	- vazão
$Z$ ou $\alpha$	- profundidade do interface abaixo do nível do mar
$b$	- espessura saturada abaixo do nível do mar de um aquífero livre
$\gamma_f$ ou $\gamma_d$	- peso específico da água doce
$\gamma_s$	- peso específico da água salgada
$b_m$	- espaçamento entre as placas de um modelo Hele-Shaw
$K_m$	- condutividade hidráulica do modelo
$\mu$	- viscosidade absoluta
$\nu$	- viscosidade cinemática
$x, y, z$	- coordenadas cartesianas
subíndice $m$	= modelo
subíndice $p$	= protótipo
subíndice $f$	= água doce
subíndice $s$	= água salgada
$\alpha_r$	- constante
$\delta$	- relação de diferença entre o peso específico das águas salgada e doce pelo peso específico da água doce.
$S_o$	- coeficiente de armazenamento específico definido como o volume de água liberada pelo armazenamento em um volume unitário do aquífero por unidade de altura; dimensão L.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

1. BEAR, Jacob. 1967. "Dynamics of fluids in porous media" pp. 557-573 e 687-701.
2. BEAR, Jacob. 1960. Scales of viscous analogy models for ground water studies. Journal of the Hydraulics Division. New York, 86(2):11-23 Feb.
3. COLUMBUS, Nathan. 1965. Viscous model study of sea water intrusion in water table aquifers. Water Resources Research, Washington, 1 (2): 313-23.
4. CUSTODIO, Emilio & LLAMAS, Manuel Ramon, ed. 1976. Hidrologia Subterranea. Barcelona, Omega, V.2.
5. SANTING, G. Modèle pour l'étude des problèmes de l'écoulement simul<sup>u</sup>tané des eaux souterraines douces et salées. IASH, vol. 2, pp. 184-193, Assemblée générale de Bruxelles- 1971.
6. Handbook of Chemistry and Physics. 30<sup>o</sup> ed. p. 1742.

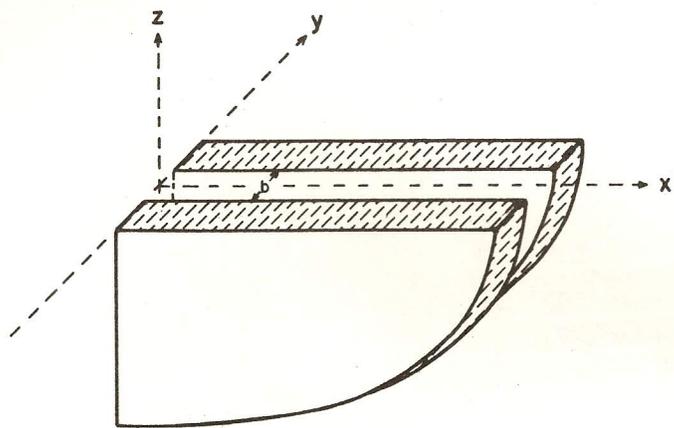


Fig. 1

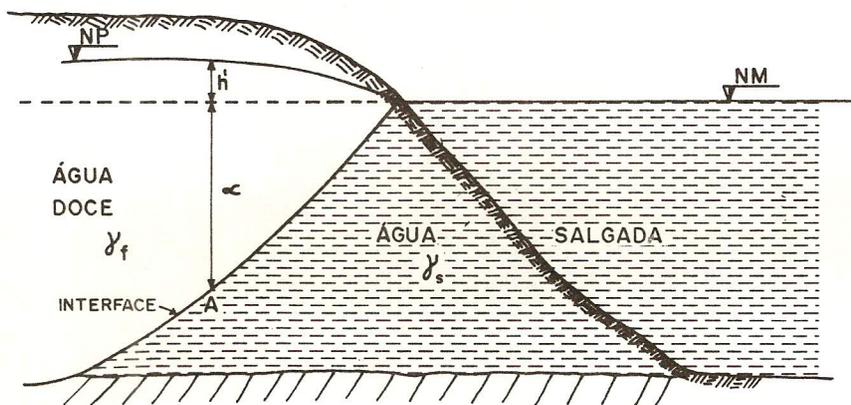


Fig. 2

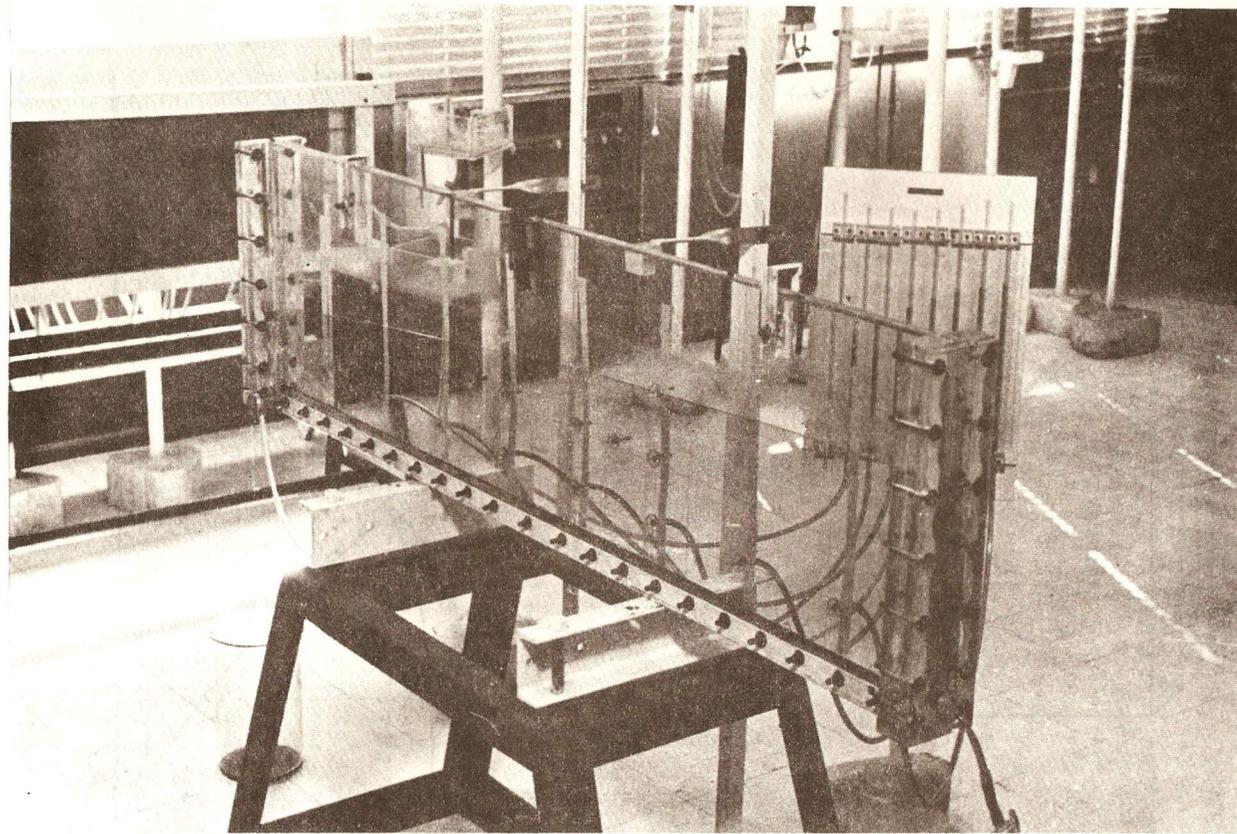


FOTO nº 1 - Vista do modelo Hele-Shaw vertical

MODELO HELE-SHAW VERTICAL

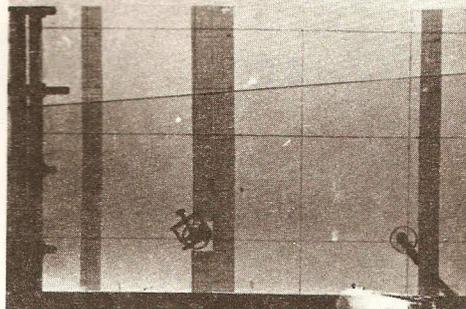


Foto - 1  
Bombeamento  
TEMPO - 0 min.  
NÍVEL - 2,7 cm  
VAZÃO - 0,0 cm<sup>3</sup>/s

H = 22,0 cm

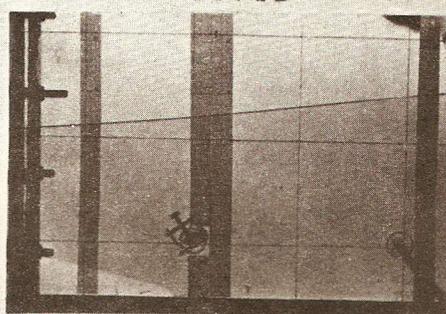


Foto - 2  
Bombeamento  
TEMPO - 5 min.  
NÍVEL - 4,5 cm  
VAZÃO - 0,13 cm<sup>3</sup>/s

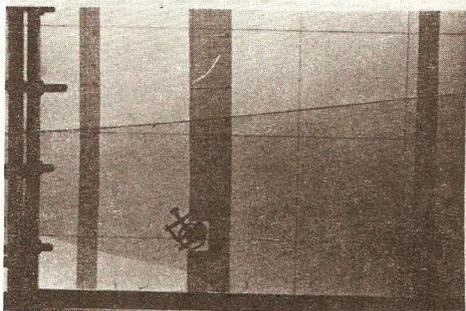


Foto - 3  
Bombeamento  
TEMPO - 9 min.  
NÍVEL - 5,3 cm  
VAZÃO - 0,14 cm<sup>3</sup>/s

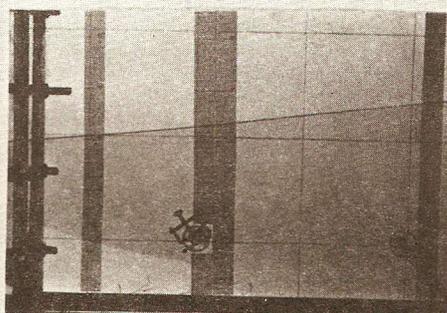


Foto - 4  
Bombeamento  
TEMPO - 11 min.  
NÍVEL - 5,6 cm  
VAZÃO - 0,14 cm<sup>3</sup>/s

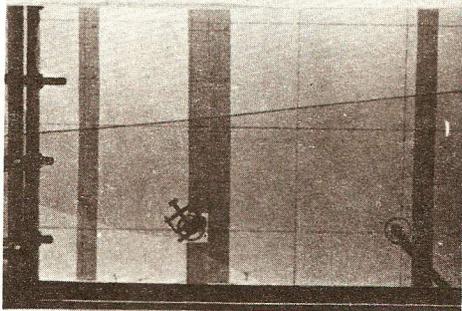


Foto - 5  
Bombeamento  
TEMPO - 13 min  
NÍVEL - 5,9 cm  
VAZÃO - 0,14 cm<sup>3</sup>/s

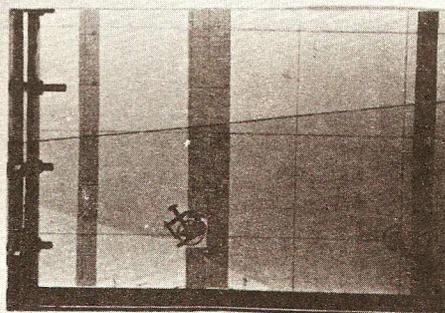


Foto - 6  
Bombeamento  
TEMPO - 15 min.  
NÍVEL - 6,0 cm  
VAZÃO - 0,14 cm<sup>3</sup>/s } INTRUSÃO

Prancha 1

MODELO HELE-SHAW VERTICAL

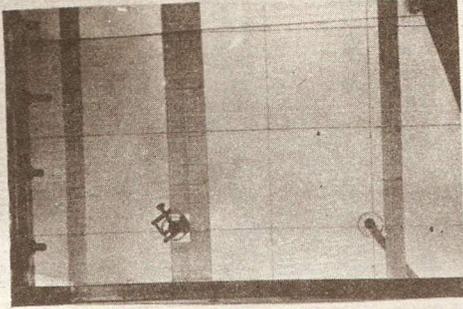


Foto - 1  
 Bombeamento  
 TEMPO - 0 min.      H = 26,0 cm  
 NÍVEL - 0,1 cm  
 VAZÃO - 0,0 cm<sup>3</sup>/s

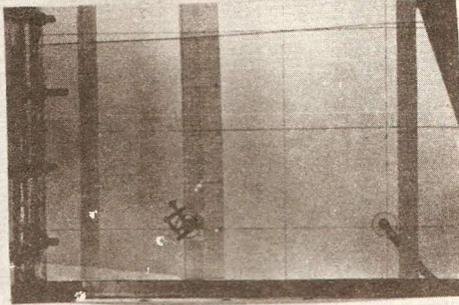


Foto - 2  
 Bombeamento  
 TEMPO - 7 min.  
 NÍVEL - 0,9 cm  
 VAZÃO - 0,07 cm<sup>3</sup>/s

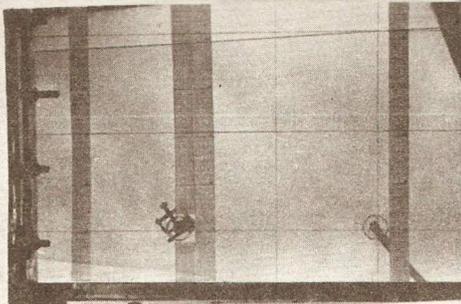


Foto - 3  
 Bombeamento  
 TEMPO - 15 min.  
 NÍVEL - 1,3 cm  
 VAZÃO - 0,06 cm<sup>3</sup>/s

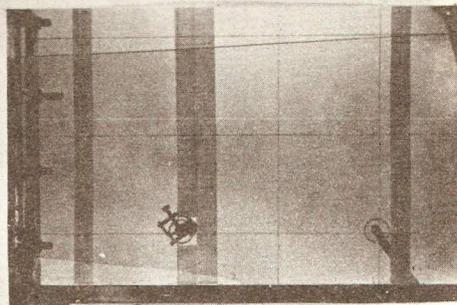


Foto - 4  
 Bombeamento  
 TEMPO - 29 min.  
 NÍVEL - 1,6 cm  
 VAZÃO - 0,06 cm<sup>3</sup>/s

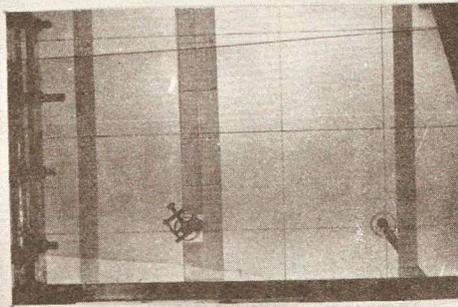


Foto - 5  
 Bombeamento  
 TEMPO - 35 min.  
 NÍVEL - 1,6 cm  
 VAZÃO - 0,06 cm<sup>3</sup>/s } ESTABILIZOU

Prancha 2

# MODELO HELE-SHAW VERTICAL

## TESTE Nº 1

$$d_m = 10,0 \text{ cm} \quad \longleftrightarrow \quad d_p = 100,0 \text{ m}$$

$$H_m = 22,0 \text{ cm} \quad \longleftrightarrow \quad H_p = 11,0 \text{ m}$$

### MODELO

t (s)	0	300	540	780	900		
Na <sub>1</sub> (cm)	18,6	16,6	15,7	15,0	14,8		
Na <sub>2</sub> (cm)	19,2	17,5	16,7	16,1	16,0		
P <sub>1</sub> (cm)	0,7	2,0	4,6	6,3	6,6		
P <sub>2</sub> (cm)	-	-	2,3	5,3	6,0		
L <sub>c</sub> (cm)	0,9	9,8	14,0	17,0	21,0		
Q (cm <sup>3</sup> /s)	-	0,13	0,14	0,14	0,14		

### PROTÓTIPO

t (h)	0	333	600	866	1000		
Na <sub>1</sub> (m)	9,30	8,30	7,85	7,50	7,45		
Na <sub>2</sub> (m)	9,60	8,75	8,35	8,05	8,00		
P <sub>1</sub> (m)	0,35	1,00	2,30	3,15	3,30		
P <sub>2</sub> (m)	-	-	1,15	2,65	3,00		
L <sub>c</sub> (m)	9,0	98,0	140,0	170,0	210,0		
Q (m <sup>3</sup> /h)	0	2,34	2,52	2,52	2,52		

#### ESCALAS

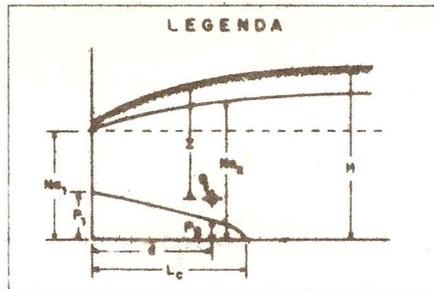
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

#### LEGENDA



Prancha nº 1

# MODELO HELE-SHAW VERTICAL

## TESTE Nº 2

$$d_m = 10,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 100,0 \text{ m}$$

$$H_m = 26,0 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 13,0 \text{ m}$$

### MODELO

t (s)	0	420	900	1740	2100
Na <sub>1</sub> (cm)	25,5	24,7	24,2	24,0	24,0
Na <sub>2</sub> (cm)	25,9	25,1	24,7	24,4	24,4
P <sub>1</sub> (cm)	0,9	1,3	2,0	2,3	2,3
P <sub>2</sub> (cm)	-	-	1,1	1,5	1,5
L <sub>c</sub> (cm)	2,2	9,7	14,0	16,5	16,5
Q (cm <sup>3</sup> /s)	-	0,07	0,06	0,06	0,06

### PROTÓTIPO

t (h)	0	466	1000	1933	2333
Na <sub>1</sub> (m)	12,7	12,3	12,1	12,0	12,0
Na <sub>2</sub> (m)	12,9	12,5	12,3	12,2	12,2
P <sub>1</sub> (m)	0,45	0,65	1,0	1,15	1,15
P <sub>2</sub> (m)	-	-	0,55	0,75	0,75
L <sub>c</sub> (m)	22,0	97,0	140,0	165,0	165,0
Q (m <sup>3</sup> /h)	0	1,26	1,08	1,08	1,08

#### ESCALAS

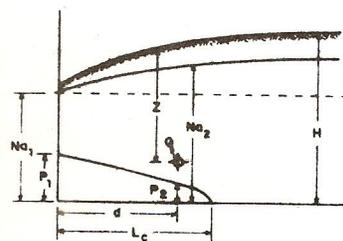
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

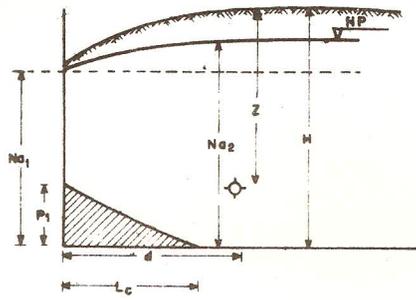
$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

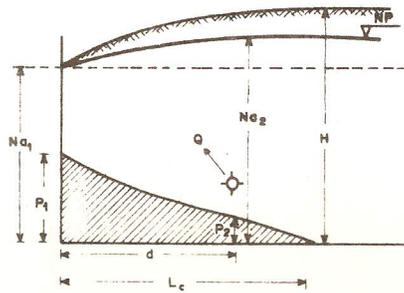
#### LEGENDA



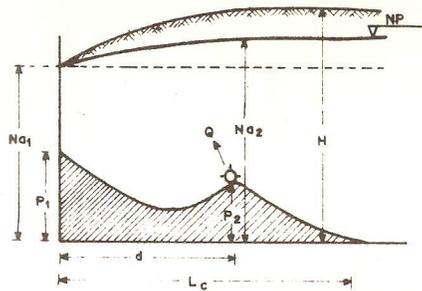
Prancha nº 2



$t = 0$



$t = t$



$t = t \text{ final}$

- $Na_1$  - Altura de água na costa
- $Na_2$  - Altura de água no poço
- $P_1$  - Altura do interface na costa
- $P_2$  - Altura do interface no poço
- $H$  - Espessura do aquífero
- $d$  - Distância do poço a costa
- $L_c$  - Comprimento da cunha salgada

Figura nº 3 - CONDIÇÕES GERAIS DOS TESTES

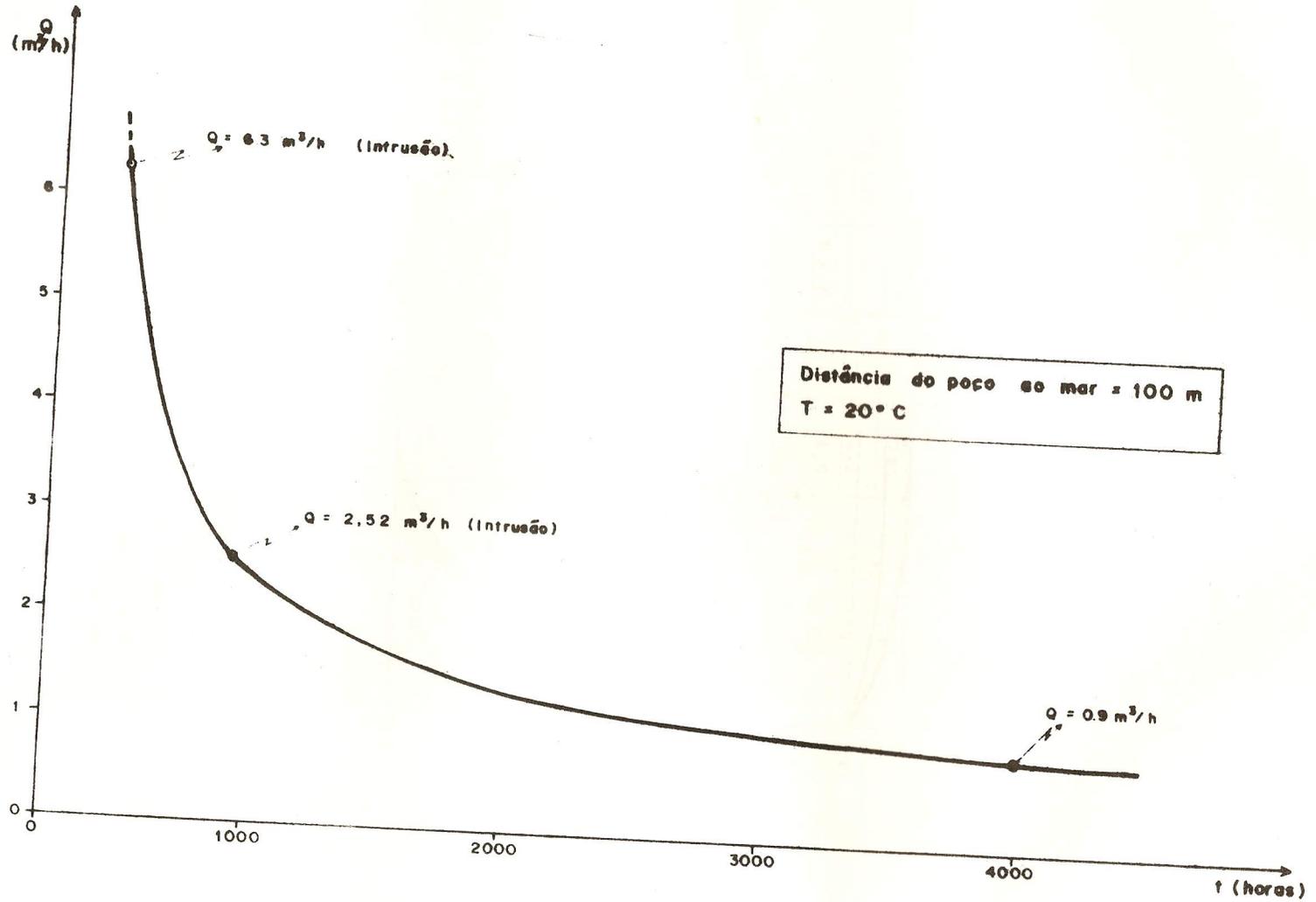


Gráfico nº 4 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO SOBRE O TEMPO DE INTRUSÃO

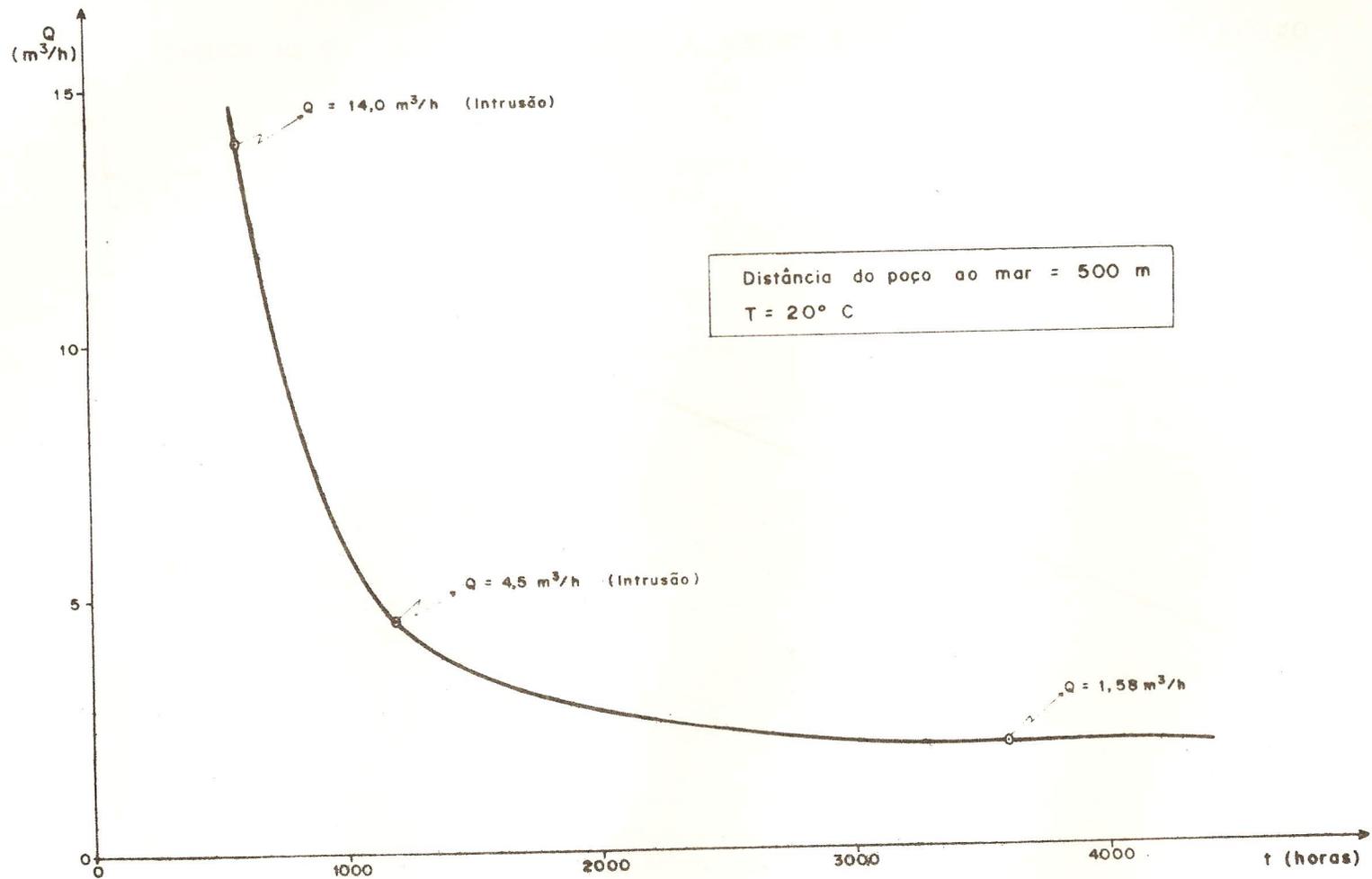


Gráfico nº 5 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO SOBRE O TEMPO DE INTRUSÃO

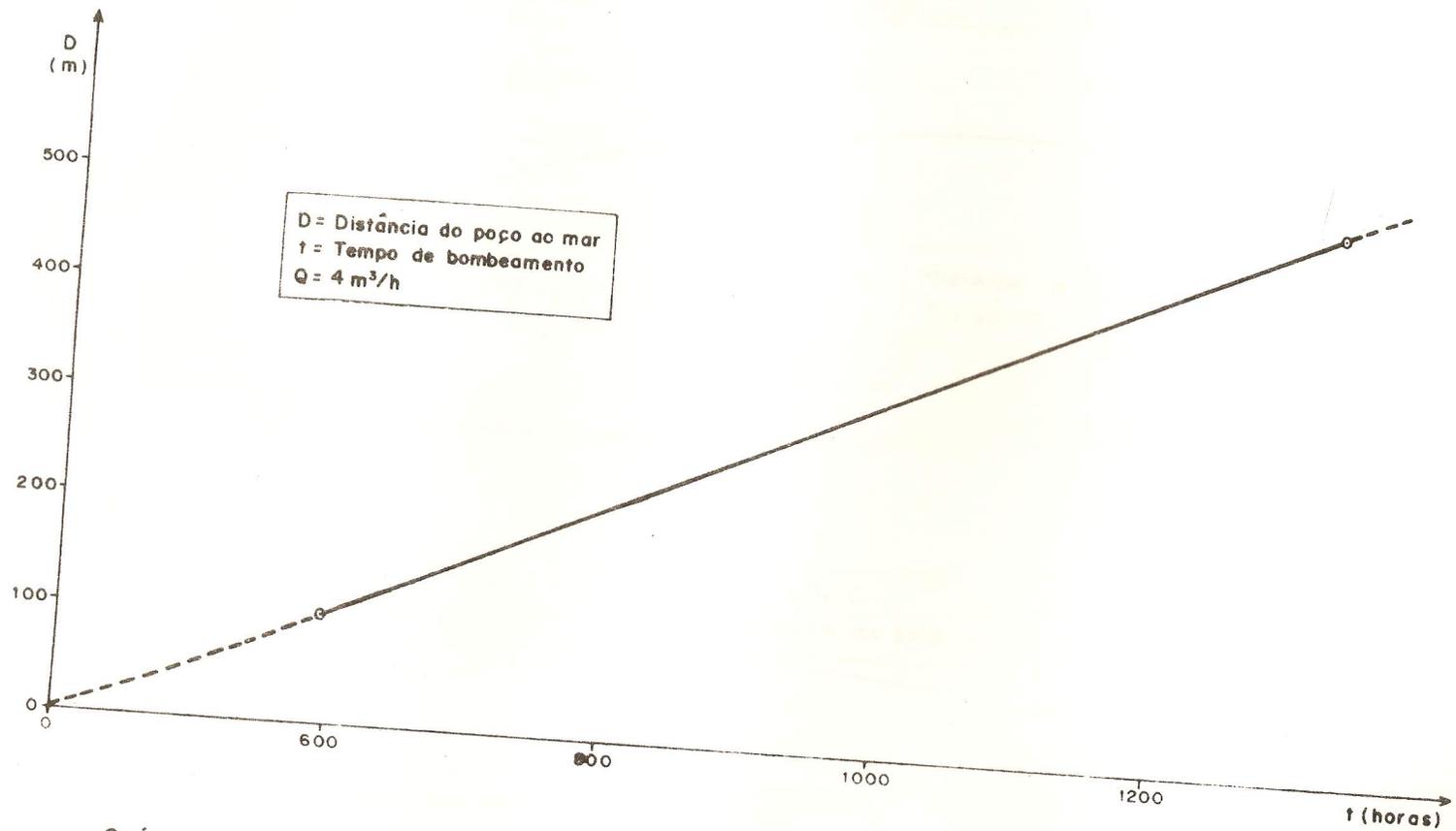


Gráfico nº 6 - INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA SOBRE O TEMPO DE INTRUSÃO

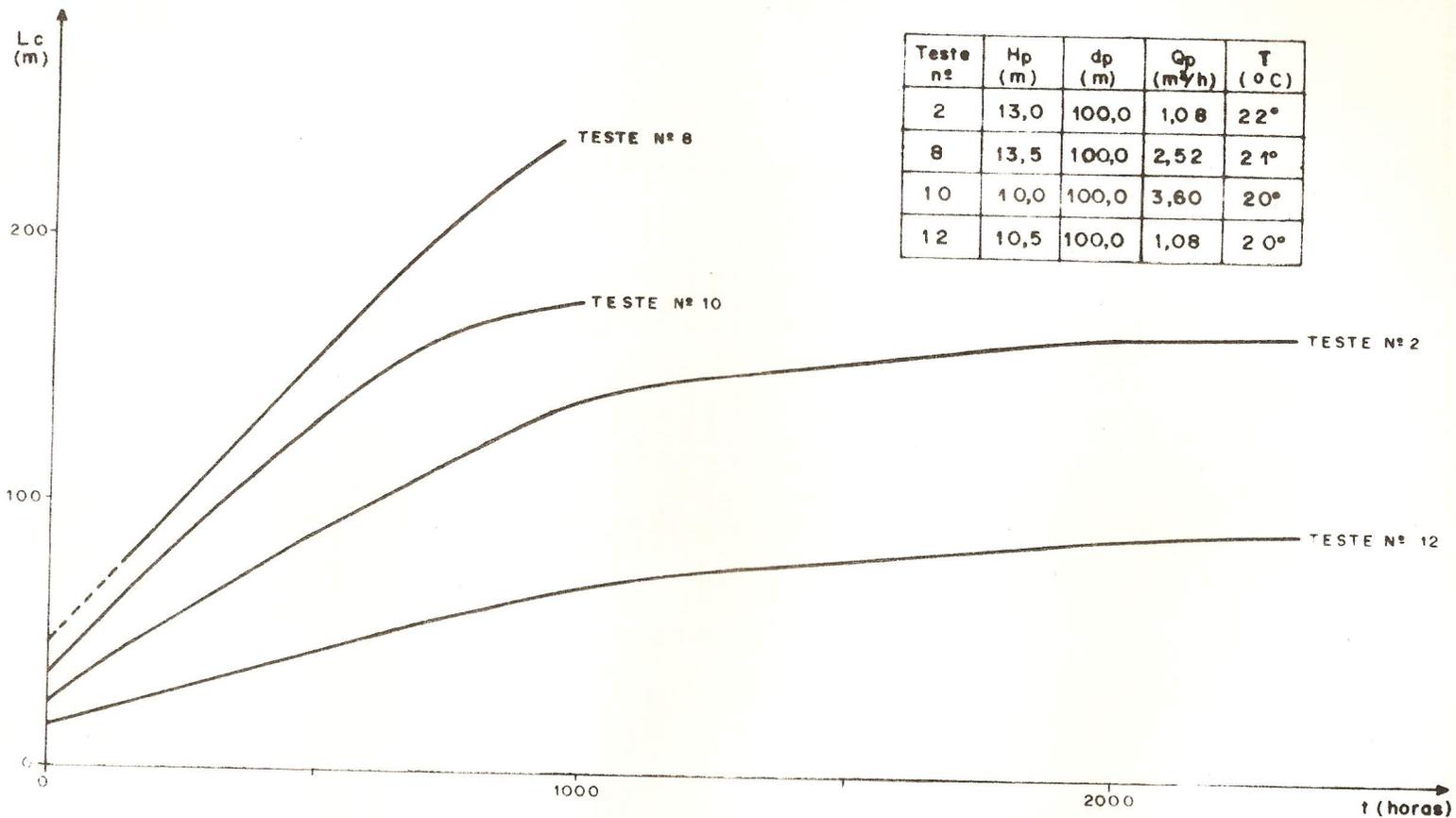


Gráfico nº 7 EVOLUÇÃO NO TEMPO DA CUNHA DE INTRUSÃO