FILTRAÇÃO E FLUXO DE ÁGUA CONFINADA SOB CORTINAS IMPERMEÁVEIS EM ESCAVAÇÕES

ITAQUÊ MENDES CAMARA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

Aprovado por:

COMISSÃO

PROF. Ph.D. VAJAPEYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN
- Presidente -

Gunther E. Bauer

PROF. Ph.D. GUNTHER ERWIN BAUER

Manoel Gilberto Barros

PROF. M.Sc. MANOEL GILBERTO DE BARROS

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL
FEVEREIRO - 1977

C172f Câmara, Itaquê Mendes.
Filtração e fluxo de água confinada sob cortinas impermeáveis em escavações / Itaquê Mendes Câmara. - Campina Grande, 1977.
69 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1977.
"Orientação : Prof. Dr. Vajapeyan Srirangachar Srinivasan".
Referências.

1. Escoamento - Hidráulica. 2. Água - Filtração e Fluxo. 3. Escavações em Meios Porosos. 4. Dissertação - Ciências. I. Srinivasan, Vajapeyam Srirangachar. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 626.24(043)

À minha esposa GLÓRIA MARIA
e a nossos filhos RODRIGO e
ALESSANDRA pelos momentos
de renúncia e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos

ao nosso orientador e amigo, Prof.Ph.D. VAJAPEYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, o qual nos distinguiu com o máximo de sua atenção, dedicação e amizade, não só na orientação deste trabalho, bem como durante todo o nosso curso de mestrado;

ao co-orientador, Professor Ph.D. GUNTHER ERWIN BAUER, pela dedicação com que nos orientou, pelas valiosíssimas sugestões e especialmente pela interpretação da referência de sua autoria;

ao Prof.M.Sc.MANOEL GILBERTO DE BARROS, da Universidade Federal da Paraíba, pelo estímulo à conclusão deste trabalho;

aos nossos pais, pelo muito que lhes devemos;

à Diretoria da Companhia de Águas e Esgotos do Maranhão - CAEMA, que nos permitiu freqüentar o curso de mestrado da Universidade Federal da Paraíba;

e a todas as pessoas de nossas relações, cujo apoio e compreensão humanos foram de grande valor ao longo da execução deste trabalho.

R E S U M O

Este trabalho estuda experimentalmente as características do fluxo de água sob cortinas verticais impermeáveis em escavações realizadas em meios porosos. O estudo analisa e compara a quantidade de filtração obtida na escavação com os valores propostos nos trabalhos experimentais de DAVIDENKOFF & FRANKE apresentados em (1) e o trabalho teórico de KOZLOV em (20).

A B S T R A C T

This work is an experimental study of the characteristics of flow of water into excavations in saturated porous media under sheet piles. The study mainly concerns with the variation of discharge into the excavation and the results are compared with the studies of DAVIDENKOFF & FRANKE and the theorical solution of KOZLOV.

Í N D I C E

Página

Página

LISTA DE SÍMBOLOS

Os seguintes símbolos são usados neste trabalho:

A_1 e B_1 = constantes complexas

B = semilargura da escavação
C_1, C = constantes arbitrárias
D = profundidade da escavação
d = densidade
F = coeficiente de segurança
G = peso
f = função
h = carga hidráulica causando fluxo
K = coeficiente de permeabilidade
L = largura da cortina
n_c = direção da normal a uma curva
n_t = direção da tangente a uma curva
P = profundidade de penetração da cortina no meio permeável
p = pressão
Q = vazão total
R e R_1 = região no plano z
R' = região transformada no plano t
(r,s) = coordenadas
T = espessura do meio permeável após a escavação
T' = espessura do meio permeável antes da escavação
t = plano auxiliar
t_1, t_2 t_3, ...t_n = parâmetros no plano t
U = função potencial
$\vec{v}$ = velocidade vetorial
(x,y) = coordenadas
$z = x + iy$ = variável complexa
$W = u - iv$ = velocidade complexa

α_1 e α_2 = curvas no plano z

α_1' e α_2' = curvas no plano t

Δ = operador de diferença

γ_a = peso específico da água

$\omega = \Phi + i\,\Psi$ = potencial complexo

Φ = função potencial

Ψ = função corrente

μ = coeficiente de viscosidade dinâmica

ρ = massa específica

$\theta_1, \theta_2, \ldots \theta_n$ = ângulos em radianos

$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k}$ = operador diferencial vetorial

∇_p = gradiente de p

$\nabla . \vec{v}$ = divergente de $\vec{v}$

$\nabla x \vec{v}$ = rotacional de $\vec{v}$

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ = operador Laplaciano

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O problema do escoamento em meios porosos é de suma importância na solução de grande número de problemas em várias áreas da Engenharia, entre as quais, citamos: hidráulica (barragens), irrigação e drenagem (canais), mecânica dos solos (fundações), engenharia sanitária (escavações) e outros. Historicamente, podemos considerar como marco inicial dos estudos de escoamento em meios permeáveis as experiências realizadas por DARCY, em 1856. Inúmeros outros pesquisadores, estudaram estes problemas utilizando métodos analíticos, numéricos e experimentais.

Em particular, o fluxo de água em estruturas rebaixadas, como,por exemplo, escavações, é de ocorrência muito comum e,conseqüentemente,vários problemas podem ser investigados, tais como:

- quantidade de água fluindo na escavação
- estabilidade do leito da escavação,etc.

Neste trabalho, propomo-nos, portanto, estudar experimentalmente as características do fluxo de água confinada sob cortinas verticais impermeáveis em escavações, utilizando um tanque de filtração em *"plexiglass"* para simulação do escoamento.

No capítulo II, fazemos uma análise teórica inicial sobre escoamento em meios permeáveis, cujo fenômeno é governado pela equação de LAPLACE (8) e pode ser resolvido matematicamente através de transformações conformes, especialmente a de Schwarz-Cristoffel (8).

No capítulo III, analisamos o problema particular de filtração sob cortinas impermeáveis em escavações, onde destacamos as soluções matemáticas desenvolvidas por

KOZLOV e FILCHAKOV apresentadas por KOCHINA (20), bem como os trabalhos experimentais realizados por MARSLAND (18), DAVIDENKOFF e FRANKE transcritos por BAUER (1).

No capítulo IV, descrevemos a técnica de construção do modelo experimental utilizado, assim como a metodologia empregada na condução dos testes.

No capítulo V, fazemos a análise e comparação dos resultados obtidos com os de KOZLOV, DAVIDENKOFF e FRANKE já referidos.

No capítulo VI, apresentamos as conclusões e recomendações.

CAPÍTULO II

ANÁLISE TEÓRICA PRELIMINAR

2.1 - Aspectos Gerais dos Escoamentos Planos em Meios Permeáveis

2.1.1 - Histórico

A origem do estudo do fenômeno da filtração em meios porosos reporta-se aos estudos de Darcy, em 1856, que realizou experiências acerca do fluxo de água em tubos cheios de areia, estabelecendo a lei do movimento uniforme para este tipo de escoamento (8).

Mais tarde, experimentos similares foram realizados em larga escala por muitos outros investigadores. Dupuit e Boussinesq desenvolveram a teoria hidráulica do fluxo de água subterrânea, a qual foi reproduzida por Harr (8). Forchheimer [segundo Kochina (20)] desenvolveu a teoria hidráulica dos poços. Datam de 1888 [conforme referido por Kochina (20)] as primeiras investigações teóricas e experimentais de Zjoukovsky sobre o fluxo de águas de subsolo.

A teoria matemática rigorosa do fluxo de água subterrânea sob estruturas hidráulicas foi estabelecida por Pavlovsky em 1922 e transcrita por Kochina (20). Suas investigações foram continuadas e desenvolvidas em numerosos trabalhos de estudantes e seguidores.

Os trabalhos desenvolvidos por Pavlovsky atraíram a atenção de Zjoukovsky, que novamente começou a trabalhar na teoria do fluxo de água subterrânea e, em 1920, deduziu um metódo de solução dos problemas de fluxos confinados e não confinados, reproduzida por Kochina (20).

2.1.2 - Considerações Básicas

Diz-se que um meio é poroso quando é continuamente constituído por um sistema complexo de pequenos canais que permitem a percolação da água.

No entanto, o estudo do escoamento de fluido em meio poroso não pode ser feito no domínio próprio dos canais, deixando-se de lado a fase sólida.

Através dos poros, um complicado movimento resulta, com a velocidade e aceleração variando em grandeza e direção de ponto a ponto, sendo portanto impossível examinar a velocidade de partículas isoladas. Por conseguinte, a representação quantitativa de um escoamento em meio poroso não é dada através da velocidade das partículas do fluido e, sim, através de valores médios hipotéticos das velocidas passando por uma área total do meio poroso. Na teoria da filtração é usual considerar-se não a velocidade, mas a vazão através de uma secção do meio.

Fisicamente a quase totalidade dos sistemas de fluxo é tridimensional, contudo muitos problemas de escoamento em meios porosos são essencialmente planos, com o movimento sendo substancialmente o mesmo em planos paralelos. Para estes problemas é conveniente tratá-los como bidimensionais pois facilita-se a solução analítica. Felizmente, em Engenharia Civil, uma grande maioria dos problemas pode ser enquadrada nesta categoria.

2.1.3 - Equação Geral dos Escoamentos Lentos

Por definição, um escoamento é dito "lento" se as forças de inércia são pequenas em comparação com as forças de atrito viscoso.

Os valores críticos do número de Reynolds,para o qual o fluxo em meios porosos muda de laminar para turbulento, tem sido encontrado por vários investigadores (19) como variando entre 1 e 12.

Nestes movimentos, a resistência é usualmente proporcional à primeira potência da velocidade.

A equação dinâmica geral do movimento dos fluidos incompressíveis, deduzida da equação de Navier - Stokes, na forma vetorial se escreve (4):

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho\vec{F} - \nabla p + \mu\Delta\vec{v} \qquad (2.1)$$

Nesta equação aparecem as diversas forças exercidas sobre uma partícula de volume unitário.

$\rho\vec{F}$ = forças de campo

$-\nabla p$ = forças de pressão

$\mu\Delta\vec{v}$ = forças de viscosidade

onde:

$\vec{v}$ = velocidade de uma partícula com componentes cartesianas u, v, w, ou seja:

$\vec{v} = \vec{v}\ (u, v, w)$

μ = coeficiente de viscosidade dinâmica

ρ = massa específica do fluido

$\Delta\vec{v}$ = vetor de componentes cartesianas u, v, w, ou seja (4)

$$\Delta\vec{v} = \nabla(\nabla.\vec{v}) - \nabla \times (\nabla \times \vec{v}). \qquad (2.1a)$$

Se as forças de campo derivam de um potencial U, por definição, temos:

$$\vec{F} = - \nabla U \qquad (2.2)$$

Resultando para (2.1)

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = - \nabla(p + \rho U) + \mu \Delta \vec{v}$$

No caso de U ser unicamente o campo gravitacional, ou seja, $U = gh$, teremos:

$$\nabla(p + \rho gh) = \mu \Delta \vec{v}$$

Calculando-se agora o divergente dos dois membros da expressão anterior e substituindo-se $\vec{v}$ pelo valor dado na equação (2.1a), vem

$$\nabla . \nabla(p + \rho gh) = \mu \nabla . (\nabla(\nabla . \vec{v}) - \nabla \times (\nabla \times \vec{v})) \qquad (2.3)$$

Considerando-se agora a equação da continuidade dos fluidos incompressíveis,

$$\nabla . \vec{v} = 0$$

e fazendo-se

$$p_1 = p + \rho gh,$$

a equação (2.3) se escreverá:

$$\nabla^2 p_1 = 0 \qquad (2.4)$$

Ou seja a pressão p_1 num escoamento lento satisfaz a equação de LAPLACE.

É muito conveniente no estudo do fluxo de água subterrânea introduzir a velocidade potencial Φ, definida como:

$$\Phi(x, y, z) = - K(\frac{p}{\rho g} + z) + C = - Kh + C \qquad (2.5)$$

Onde C é uma constante arbitrária.

Assim sendo,

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} ; v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} ; w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \qquad (2.6)$$

As equações (2.5) e (2.6) representam a lei de Darcy, generalizada para um meio isotrópico, que na forma vetorial se escreve como:

$$\vec{v} = - K\nabla\Phi \qquad (2.7)$$

onde:

K = coeficiente de permeabilidade do meio poroso.

Esta equação proporciona a ferramenta dinâmica para todas as investigações em fluxo de água subterrânea.

Da equação da continuidade segue-se que a velocidade potencial satisfaz a equação de LAPLACE:

$$\nabla^2\Phi = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 0 \qquad (2.8)$$

Da equação (2.7) podemos concluir que, para fluxos permanentes e fluxos laminares, o movimento de água subterrânea pode ser completamente determinado pela solução desta equação, sujeita às condições limites no domínio do fluxo.

A velocidade "média" de um escoamento em meio permeável provém, portanto, de um potencial escalar e determina um campo vetorial de fluxo conservativo.

Portanto, a solução de um problema de escoamento através de meio poroso concentra-se na solução da equação de LAPLACE.

2.1.4 - Escoamentos Planos Permanentes

As equações fundamentais de fluxos bidimensionais de água subterrânea no plano xy, a partir da equação de Darcy generalizada, equações (2.5) e (2.6) podem ser escritas na forma:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = - K \frac{\partial h}{\partial x}$$
$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = - K \frac{\partial h}{\partial y} \qquad (2.9)$$

pois que a velocidade de filtração e o gradiente são nulos perpendicularmente ao plano considerado.

Correspondentemente, a equação de LAPLACE se reduz a:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \qquad (2.10)$$

e a equação da continuidade torna-se:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (2.11)$$

Dessas duas equações, podemos deduzir a existência de uma função harmônica conjugada chamada função fluxo

$\Psi(x, y)$ tal que as condições de Cauchy-Riemann sejam satisfeitas:

$$u = \frac{\partial\Phi}{\partial x} = \frac{\partial\Psi}{\partial y} \; ; \; v = \frac{\partial\Phi}{\partial y} = - \frac{\partial\Psi}{\partial x} \qquad (2.12)$$

e portanto a equação de LAPLACE,

$$\nabla^2\Psi = 0$$

Em particular, mostra-se que, se a equação de LAPLACE é satisfeita por funções harmônicas conjugadas Φ e Ψ, então as curvas $\Phi(x, y) = constante$ são trajetórias ortogonais das curvas $\Psi(x, y) = constante$.

A combinação linear da função potencial $\Phi(x, y)$ e da função fluxo $\Psi(x, y)$ dá a função $\omega(x, y)$ característica do escoamento, chamada potencial complexo do escoamento.

$$\omega(x, y) = \Phi(x, y) + i\, \Psi(x, y) \qquad (2.13)$$

a derivada (8),

$$\begin{aligned} W(x, y) &= \frac{dW}{dz} = \frac{\partial\Phi}{\partial x} + i\, \frac{\partial\Psi}{\partial x} = u - iv \\ W(x, y) &= \frac{dW}{dz} = \frac{\partial\Psi}{\partial y} - i\, \frac{\partial\Phi}{\partial y} = u - iv \end{aligned} \qquad (2.14)$$

é também uma função analítica denominada velocidade complexa do escoamento. Ela é o conjugado complexo do vetor $\vec{v}$ neste ponto.

Decorrem da teoria do escoamento potencial as propriedades:

a) a curva $\Psi(x, y) = constante$ define uma linha de fluxo;

b) a diferença do valor de duas linhas de fluxo dá a vazão de escoamento;

c) a função $\Phi(x, y) = constante$ define uma linha equipotencial e a diferença de duas linhas equipotenciais dá a queda de potencial ao longo de qualquer linha ligando essas duas equipotenciais.

2.1.5 - Condições Limites

A definição de um escoamento dentro de um domínio qualquer é obtida pela solução da equação de LAPLACE:

$$\nabla^2\Phi = 0 \text{ ou } \nabla^2\Psi = 0$$

A solução desta (s) equação (ões) necessita do conhecimento dos valores da função Φ(ou Ψ) sobre o contorno do domínio. No caso geral de escoamentos planos permanentes através de solos homogêneos, quatro tipos de limites são encontrados, a saber:

a) *superfícies impermeáveis* - são os contornos subterrâneos de estruturas hidráulicas e também os limites da região de fluxo com solos impermeáveis. Elas constituem uma linha de fluxo, e portanto, a velocidade é tangente a esta linha. Definindo n_c e n_t como as direções normal e tangencial respectivamente, em um ponto do limite, temos da equação 2.12

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n_c} = \frac{\partial\Psi}{\partial n_t} = 0, \quad \Psi = \text{constante}$$

b) *as superfícies que delimitam o domínio de filtração,* mas em contato com a massa do líquido em repouso.

A pressão ao longo dessas superfícies pode ser tomada como obedecendo à lei hidrostática. Portanto, em um ponto P ao longo do limite AB da figura 2.1, a pressão na água é:

$$p = \gamma_a (h_1 - y) \qquad (2.15)$$

substituindo-se o valor de *p* da equação 2.15 em

$$\Phi = - K(\frac{p}{\gamma_a} + y) + C_1 \qquad (2.16)$$

resulta:

$$\Phi = \text{constante},$$

pois que K, C e h_1 são todos constantes. Assim os limites do domínio de filtração, tal como AB e FD da figura 2.1 são linhas equipotenciais.

c) *as superfícies livres sobre as quais a pressão é atmosférica, em contato com o ar.* A velocidade é tangente a essas superfícies e portanto são linhas de fluxo, com o potencial variando de acordo com a expressão

$$\Phi = - Ky + \text{constante} \qquad (2.17)$$

Algumas vezes pode acontecer que um fluxo devido à infiltração atinja a superfície livre e faça parte do escoamento. Esse fenômeno significa que o fluxo de água através de duas linhas de corrente é proporcional à projeção sobre o eixo de um arco de curva da superfície livre, ou seja, figura 2.2.

$$q = \Psi - \Psi_o = \varepsilon(x - x_o) \qquad (2.18)$$

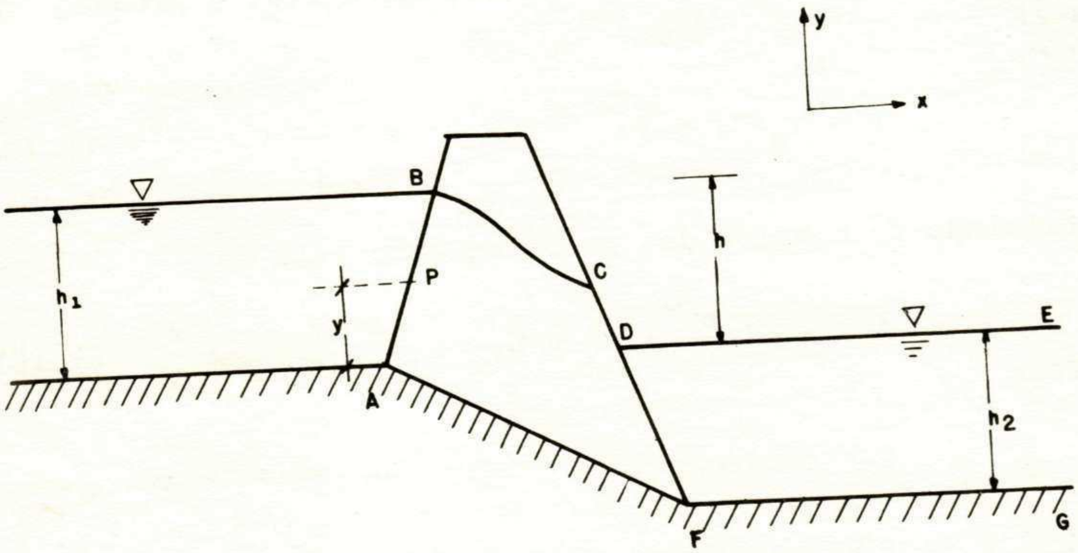


Figura - 2.1

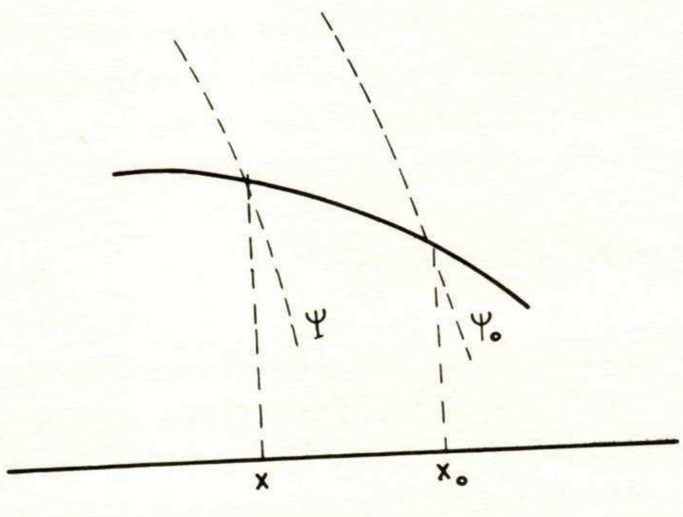


Figura - 2.2

Assim Ψ e Ψ_o são os valores da função corrente correspondente aos pontos da superfície livre com abscissas x e x_o e "ε" o total de água atravessando a unidade de comprimento da projeção horizontal do arco da superfície livre na unidade de tempo. O coeficiente pode ser positivo, no caso de infiltração, e negativo, no caso de evaporação.

Também as curvas de depressão que separam as regiões de solo saturado da região não saturada, através do qual o fluxo ocorre, como em BC na figura 2.1, segue a condição expressa pela equação 2.17.

d) *as superfícies de exudação* - neste caso a água não escoa dentro de um reservatório e,sim,ao ar livre. A condição de pressão é igual ao caso "c", onde "p" é a pressão atmosférica, mas estas superfícies não são superfícies de correntes. Como exemplo, CD na figura 2.1.

Para este caso teremos:

$$\Phi + Ky = \text{constante}$$

2.2 - A Transformação Conforme

Em muitos problemas de escoamento em meios permeáveis as regiões de domínio do fluxo apresentam fronteiras que definem figuras geométricas complexas, tornando a análise do problema muito difícil.Na maioria das vezes, é conveniente transformar essa região (ou curva) R de forma complicada numa outra região (ou curva) R' satisfazendo as mesmas condições de contorno, porém com forma geométrica mais simples, facilitando, por conseguinte, a análise do problema. Assim, para um determinado ponto em R', obtem-se o correspondente ponto em R. Seja, por exemplo, a região R da figura 2.3a no plano xy que é transformada na região R' da figura 2.3b no pla

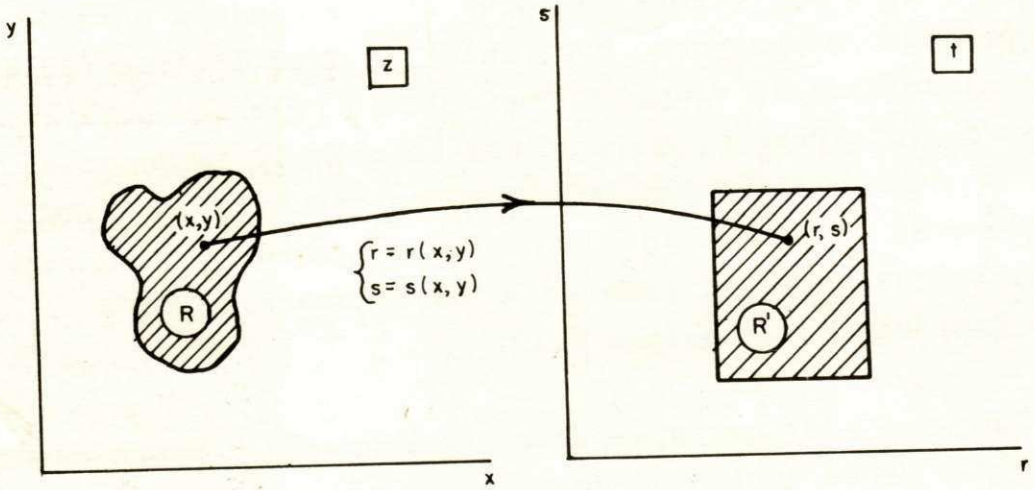


Fig. 2.3a

Fig. 2.3b

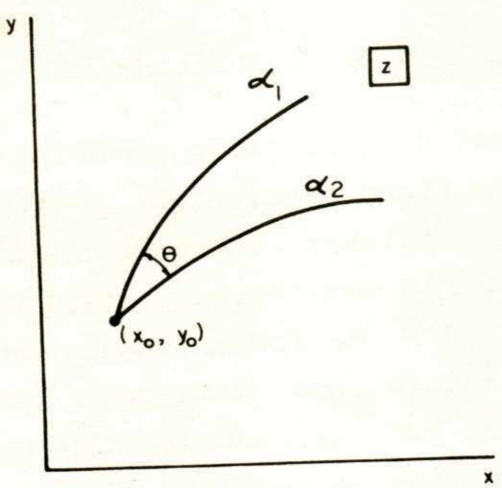


Fig. 2.4

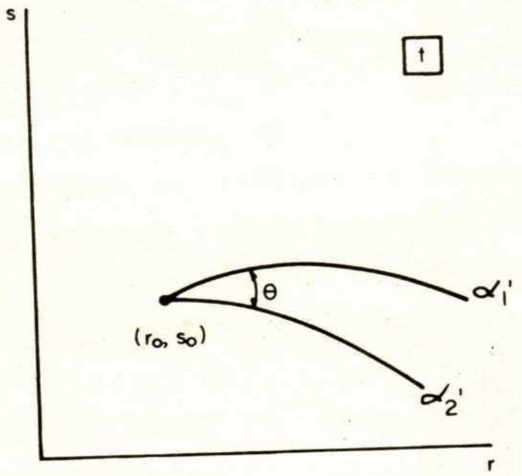


Fig. 2.5

uma só curva, existe uma função $z = f\ (t)$ que realiza a transformação conforme de R em R'; esta função $f\ (t)$ admite três constantes arbitrárias.

2.3 - Transformação de Schwarz-Cristoffel

Consideraremos um polígono (figura 2.6) no plano z com vértices em $z_1, z_2, \ldots, z_n$ e correspondentes ângulos interiores $\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n$, os quais são levados respectivamente nos pontos $t_1, t_2, \ldots, t_n$ sobre o eixo real do plano t (figura 2.7).

Uma transformação que leva o interior R do polígono do plano z na metade superior R' do plano t e a fronteira do polígono no eixo real, é dada por:

$$\frac{dz}{dt} = A_1\ (t-t_1)^{(\theta_1/\pi)-1} \ldots (t-t_n)^{(\theta_n/\pi)-1} \quad (2.20)$$

ou

$$z = A_1 \int (t-t_1)^{(\theta_1/\pi)-1} \ldots (t-t_n)^{(\theta_n/\pi)-1} + B_1 \quad (2.21)$$

onde A e B são constantes complexas, $\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n$ são os ângulos interiores do polígono em radianos no plano z e $t_1, t_2, \ldots, t_n$ pontos no eixo real do plano t, tais que:

$$t_1 < t_2 \ \ldots < t_n$$

correspondem aos vértices $z_1, z_2, \ldots, z_n$.

Observamos os seguintes fatos:

a) Quaisquer três pontos $t_1, t_2, \ldots, t_n$ podem ser escolhidos;

b) as constantes A_1 e B_1 determinam a forma, orientação e posição do polígono:

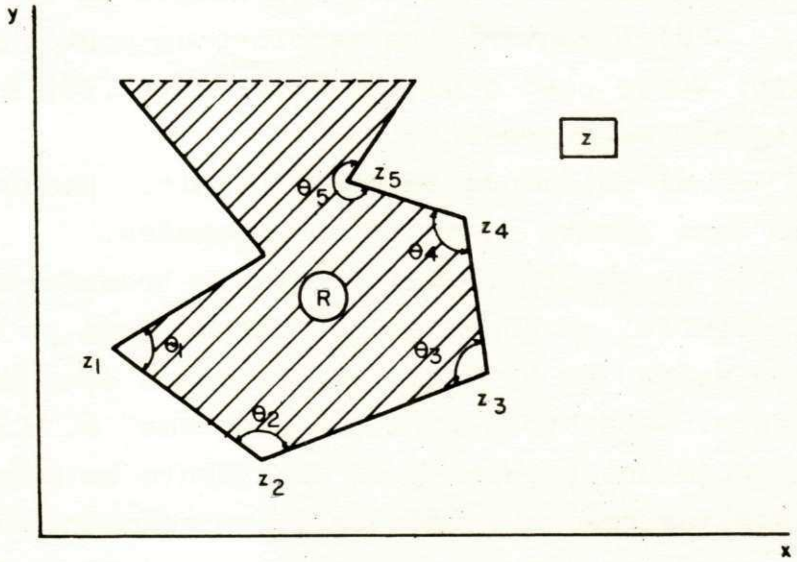

y
x
z
R
z_1
z_2
z_3
z_4
z_5
θ_1
θ_2
θ_3
θ_4
θ_5

Fig. 2.6

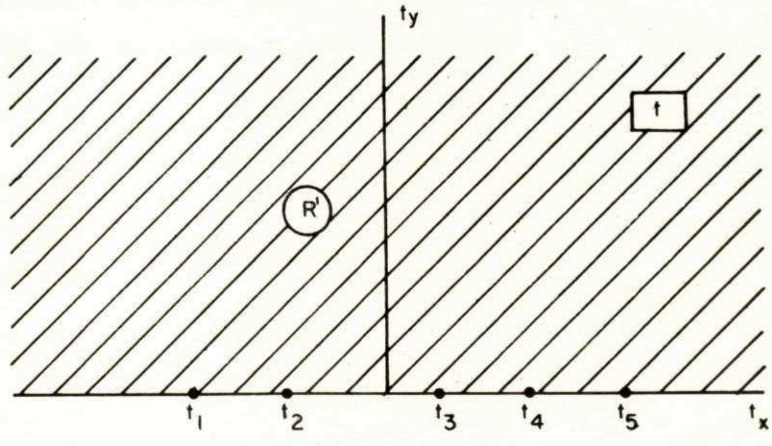

t_y
t
R'
t_1
t_2
t_3
t_4
t_5
t_x

Fig. 2.7

c) a constante complexa B corresponde ao ponto do perímetro do polígono que tem sua imagem em $t = 0$;

d) é conveniente escolher um ponto, a saber t_n, no infinito. Neste caso o último fator de (2.20) e (2.21), envolvendo t_n não está presente;

e) polígonos abertos infinitos podem ser considerados como caso limite de polígonos fechados.

A equação (2.21) é chamada transformação de Schwarz-Cristoffel em honra a dois matemáticos, o alemão H. A Schwarz e o suíço E. B. Christoffel, que a descobriram independentemente. Esta "transformação conforme" é a mais utilizada na solução dos problemas de escoamento em meios porosos. Convém ressaltar que esta técnica de solução envolve duas aplicações separadas das transformações de Schwarz-Cristoffel, onde as regiões R e R' dos planos z e w são levadas na metade superior ou inferior do plano auxiliar t, mantendo correspondência entre os vértices, os quais terão imagem no eixo real do plano t. Assim sendo, as regiões R e R' com formas complicadas nos planos z e w são transformadas em regiões simples no plano t, facilitando a análise do problema. Obtidas as transformações:

$$\begin{aligned} z &= f\,(t) \\ w &= f'(t) \end{aligned} \tag{2.22}$$

podemos facilmente encontrar a relação

$$w = F\,(z) \tag{2.23}$$

solução do problema.

CAPÍTULO III

FILTRAÇÃO SOB CORTINAS IMPERMEÁVEIS EM ESCAVAÇÕES

3.1 - Considerações Gerais

A implantação de estruturas rebaixadas em solos arenosos saturados é um problema freqüentemente encontrado na prática. Em tais situações, o engenheiro precisa realizar as escavações, atendendo a certos padrões de segurança do trabalho, bem como precisa, em outras ocasiões, fazer o rebaixamento do nível d'água para execução da estrutura prevista, como, por exemplo, concretagem de uma fundação. Um dos problemas freqüentes encontrado pelo engenheiro diz respeito à estabilidade das paredes laterais e do fundo da escavação, assim como a quantidade de água que flui através da base e das paredes laterais da escavação, a qual ele precisa conhecer para que possa providenciar corretamente os equipamentos de sucção. Para a estabilidade das paredes da escavação é usual o emprego de cortinas impermeáveis que funcionam também como redutores da vazão. Nestes problemas é de grande importância prática e econômica conhecer a profundidade de penetração da cortina para um determinado fator de segurança, a fim de evitar-se o desmoronamento do fundo da escavação e diminuir a vazão de filtração. Convém ressaltar que estes problemas são também freqüentemente encontrados nas escavações realizadas para colocação de tubulações de água e esgotos, sobretudo na orla marítima, onde a mesma técnica e os cuidados devem ser seguidos.

3.2 - Formulação do Problema

O problema especificamente aqui considerado concerne ao estudo das características de fluxo bidimensional associado com duas cortinas impermeáveis imersas num meio poro so de espessura finita, no qual se produziu uma escavação conforme é ilustrado na figura 3.1.. Procurou-se, no início, estabelecer a quantidade de filtração fluindo na escavação, para diversos valores da profundidade de penetração da cortina, carga hidráulica, largura da escavação, espessura do meio poroso antes da escavação e dentro da escavação, profundidade da escavação, respectivamente P, h, 2B, T', T, D da figura 3.1.

3.3 - Soluções Analíticas e Numéricas

A solução matemática rigorosa para o problema de filtração sob cortinas impermeáveis em meios porosos de espessura finita (camada impermeável numa profundidade finita), como descrito anteriormente, foi desenvolvida com a utilização das transformações de Schwarz-Cristoffel pelo matemático KOZLOV, em 1939, para um meio homogêneo e isotrópico, e referenciada por KOCHINA (20).

Esta solução apresentada por KOZLOV para o potencial complexo envolve integrais elípticas completas e incompletas de primeira, segunda e terceira ordem; contudo KOZLOV não apresentou nenhum nomograma para este caso, em virtude das dificuldades de calcular as integrais elípticas de terceira ordem incompletas.

De Wiest (5) notou que este problema é um caso particular da estrutura generalizada resolvida por FILCHAKOV e apresentada por KOCHINA (20). Nesta solução de FILCHAKOV as integrais elípticas de terceira ordem são desenvolvidas em termos de funções Jacobianas Teta e Zeta, as quais são avaliadas através de séries infinitas de produtos de funções trigonométricas e hiperbólicas propostas por ele. Também neste caso nenhum nomograma foi elaborado.

McNamee (17) apresenta uma solução numérica deste tipo de problema para o caso de profundidade finita de meio poroso e para casos particulares quando a largura da es

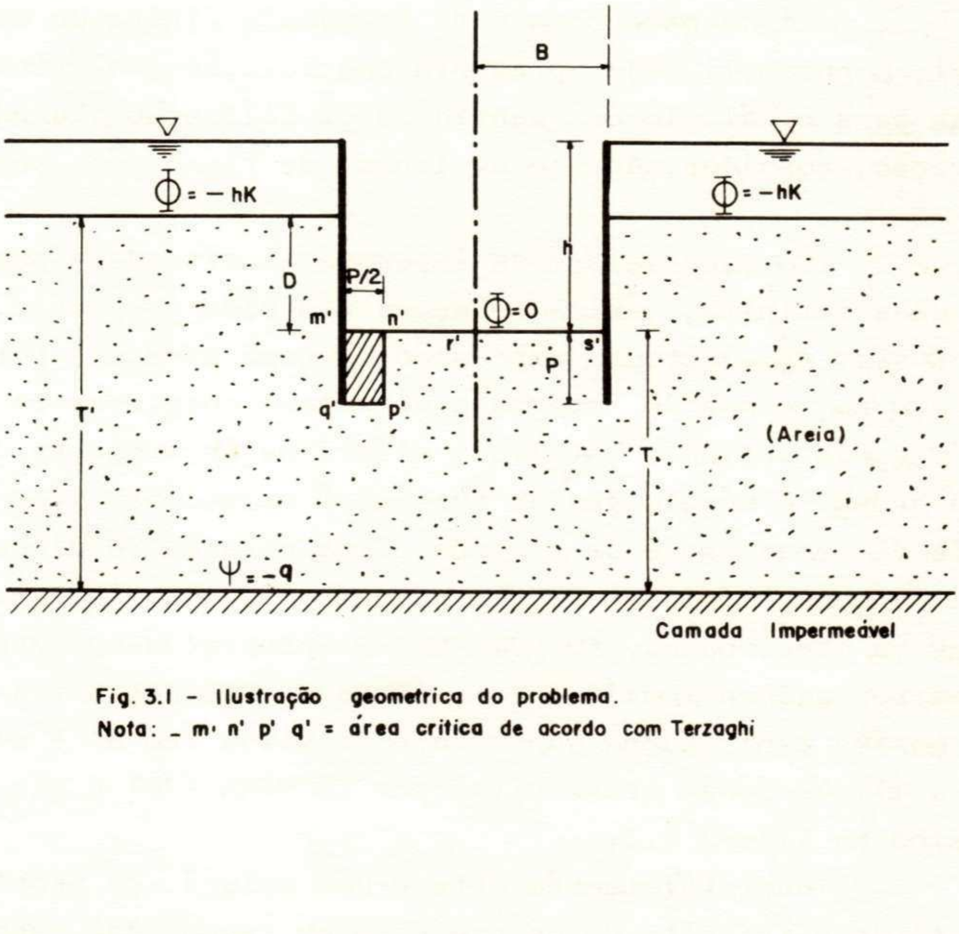


Fig. 3.1 - Ilustração geometrica do problema.
Nota: _ m' n' p' q' = área crítica de acordo com Terzaghi

cavação tende para o infinito. Curvas são apresentadas para o gradiente de saída (exit gradient) e para o potencial na extremidade da cortina. Entende-se por gradiente de saída (exit gradient) o máximo gradiente hidráulico ao longo dos limites de descarga, o qual implica uma maior velocidade e portanto o problema de entubamento (piping). McNamee ainda sintetizou os resultados dos modelos de testes na forma de gráficos. Na figura 3.2 temos a profundidade de penetração requerida para escavações em areia de diferentes larguras para fatores de segurança, variando de 1.0 a 2,5 (17),que será explicado posteriormente.

Ainda para o caso de espessura finita do meio permeável, Schneebeli (23) apresenta uma solução analítica aproximada para o cálculo da quantidade de filtração fluindo na escavação, considerando que as linhas de fluxo são semi-elipses.

No caso da camada impermeável situada a uma profundidade infinita, várias soluções têm sido propostas. O próprio KOZLOV apresentou a expressão inversa para o potencial complexo em termos de integrais elípticas completas de primeira e segunda ordens e integrais elípticas incompletas de segunda ordem. O módulo destas funções é relacionado com a geometria da escavação e da cortina. Esta relação funcional envolve funções elípticas Jacobianas em adição às integrais elípticas já mencionadas. KOZLOV também apresentou nomogramas com parâmetros adimensionais para o fluxo de filtração e a velocidade máxima e mínima na superfície de saída (em m' e r' da figura 3.1) que foram transcritos por KOCHINA (20) e que apresentamos na figura 3.3.

Harr (8) também obteve uma solução do problema com profundidade infinita do meio poroso em termos das mesmas funções usadas por KOZLOV. Harr também apresentou nomogramas para o cálculo do fluxo de filtração e para a determinação do máximo gradiente de saída (exit gradient) ao longo da base da escavação (m' e s' na figura 3.1) em função do módulo destas funções e dos parâmetros geométricos da escavação.

Rama Rao (21) analisou também este problema para o caso de profundidade infinita do meio poroso em termos das funções Zeta de Weierstrass e funções P de Weierstrass, apresentando redes de fluxo para algumas relações geométricas da cortina e escavação.

Nós tentamos desenvolver uma solução analítica, utilizando as transformações de Schwarz-Cristoffel para o caso de profundidade finita do meio permeável, no entanto tal solução,envolvendo integrais elípticas incompletas de terceira ordem,se constituiu num impedimento; sobretudo para o caso "circular" de tais integrais elípticas, cujas funções Jacobianas Teta e Zeta (que, combinadas, permitiriam calculá-las), tendo os seus argumentos complexos, não foram encontradas tabeladas.

3.4 - Investigações Experimentais Anteriores

Investigações experimentais realizadas por Marsland (18) no Building Research Station, U.K., tem dado resultados muito significativos, em termos de estabilidade. Os estudos foram conduzidos em um tanque de filtração usando microscópios para observação do movimento na areia. Para muitos casos, sequências fotográficas coloridas do processo de desmoronamento foram tomadas. Como era esperado, os resultados experimentais concordaram com os resultados previstos na análise matemática dentro de uma margem de erro de 10%. Marsland mostrou que o desmoronamento das escavações em areia solta é governada pelo critério do "heaving gradient" e que na areia densa é governada pelo critério do "exit gradient". O "heaving gradient" é o máximo gradiente hidráulico ao longo de todo o limite da descarga e capaz de produzir o desmoronamento da base da escavação. Também recomendou o investigador o cálculo do "heaving gradient", usando unicamente o potencial na extremidade da cor tina. Transcrevemos os diagramas que dão a profundidade de penetração da cortina para diferentes fatores de segurança para os casos de areia solta e densa com meio poroso de espessura finita e infinita.

Bauer (1) apresenta os gráficos desenvolvidos por Davidenkoff e Franke em 1965, os quais se basearam em resultados experimentais realizados, para cálculo da quantidade de filtração, bem como o coeficiente de segurança contra o levantamento do fundo da escavação (bottom heave) para diferentes espessuras do meio permeável, conforme vemos na figura 3.4.

Como sabemos, a teoria da filtração em meios porosos é baseada na lei generalizada de Darcy, equação 2.7. No caso de escavações em solos permeáveis sob uma carga hidráulica, a queda de pressão verificada na filtração devido ao atrito viscoso não pode ser desprezada. A pressão estática diminuirá do lado da carga hidráulica de valor correspondente ao gradiente hidráulico e aumentará sempre do mesmo valor do lado da escavação.

Para computar a quantidade de filtração e a direção do fluxo sobre uma cortina é necessário determinar também a intensidade e a distribuição de pressões no meio poroso.

A pressão e a direção do fluxo podem ser determinadas com relativa facilidade através de uma rede de fluxo. Embora a construção gráfica de uma rede de fluxo seja muitas vezes trabalhosa, é um meio comumente empregado na solução de problemas de fluxos bidimensionais.

Da teoria que tem sido explanada e detalhada por Harr (8) e outros, a quantidade de filtração "q" por unidade de largura e por unidade de tempo pode ser expressa como:

$$q = \frac{N_\Psi}{N_\Phi} K h = F_o K h \qquad (3.3)$$

onde:

N_Ψ = número de tubos de fluxo

N_Φ = número de equipotenciais

K = permeabilidade efetiva

h = perda de carga

O fator F_o pode ser considerado como um fator de forma geométrica dependendo da forma do domínio do fluxo e das condições limites. Bauer (1) apresenta em seu trabalho os gráficos propostos por Davidenkoff & Franke (1965), o qual está reproduzido na figura 3.4, podendo ser utilizado para determinar a quantidade de filtração bem como o fator de segurança contra o levantamento do fundo da escavação (bottom heave), para diferentes espessuras da camada permeável.

A quantidade de filtração (1) pode então ser calculada da relação:

$$q = K\, h\, \frac{1}{\alpha_I + \alpha_{II}} \qquad (3.4)$$

em que:

q = vazão por unidade de comprimento da cortina

α_I = coeficiente admensional determinando a perda de energia na região I

α_{II} = tal como α_I, exceto para região II, isto é dentro da escavação.

Para calcular α_I entramos no ábaco da figura 3.4 com a relação S/T' e usamos unicamente a curva T/B = 0, ao passo que para o cálculo de α_{II} entramos com P/T e podemos usar todas as curvas T/B.

Uma das preocupações dos engenheiros é saber qual deve ser a profundidade de penetração para um dado fator de segurança, necessária para evitar o deslocamento do fundo da escavação. Segundo investigações efetuadas através de mode los por Terzaghi e Peck em 1967 e referidos em (1), a zona de perigo de levantamento da areia do fundo da escavação é confinada ao retângulo de largura igual a metade da penetração e altura igual à penetração (área m' n' p' q' da figura 3.1).

O excesso médio de pressão hidrostática na base do prisma é $\gamma_a\ h_a$. Considerando-se as condições de equilíbrio da secção horizontal *p' q'*, temos que o excesso da força hidrostática atuando de baixo para cima é:

$$S = 1/2 \quad P\ \gamma_a\ h_a \tag{3.5}$$

onde:

γ_a = peso específico da água
h_a = excesso de carga hidrostática na base do prisma.

O peso do prisma submerso atuando verticalmente para baixo é:

$$G = 1/2 \quad P^2\ \gamma'_s \tag{3.6}$$

onde:

γ'_s = peso específico do solo submerso.

Portanto, o fator de segurança contra o deslocamento do fundo da escavação por entubamento (piping) é dado por:

$$F = \frac{G}{S} = \frac{P\ \gamma'_s}{\gamma_a\ h_a} \tag{3.7}$$

Ainda, segundo Bauer (1), a profundidade de penetração relacionada com o fator de segurança contra o fenômeno de levantamento do fundo da escavação (bottom heave) é dado por:

$$P = \frac{h}{2} \left(F \frac{\gamma_a}{\gamma_s'} - 1 \right) \qquad (3.8)$$

Do "English Civil Engineering Code of Pratice", os valores mínimos para a profundidade de penetração da cortina são dados para uma escavação aberta (1).

$$\begin{array}{lll} B > h & D\ min = 0{,}4\ h & \\ B = h & D\ min = 0{,}5\ h & (3.9) \\ B = 0{,}5\ h & D\ min = 0{,}7\ h & \end{array}$$

Mc Namee (17) e Marsland (18) apresentaram resultados experimentais com modelos em forma de nomogramas que relacionam fator de segurança com profundidade de penetração da cortina. Reproduzimos na figura 3.5 os nomogramas de Marsland.

3.5 - Objeto do estudo

Considerando-se que o problema aqui estudado não apresenta uma solução analítica completa, relacionando os diversos parâmetros de escavação e cortina (as de KOZLOV e FILCHAKOV não apresentam nomogramas para cálculo da vazão de filtração em funções dos parâmetros citados) bem como as nossas próprias dificuldades em fazê-la completa, fomos forçados a procurar estudar experimentalmente o problema da filtração sob cortinas impermeáveis em escavações. Como citamos, alguns trabalhos experimentais já foram realizados, no entanto, nenhum deles estuda completamente todos os aspectos claramente, existindo controvérsias quanto à sua utilização geral, o que nos levou principalmente a verificar os resultados propostos nos trabalhos citados. Assim sendo, partimos para estudar este problema experimentalmente e tentar uma comparação em termos de vazão e estabilidade com as investigações já citadas.

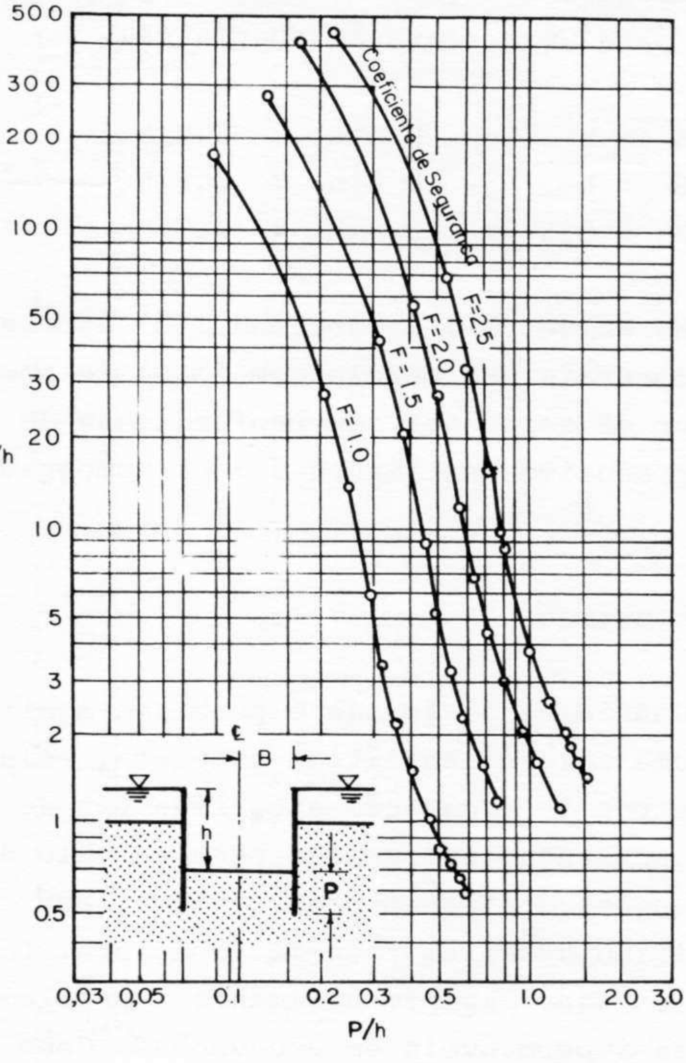


Fig. 3.2 - Profundidade de penetração, P, para escavações de diferentes larguras. (Segundo McNamee, 1949).

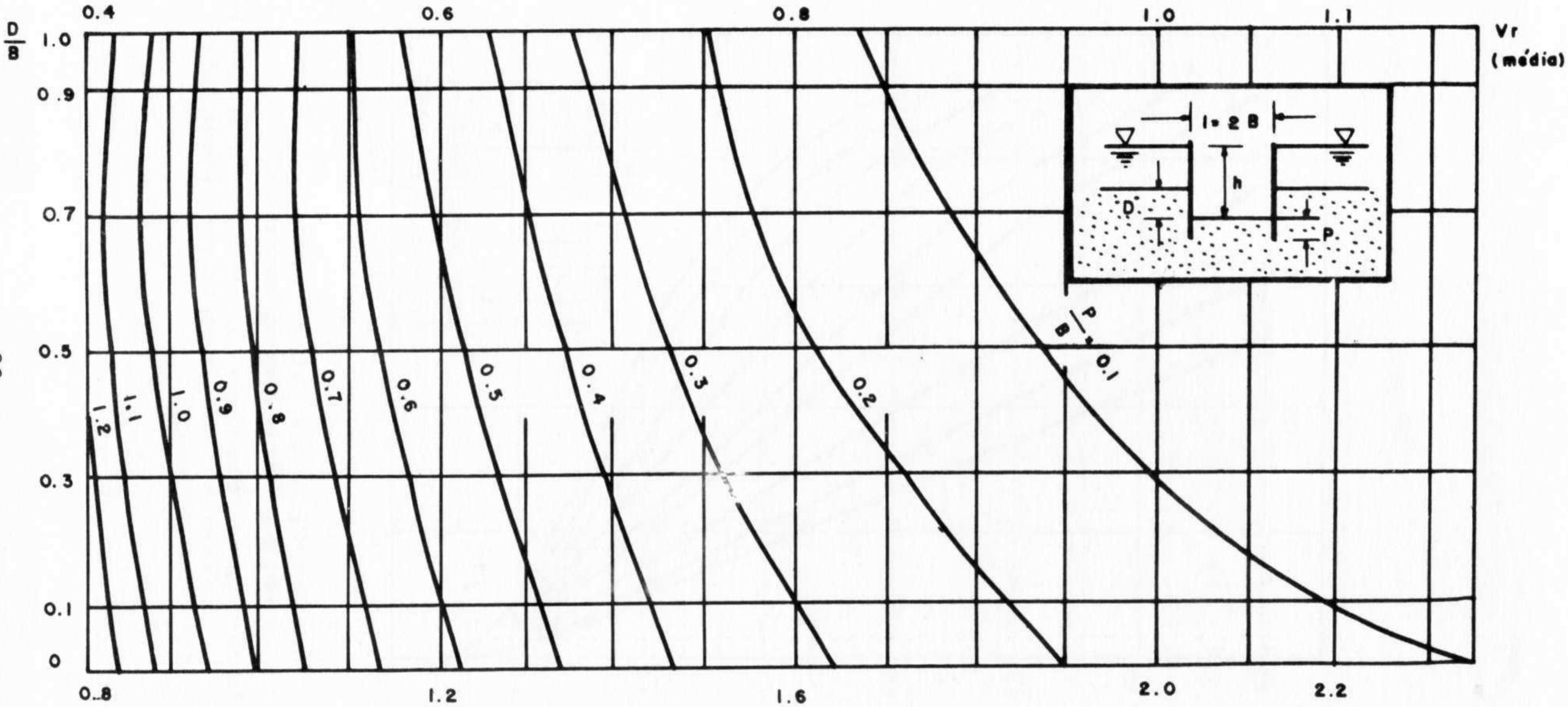
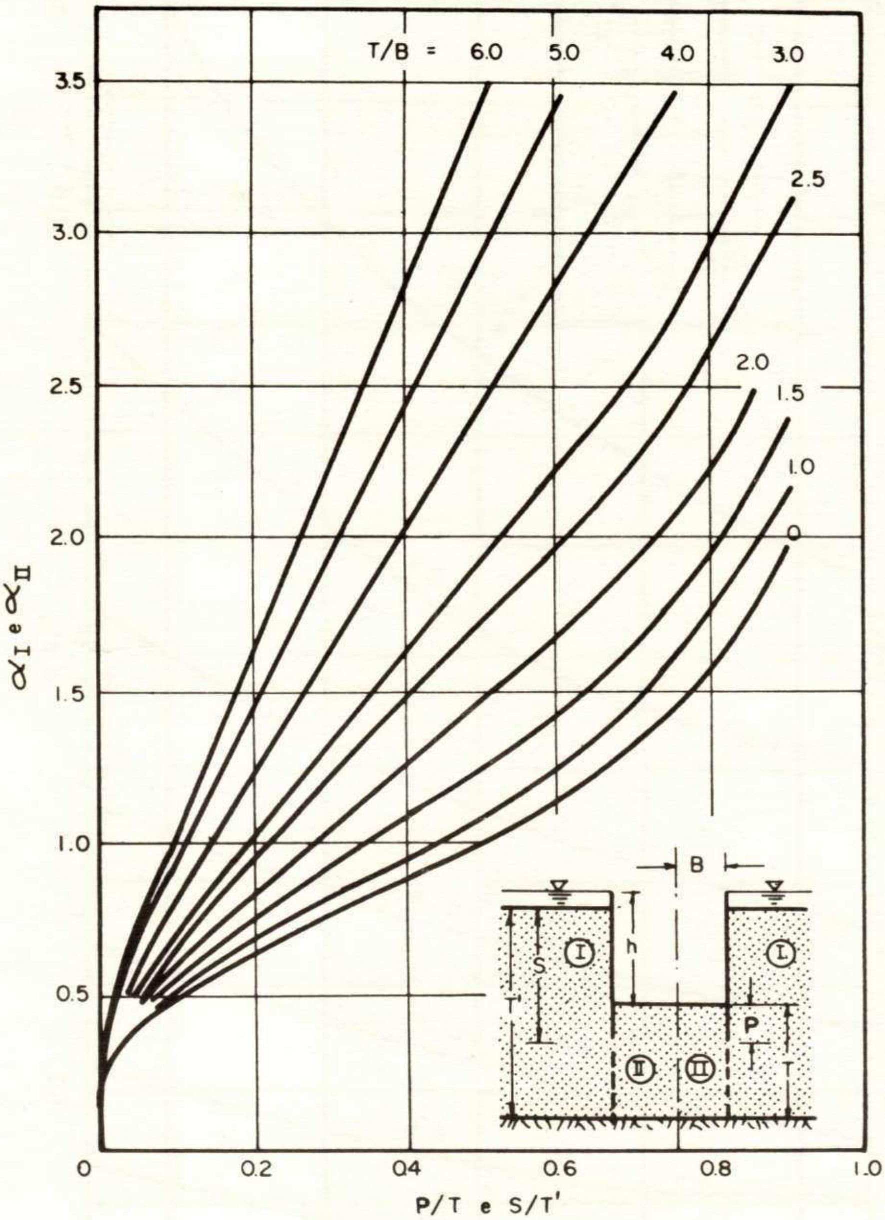
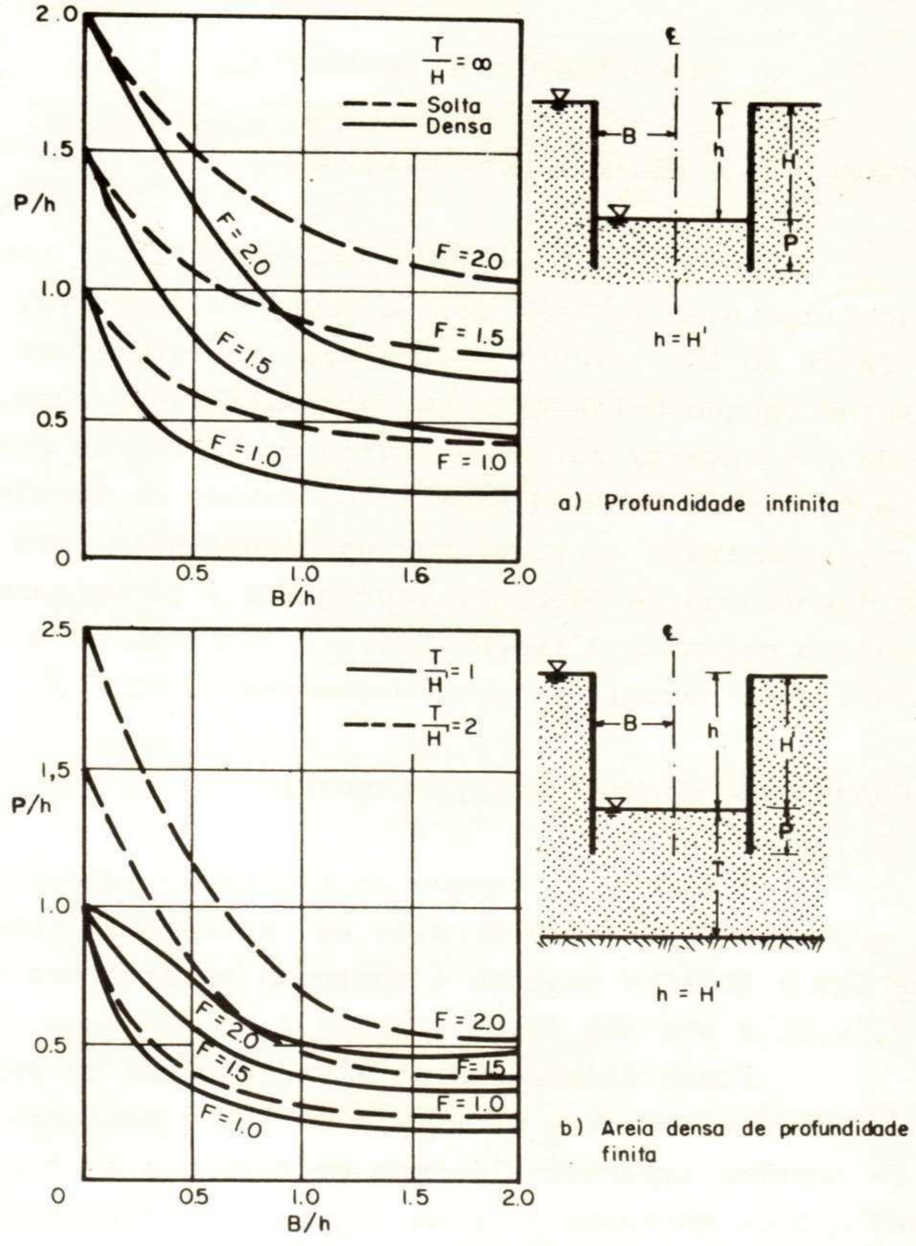


Figura 3.3 - Diagrama para determinar a vazão adimensional ($\frac{q}{hK}$) em função de P/B e D/B (segundo Kozlov, 1939)



Nota: Para α_I use curva T/B = 0 unicamente.
Para α_{II} todas as curvas são aplicáveis.

Fig. 3.4 - Diagrama para determinar a equipotencial na ponta da cortina e os coeficientes de redução. (Segundo Davidenkoff e Franke, 1965).



a) Profundidade infinita

b) Areia densa de profundidade finita

Fig. 3.5 - Profundidade de penetração, **P**, para diferentes coeficientes de segurança. (Segundo Marsland, 1953).

CAPÍTULO IV

INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS

4.1 - Materiais e Equipamentos Utilizados

Para investigar experimentalmente as características de fluxo na filtração para o problema descrito, procurou-se fazer no laboratório a simulação do escoamento utilizando-se um tanque retangular em *plexiglass*. O meio poroso utilizado nos ensaios foi constituído com areia de praia, proveniente da cidade de João Pessoa, no estado da Paraíba, cuja curva granulométrica apresentamos na figura 4.1. Para caracterização das linhas de corrente empregamos o permanganato de potássio e o rodamine B ($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$). O rodamine B apresenta solubilidade normal de aproximadamente 10g/l.

4.2 - Construção do Modelo Experimental

O modelo do tanque de filtração empregado neste estudo experimental foi construído em *plexiglass* com as dimensões 118 x 20 x 44 cm,como é mostrado em detalhes nas figuras 4.2, 4.3, 4.4 e nas fotos 4.5 e 4.6.

Foram utilizados dois vertedouros de soleira fina para manter constantes os níveis d'água à montante e à jusante da cortina impermeável, como se verifica na figura 4.2. O vertedouro de montante (5-6 da figura 4.2) construído em acrílico de 10 mm é constituído de partes autoencaixáveis, permitindo, assim, variar a altura do vertedouro e conseqüentemente a carga hidráulica (h), para cada profundidade de penetração da cortina. O vertedouro de jusante (1-2 da figura 4.2) tinha altura fixa de 23 cm, trabalhando sempre com uma lâmina d'água de 3 cm. A cortina impermeável foi construída em acrí

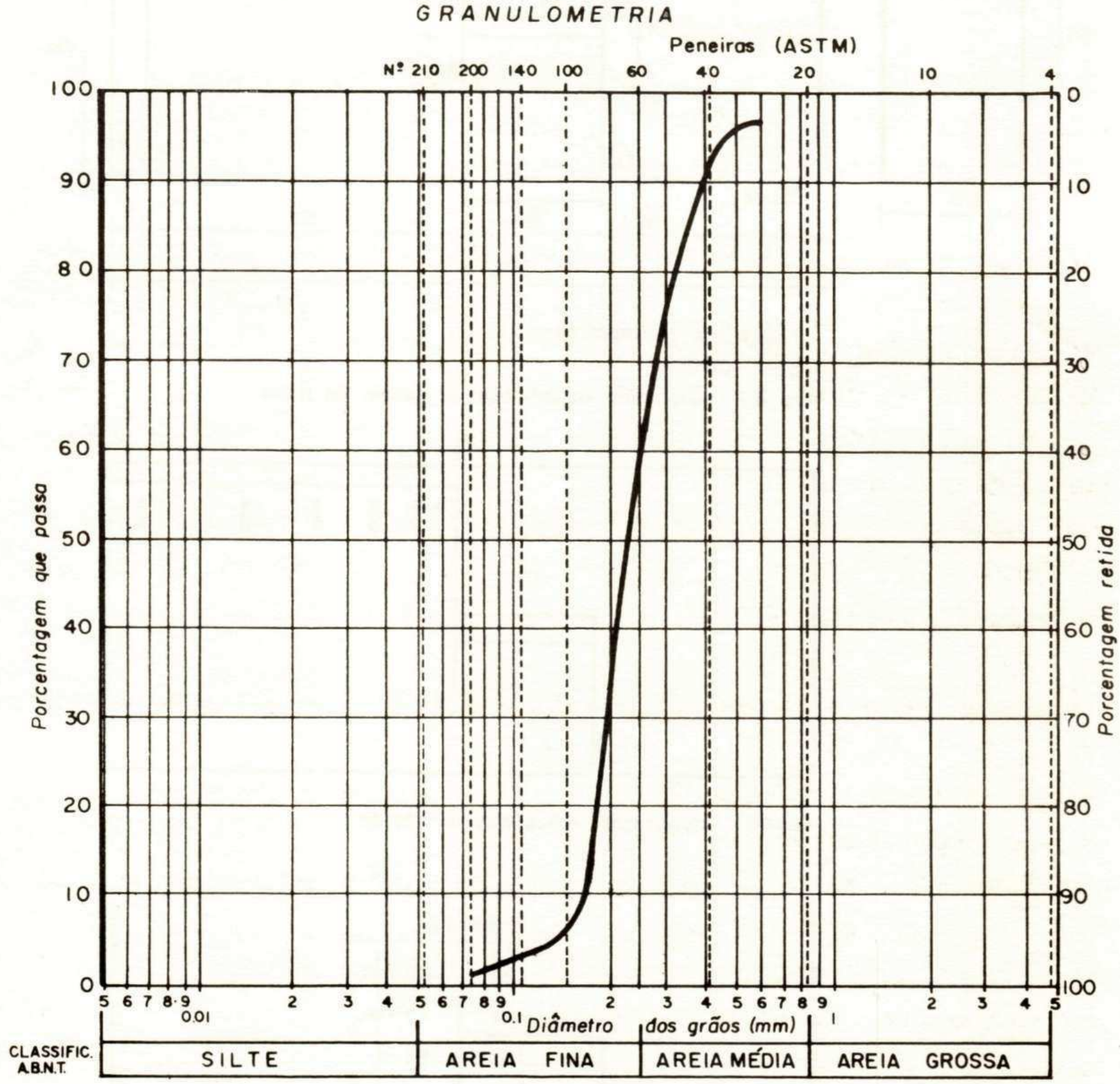
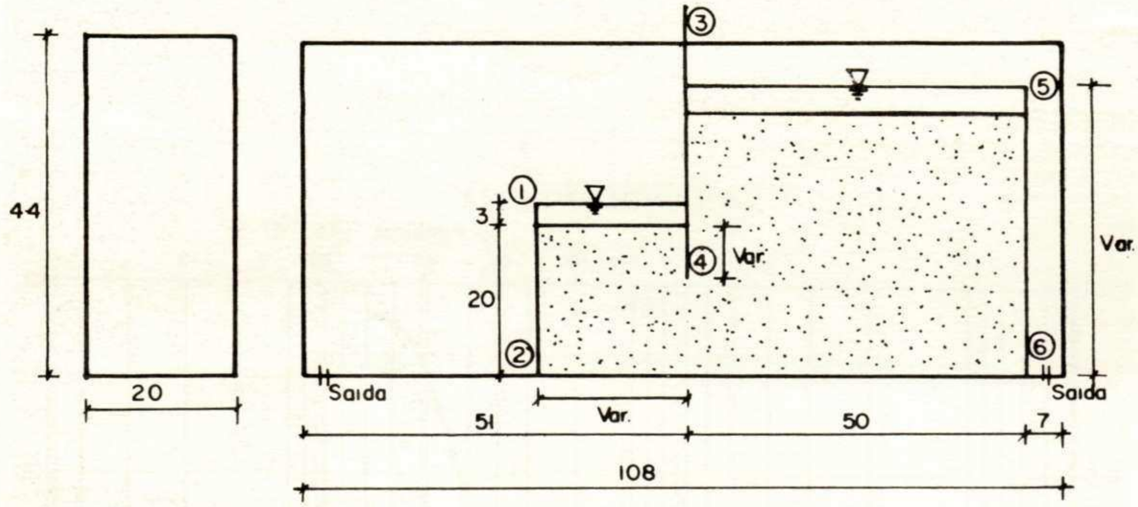

GRANULOMETRIA
Peneiras (ASTM)
Nº 210 200 140 100 60 40 20 10 4
Porcentagem que passa
Porcentagem retida
Diâmetro dos grãos (mm)
0.01
0.1
1
CLASSIFIC. A.B.N.T.
SILTE
AREIA FINA
AREIA MÉDIA
AREIA GROSSA

Fig. 4.1



I-2 e 5-6 Vertedouros
3-4 Cortina
Fig. 4.2 - Diagrama esquemático do modelo de fluxo.

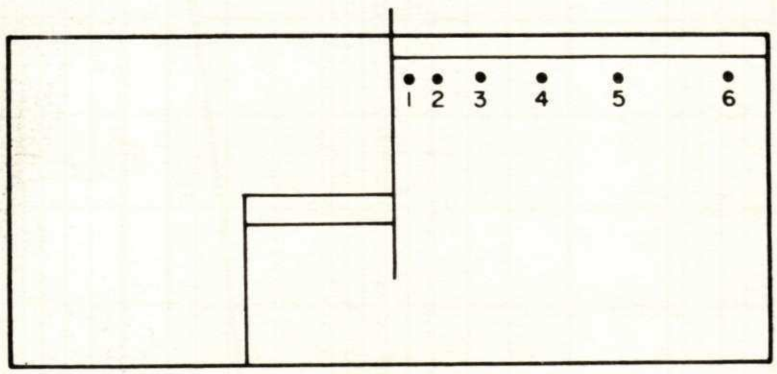


Fig.4.3- Localização dos pontos de injeção.

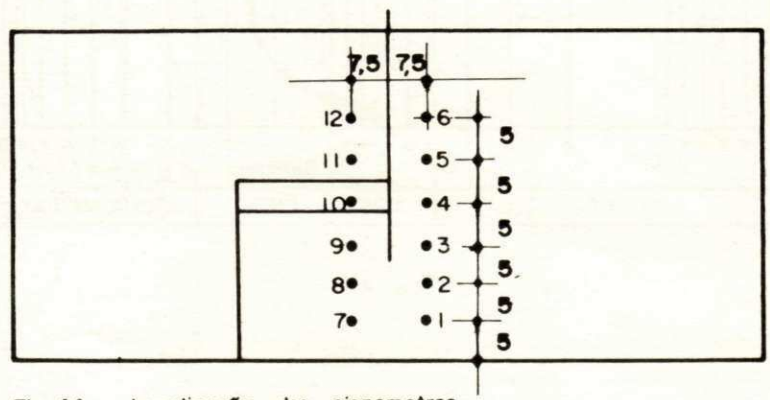


Fig. 4.4 - Localização dos piezometros.

Nota: Localização dos piezômetros e pontos de injeção não estão mostrados em escala. cotas em cm.

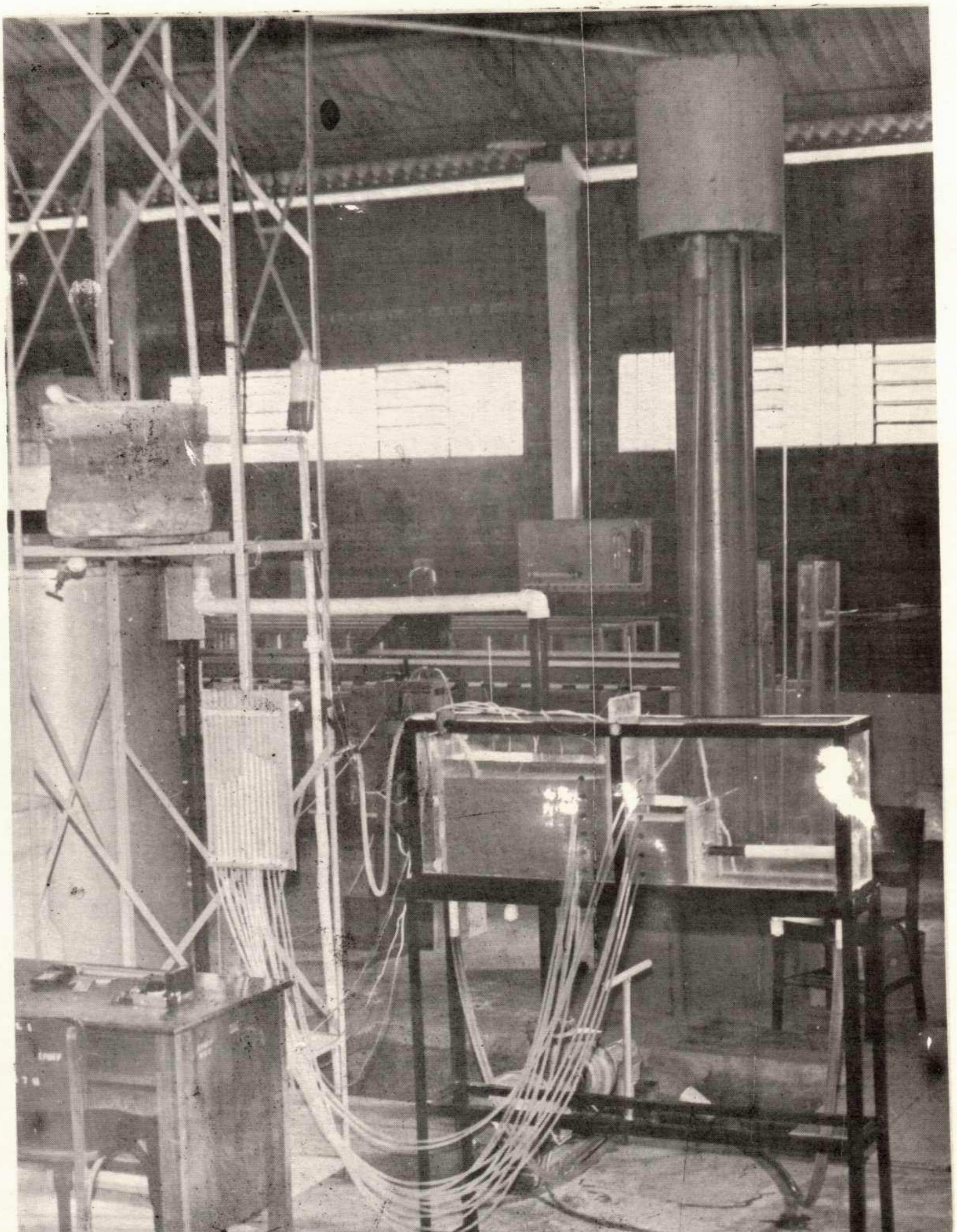
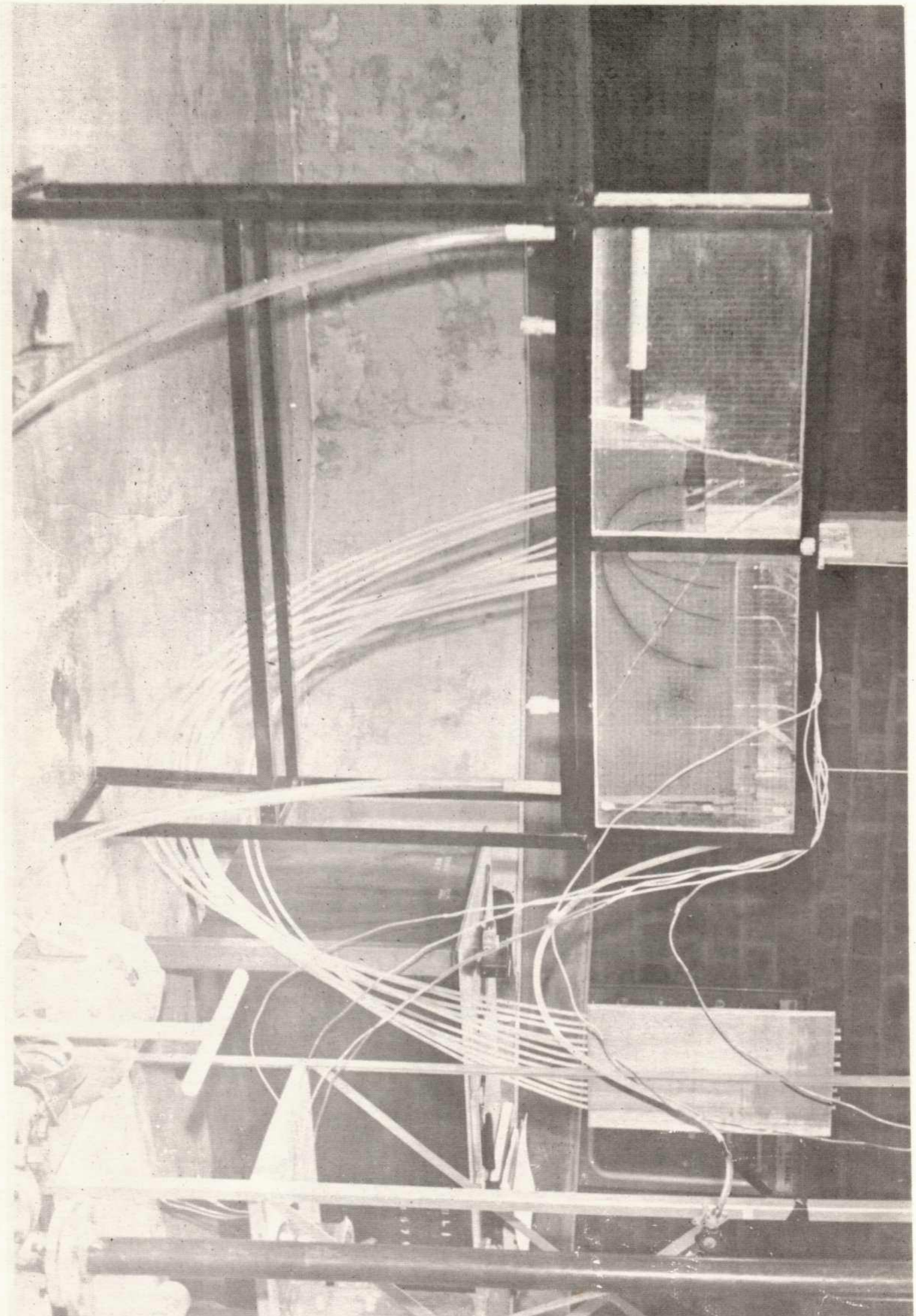


FOTO 4.5

FOTO 4.6



lico de 10 mm e dotada de um dispositivo de fixação que permite abaixá-la ou levantá-la, criando, conseqüentemente, situações diferentes de penetração no meio permeável. Uma das faces do tanque de *plexiglass* é dotada de uma malha que facilita grandemente o trabalho do traçado das linhas de corrente; na outra face, estavam instalados os piezômetros, conforme é mostrado na figura 4.4. A localização dos pontos de injeção do corante é mostrada na figura 4.3. A injeção do corante foi feita através de agulhas hipodérmicas 70 x 20 mm (em número de 6), alimentadas individualmente de um pequeno reservatório (volume igual a 1000 ml) através de mangeiras plásticas de 3/16" e dotadas de um dispositivo de regulagem da vazão. Os piezômetros em número de 12 (doze), montados na parede lateral do tanque de filtração, foram conectados através de mangueira plástica de 1/4" com tubos de vidro montados num painel graduado em milímetros, para leitura das pressões, conforme se observa na foto 4.5. A alimentação do modelo com água, a fim de estabelecer o escoamento através do meio permeável, foi feita utilizando-se uma mangueira plástica de 3/4", adaptada a um registro de passagem de alta pressão e conectada a um reservatório mantido a carga constante.

4.3 - Método de Condução dos Testes

Uma das preocupações principais era a de que todos os ensaios apresentassem as mesmas características de homogeneidade, quer no preparo do meio poroso, quer na condução dos testes. Assim sendo, procurou-se, na preparação das amostras do meio poroso, manter constante a densidade do material utilizado, de modo que o meio se tornasse homogêneo e isotrópico o máximo possível, a fim de que a permeabilidade se mantivesse mais ou menos constante. Para evitar problemas decorrentes de umidades variadas na areia, preferiu-se, primeiramen te colocá-la em estufa, durante um período de 24 horas, e passando-se a utilizá-la continuamente somente após 48 horas da retirada da estufa. Em todos os ensaios, procuramos colocar a areia no tanque de modo a manter a densidade praticamente constante. Usando-se a definição de densidade, temos:

$$d = \frac{G_0}{V_0 g} = \frac{G_1}{V_1 g} \quad (\gamma = 2{,}02\ g/cm^3 = \text{constante}) \qquad (4.1)$$

ou seja:

$$\frac{G_0}{V_0} = \frac{G_1}{V_1} \qquad (4.2)$$

onde:

G_0 = peso de areia correspondente ao volume V_0
G_1 = peso de areia correspondente ao volume V_1
g = aceleração da gravidade
γ = peso específico aparente

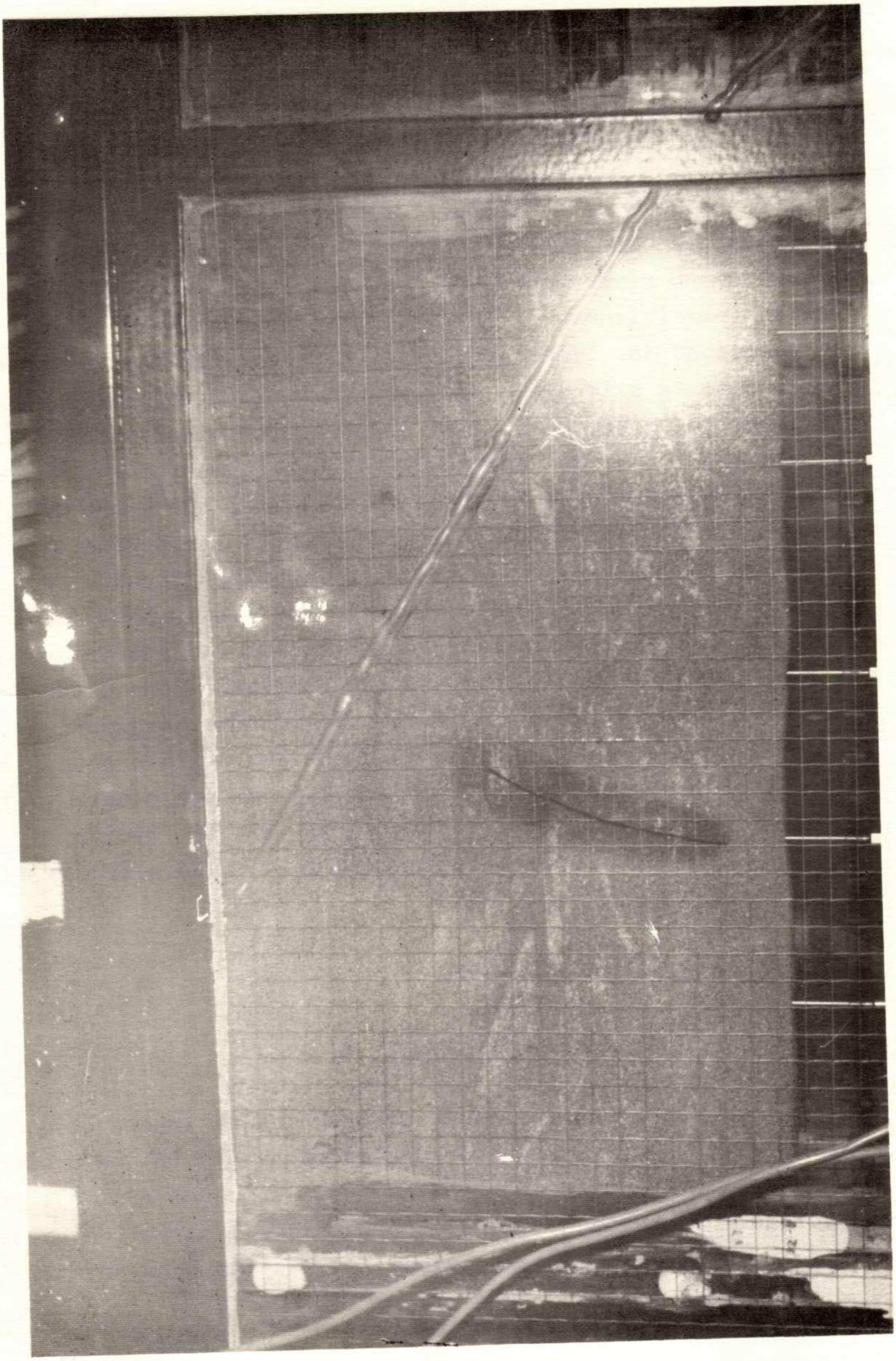
Assim, para o experimento inicial, foi definido o volume V_0 do tanque, em função dos parâmetros geométricos da escavação, da espessura do meio poroso, e da profundidade de penetração da cortina, sendo adotado um volume de areia de peso G_0. Para as outras experiências, conhecido o volume V_1 a ser utilizado no tanque, o peso G_1 da areia era calculado através da equação 4.2. Para manter uniformes, todos os ensaios, procuramos estabelecer uma sistemática para o enchimento do tanque de filtração, colocando-se a areia em camadas de 5 cm de espessura e compactando-a com um soquete de madeira nas dimensões 17,0 x 4,5 x 4,5 cm e peso 310 gramas. A compactação de cada camada foi realizada com 30 (trinta) golpes de soquete deixados cair de uma altura de aproximadamente 15 cm e distribuídos uniformemente em toda a superfície. O estabelecimento do fluxo foi feito por alimentação de um reservatório mantido a nível constante, eliminando-se inicialmente as possíveis bolhas de ar existentes no interior do material compactado, fazendo-se pri meiramente uma alimentação através do ponto de descarga de montante (figura 4.2), em sentido contrário ao do fluxo normal. Após o estabelecimento das condições de fluxo uniforme , a quantidade de filtração por unidade de tempo foi obtida diretamente, medindo-se o tempo requerido para acumular um dado volume no reservatório de jusante. Para cada ensaio foram feitas três leituras de tempo e obtido o valor médio. Para caracterização das linhas de corrente foram abertas as presilhas do tubo de alimentação do corante e observando-se o caminho descrito, conforme se pode ver na sequência das fotos 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10. Um dos grandes problemas encontrados para caracterização das linhas de corrente foi a grande dispersão apresentada pelos corantes, principalmente o permanganato de potássio. Com a utilização do rodamine B, o problema de dispersão diminuiu um pouco. Por essa razão, as linhas de corrente não foram determinadas simultaneamente, mas caracterizadas linha por linha, as quais depois foram compostas para obtenção do padrão, como mostrado na foto 4.10. Convém ressaltar que a caracterização das linhas de corrente era feita à proporção que ela se ia desenvolvendo, marcando-se com uma caneta hidrocor permanente, como se vê nas fotos 4.7 e 4.10. Medidas de pressão foram feitas diretamente pela leitura da elevação da água em cada piezômetro.

4.4 - Programa dos Ensaios

4.4.1 - Estudo de vazão

Na realização dos ensaios de laboratório, as variáveis foram a semilargura da escavação (B), a profundidade de penetração da cortina no meio permeável (P), a profundidade da escavação (D) e a carga hidráulica (h). A espessura do meio permeável na escavação foi mantida constante e igual

FOTO 4.7



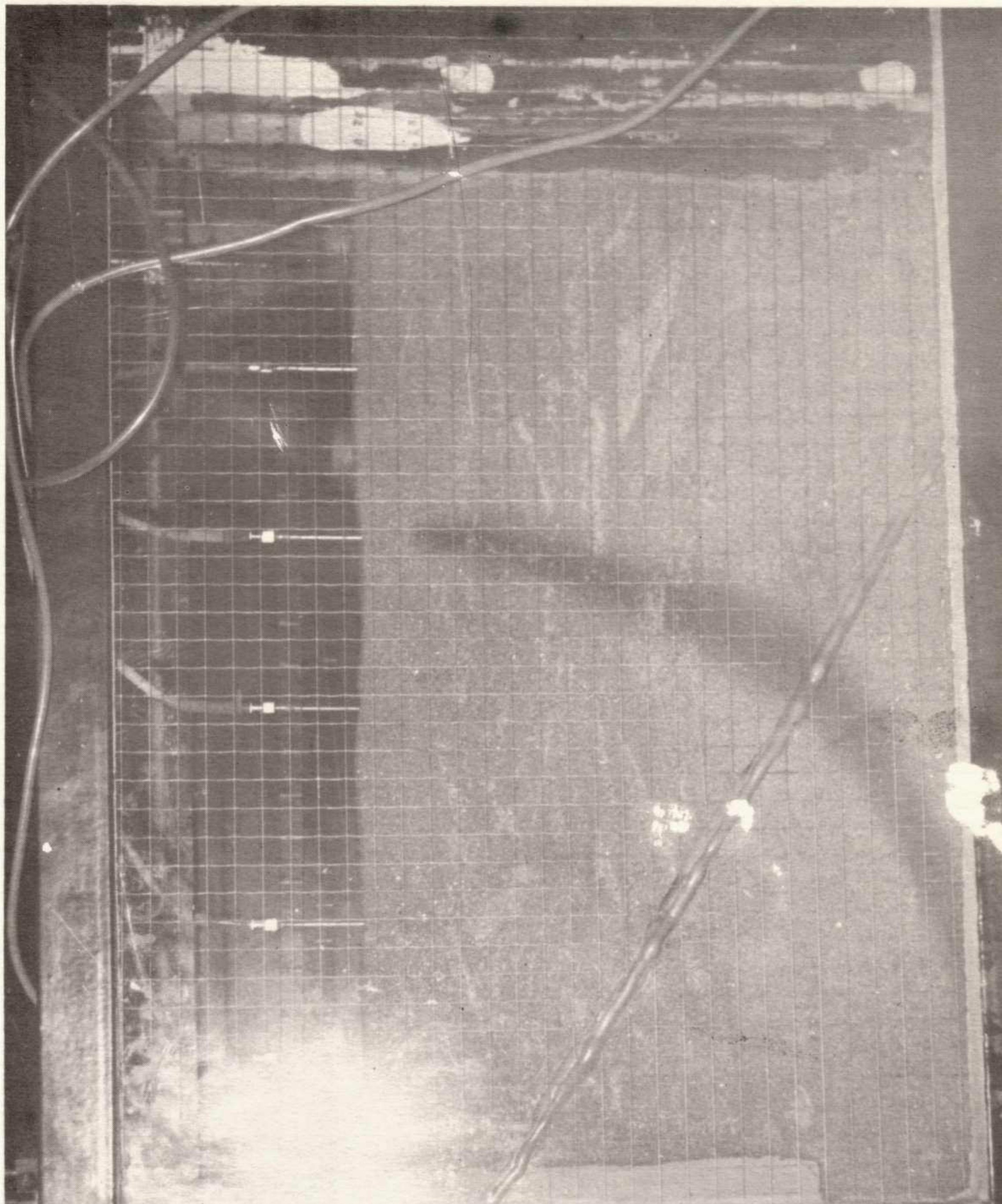


FOTO 4.8

FOTO 4.9

a 20 cm, pois não havia condições para estudar o efeito da variação deste parâmetro. Os valores possíveis para cada um destes parâmetros são dados na tabela 4.1. Em se tratando da carga hidráulica, devido às limitações do equipamento, não foi possível manter todas as cargas para cada caso; portanto, foram escolhidos quase arbitrariamente dois valores dentro da faixa possível, permitindo assim, no total, ensaios com todas as cargas. Uma exceção, foi o caso dos ensaios com profundidade de escavação igual a 17,5 cm, onde somente foi utilizada a carga hidráulica de 18,5 cm devido às limitações das combinações dos parâmetros. Desta maneira, foram realizados 70 (setenta) ensaios, utilizando-se duas larguras de escavação, cada qual com cinco valores de profundidade de penetração. Para cada profundidade da cortina foram considerados quatro valores da escavação, com duas cargas hidráulicas, com as exceções referidas anteriormente.

Tabela 4.1 - Valores dos Parâmetros

B (cm)	P (cm)	D (cm)	h (cm)
	5,0	5,5	6,5
20	7,5	9,5	10,5
	10,0	13,5	14,5
25	12,5	17,5	18,5
	15,0		

Além dos estudos do padrão de escoamento, com corantes e do caso de desmoronamento, foi determinada, principalmente, a vazão para todos os ensaios. Os resultados obtidos para a vazão de filtração são mostrados na tabela 4.2, cuja significação será discutida no capítulo V.

Tabela 4.2 - Dados Experimentais Observados

B (cm)	D (cm)	h (cm)	P = 5,0	P = 7,5	P = 10,0	P = 12,5	P = 15,0(cm)
			Q (cm^3/s)	Q (cm^3/s)	Q (cm^3/s)	Q (cm^3/s)	Q (cm^3/s)
25,0	17,5	-	-	-	-	-	-
		18,5	5,05	4,27	3,68	3,20	2,77
	13,5	18,5	5,32	4,45	3,79	3,25	2,81
		14,5	4,17	3,49	2,97	2,54	2,21
	9,5	14,5	4,31	3,63	3,09	2,64	2,24
		10,5	3,12	2,63	2,24	1,91	1,62
	5,5	10,5	3,33	2,80	2,34	1,98	1,65
		6,5	2,06	1,73	1,45	1,22	1,02
20,0	17,5	-	-	-	-	-	-
		18,5	5,03	4,19	3,65	3,16	2,69
	13,5	18,5	5,12	4,37	3,75	3,20	2,75
		14,5	4,01	3,42	2,94	2,51	2,16
	9,5	14,5	4,15	3,56	3,06	2,61	2,19
		10,5	3,01	2,58	2,21	1,89	1,58
	5,5	10,5	3,28	2,74	2,31	1,95	1,62
		6,5	2,03	1,70	1,43	1,20	1,00

4.4.2 - Estudo da Estabilidade

Um dos objetivos deste estudo foi investigar o problema da estabilidade do fundo da escavação, através dos efeitos de desmoronamento (boiling) e empolamento (heaving). Em todos os ensaios discutidos anteriormente, não foram encontrados estes problemas. Procurou-se, então, estudar um caso, em que fosse possível esperar a ocorrência deste fenômeno. Como uma menor penetração e maior carga hidráulica criam maiores pressões no ponto extremo da cortina, foi escolhido uma penetração mínima possível de 2,5 cm. Com a semilargura de 20,0 cm e profundidade da escavação de 19,5 cm escolhidas arbitrariamente, o comportamento do modelo foi estudado quando submetido a cargas hidráulicas diferentes, aumentando-se o valor a a iniciação do fenômeno de desmoronamento. Este ensaio consistiu em se manter constantes todos os parâmetros, só variando a carga hidráulica gradualmente e as pressões serviram como indicadores das condições permanentes do sistema, em cada situação. Somente após essa comprovação é que foi sendo variada a carga hidráulica, até atingir a situação crítica, capaz de provocar o desmoronamento. Na tabela 4.3 são dados as vazões correspondentes a cada carga hidráulica (h).

Tabela 4.3 - Valores Observados

h (cm)	Q (cm/s)
13,5	2,38
18,5	3,34
19,5	3,45
20,5	3,70

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados dos ensaios que foram apresentados no capítulo anterior serão aqui analisados. As implicações dos ensaios serão discutidas e, qundo possível, comparadas com outras investigações.

5.1 - Comportamento do Modelo

O modelo hidráulico obedeceu à lei de Darcy, e o comportamento bidimensional e isotrópico foi razoável. A verificação da lei de Darcy no modelo é comprovada na figura 5.1, que mostra a variação da vazão com a carga hidráulica. Nesta figura todos os outros parâmetros permaneceram constantes e a relação linear entre a vazão e a carga hidráulica indica a validade da lei de Darcy. Para traçar o gráfico da figura 5.1 foram utilizados os dados provenientes do ensaio de estabilidade (tabela 4.3). Só neste caso foram feitas leituras de vazão correspondentes a várias cargas hidráulicas, Já que este ensaio foi realizado exatamente como os outros, supõe-se que o comportamento foi igual aos anteriores.

O comportamento do modelo, em termos de condições isotrópicas e de bidimensionalidade, foi verificado através de estabelecimento do padrão das linhas de fluxo, cujo método foi descrito no capítulo anterior, e o padrão estabelecido é mostrado na figura 5.2 e nas fotos 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10. Pode ser observado que o padrão confere com a forma teórica de quase semi-elipses. Infelizmente não foi possível obter mais pontos de leitura de pressões,a fim de se construir a rede de fluxo; pois esta foi, a única maneira possível de verificar o comportamento face às considerações assumidas.

5.2 - Efeito de Largura

Como foram estudadas unicamente duas larguras, os resultados só podem ser usados para comparar caso por caso. Evidentemente não existe um número suficiente de leituras em termos deste parâmetro, de modo que possa ser estabelecida a variação da vazão com a largura (2B). Entretanto, observando-se a tabela 4.2 do capítulo anterior, podemos notar uma tendência consistente, que mostra a diminuição da vazão quando a largura diminui, permanecendo constantes os outros parâmetros. Não obstante esta observação, serão analisados os resultados correspondentes às duas larguras separadamente, porque é considerado que não existem bastantes informações para incluir o efeito da variação da largura nas análises subseqüentes.

5.3 - Variação da Vazão de Filtração com os Parâmetros

5.3.1 - Parâmetros Considerados

Os parâmetros aqui considerados foram transformados em parâmetros adimensionais, de acordo com a tradição, para facilitar a comparação dos resultados encontrados com os propostos por outros investigadores e também para evitar problemas de unidades. Por outro lado, podemos, também, a partir da análise adimensional, mostrar que a relação funcional entre a variável dependente (no caso a vazão) e as variáveis independentes, é expressa pela relação adimensional funcional dada pela equação:

$$\frac{q}{Kh} = \xi(h/B,\ D/B,\ P/B)$$

Assim, são utilizadas as relações adimensionais $\frac{q}{Kh}, \frac{D}{B}, \frac{P}{B}, \frac{h}{B}$ para representar, respectivamente, vazão de filtração, profundidade de penetração e carga hidráulica adimensionadas.

5.3.2 - Variação da Vazão com a Profundidade de Escavação e Penetração da Cortina

Como indicado anteriormente, a vazão adimensional(q/Kh) será uma função dos parâmetros D/B, P/B e h/B. Os resultados da tabela 4.2 são transformados em termos de parâmetros adimensionais, que são mostrados na tabela 5.1.

Para calcular o valor do parâmetro $\frac{q}{Kh}$ (que realmente neste caso é $\frac{Q}{KhL}$, onde: Q = vazão total medida e L = largura da cortina), o coeficiente de permeabilidade K foi determinado utilizando-se as leituras dos piezômetros para cada ensaio do seguinte modo: escolhidos cada dois pontos de pressão (como, por exemplo, 1-3, 1-5, 3-6 da figura 4.4) e conhecidas as distâncias entre os pontos l, foi calculado o gradiente hidráulico através da razão entre a diferença da leitura piezométrica e a distância l. Observou-se que, em cada caso, com três cálculos do gradiente hidráulico, este valor praticamente não se alterou. A partir do gradiente hidráulico e utilizando-se a lei de Darcy, o coeficiente de permeabilidade K foi obtido. Como não era possível obter exatamente a mesma permeabilidade em todos os ensaios, a qual dependia da maneira exata de compactação, a permeabilidade determinada deste modo variou um pouco, de caso a caso, conforme consta na tabela 5.1, correspondente para cada coluna.

Observando-se a tabela 5.1 podemos ver que os valores do parâmetro q/Kh permaneceram constantes em termos do parâmetro h/B, com outros parâmetros mantidos constantes. Como ficou claro na tabela 5.1, esse fenômeno não é uma coin cidência, mas acontece em todos os casos em que foram testados os valores citados com cargas diferentes. Então, conclui-se que o fator h/B não tem influência sobre o parâmetro dependente q/Kh, o qual é consistente em termos dos trabalhos teóricos de Kozlov.

As figuras 5.3 e 5.4 mostram a relação entre vazão adimensionada q/Kh e penetração adimensionada P/B com profundidade de escavação adimensional D/B. Ressaltamos que a figura 5.3 corresponde, para o primeiro grupo de ensaios, com a semilargura B de 25 cm, ao passo que a figura 5.4 se refere ao caso de B = 20 cm.

As figuras 5.3 e 5.4 mostram que existe uma boa relação funcional entre esses parâmetros que são claramente não lineares. Essas figuras indicam que o fator q/Kh diminui com o parâmetro P/B e também com o parâmetro D/B, isto significa que a vazão por unidade de comprimento da escavação diminui com a penetração da cortina e também com a profundidade da escavação, quando a carga hidráulica permanece constante. Essas observações são bem consistentes com experiências práticas conforme previstas nos estudos teóricos de Kozlov (figura 3.3).

5.4 - Estudos Comparativos

Embora existam trabalhos analíticos e experimentais nesta área, em termos da vazão através da cortina, foram encontrados, na bibliografia, somente as soluções de Kozlov (para espessura infinita do meio permeável) e os monogramas de Davidenkoff & Franke. Assim, serão comparados os resultados dos ensaios com as soluções citadas.

As figuras 5.5 e 5.6 mostram uma comparação dos resultados calculados a partir dos valores propostos no monograma de Davidenkoff & Franke. Os valores de $\frac{q}{Kh}$ foram calcu lados conforme explicado no capítulo III, página 25.

Foram escolhidos só dois casos para cada largura a fim de evitar o congestionamento das curvas, embora tenham sido calculadas para todos os casos. Pode ser observado que as curvas quase coincidem com as traçadas a partir dos resultados de Davidenkoff & Franke.

Considerando o fato de que os monogramas de Davidenkoff & Franke não dão diretamente o valor do parâmetro $\frac{q}{Kh}$, a comparação é considerada extremamente satisfatória.

A figura 5.7 mostra a comparação dos resultados obtidos com os valores calculados pelo ábaco de Kozlov (para o caso de espessura infinita do meio poroso) e dos de Davidenkoff & Franke para o caso D/B = 0,70. Como se esperava, os valores de Kozlov são bastante superiores aos observados. É interessante observar que a diferença é quase a mesma entre os valores de Kozlov e Davidenkoff & Franke também, como indicado pela figura 5.7. A tendência da variação é totalmente consistente em todos os casos, mas é duvidoso que a diferença tão grande entre o valor teórico de Kozlov e o experimental possa ser somente atribuída ao fato de a espessura ser infinita.

Essa observação acima é mais forte por causa de um estudo comparativo feito, considerando-se espessuras do meio poroso diferentes. Foi considerado, nesse estudo, um caso hipotético de semilargura B = 10,0 cm e profundidade de escavação e penetração com 5 cm em cada caso. Espessuras múltiplas de 10 cm foram consideradas, dando para o valor da razão T/B (T sendo a espessura do meio poroso na escavação) variando de 1,0 a 6,0. Utilizando-se as curvas de Davidenkoff & Franke foram calculados os valores do fator $\frac{q}{Kh}$ correspondentes. Essa relação é mostrada na figura 5.8 que realmente mostra o efeito da espessura do meio poroso sobre a vazão adi-

Tabela 5.1 - Vazão Admensional (q/Kh) Correspondente aos Valores dos Parâmetros D/B, P/B e h/B

D/B	h/B \ P/B	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	D/B	h/B \ P/B	0,25	0,38	0,50	0,63	0,75
		q/Kh							q/Kh				
0,70	0,74	0,550	0,463	0,406	0,352	0,301	0,88	0,93	0,550	0,469	0,404	0,350	0,297
0,54	0,74	0,580	0,482	0,418	0,357	0,306	0,68	0,93	0,560	0,479	0,415	0,354	0,303
	0,58	0,580	0,482	0,418	0,357	0,306		0,73	0,560	0,479	0,415	0,354	0,303
0,38	0,58	0,600	0,501	0,435	0,370	0,310	0,48	0,73	0,580	0,498	0,432	0,368	0,307
	0,42	0,600	0,501	0,435	0,370	0,310		0,53	0,580	0,498	0,432	0,368	0,307
0,22	0,42	0,640	0,532	0,455	0,383	0,316	0,28	0,53	0,633	0,529	0,450	0,380	0,314
	0,26	0,640	0,532	0,455	0,383	0,316		0,48	0,633	0,529	0,450	0,380	0,314
10^2 K(cm/s)		2,543	2,561	2,511	2,520	2,550	10^2 K(cm/s)		2,553	2,528	2,509	2,510	2,510

mensional. Pode ser visto que o fator $\frac{q}{Kh}$ aumenta com o fator T/B e a taxa de variação (aumento) diminui com a espessura. Como é claro pela figura 5.8 e também intuitivamente esta curva deve tornar-se assintótica para o valor teórico que corresponde a uma espessura infinita ($T/B = \infty$). Esse valor determinado pelo monograma de Kozlov é indicado com a linha tracejada na figura 5.8. É óbvio que a curva calculada através do ábaco de Davidenkoff & Franke não pode ser assintótica para esse valor, mas para um valor muito menor. Então podemos dizer que as diferenças entre os valores observados nos experimentos e os dados pela solução de Kozlov não se devem somente ao fato de a espessura ser infinita. Provavelmente a diferença (que não podemos explicar através do efeito da espessura) é causada pelo método analítico da solução.

Outra comparação interessante com a solução analítica de Kozlov é indicada na figura 5.9. Neste caso o valor da penetração e espessura do meio poroso na escavação é de 10 cm e 20 cm respectivamente, com a semilargura de escavação igual a 25,0 cm. Para valores diferentes da escavação (ou a razão D/B) dentro de 0,2 a 0,7, é calculada a relação $\frac{q}{Kh}$. dada pela solução de Kozlov e indicada pela curva tracejada.

5.5 - Aspectos de Estabilidade

Como foi descrito no capítulo anterior, este estudo tinha como finalidade principal observar o caso de desmoronamento e rompimento do fundo de escavação. De acordo com as observações feitas e indicadas na tabela 4.3, o fenômeno de desmoronamento na parte central da cortina ocorreu quando o fator B/h atingiu o valor 0,98. Neste caso, o fenômeno de desmoronamento começou mais cedo e com carga menor, num canto (corner) particular, que foi desprezado como *efeito de canto*.

Assim sendo, para o caso de B/h igual a 0,98, a condição crítica foi considerada atingida, correspondentemente à relação P/h igual a 0,13. O fato de que *a área crítica é uma zona distante da cortina e igual a metade da penetração* (de acordo com Terzaghi), foi quase verificado, com o valor médio observado igual a 1,0 cm de distância da cortina (P/2 = 1,25 cm). Marsland (18) e NacNamee (17) estudaram o caso de fator de segurança para cortinas, e o caso crítico, corresponderia a um fator de segurança F = 1 nos seus estudos. Utilizando-se os critérios deles, foi calculado o valor da razão P/h para o caso F = 1, e isso deu os valores 0,22 (ou P = 0,22 h) e 0,35 (P = 0,35 h), nos casos de Marsland (18) e NacNamee (17).

Aparentemente, o valor observado é pequeno e implica que, de acordo com as considerações citadas, o rompimento de-eria ter ocorrido anteriormente.

Embora não seja clara a razão para as diferenças destes valores, é óbvio que existe bastante diferença entre as várias investigações nesse sentido (1), incluindo-se os estudos de MacNamee e Marsland.

Em virtude disto, provavelmente o grau de confiança — para aceitarem-se, sem verificação, os valores críticos indicados pelos estudos citados — deverá ser menor.

É apresentada uma sequência fotográfica do processo de desmoronamento nas fotos 5.1 a 5.4.

Foto 5.1.

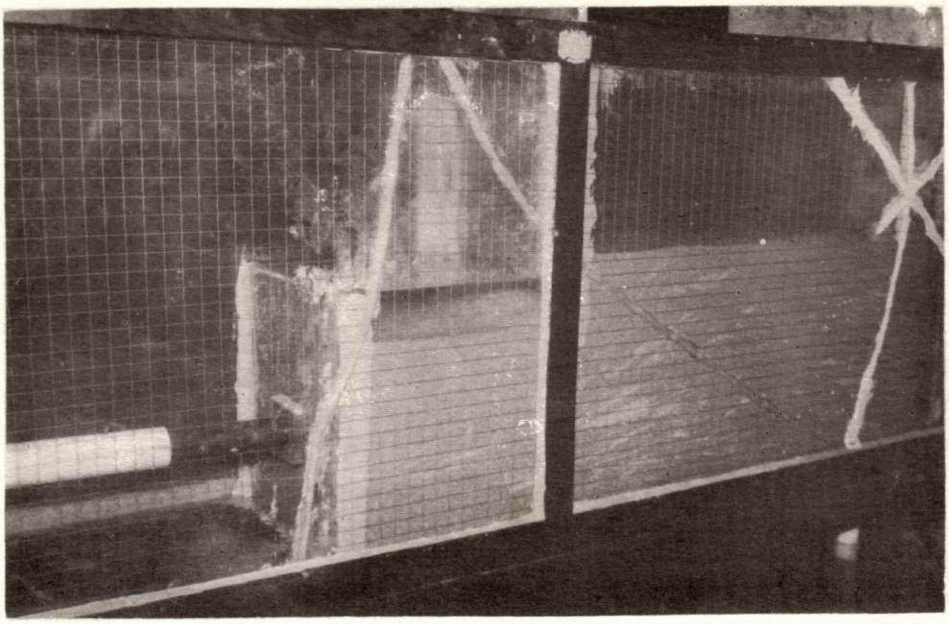


Foto 5.2.

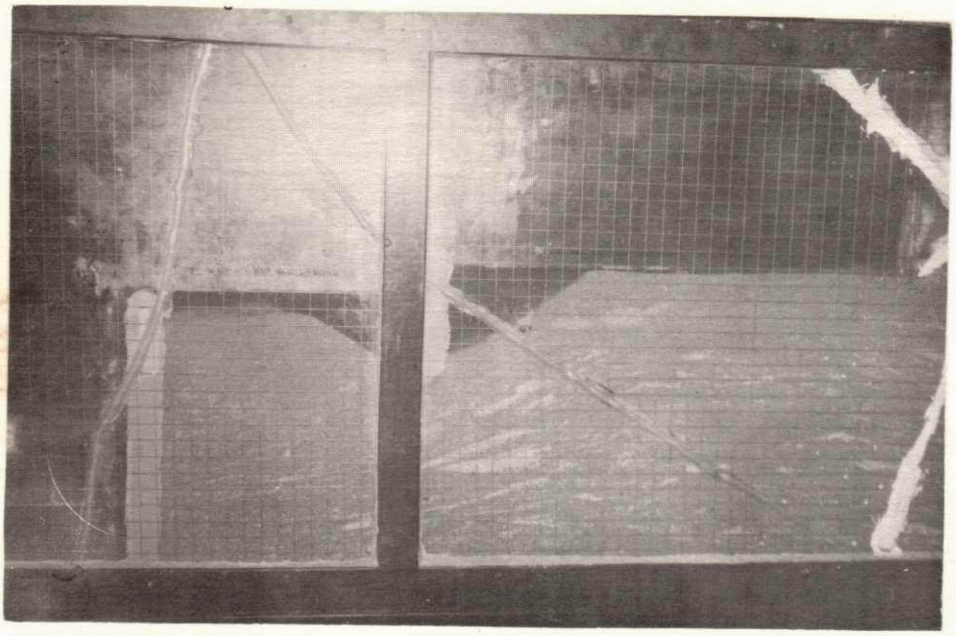


Foto 5.3.

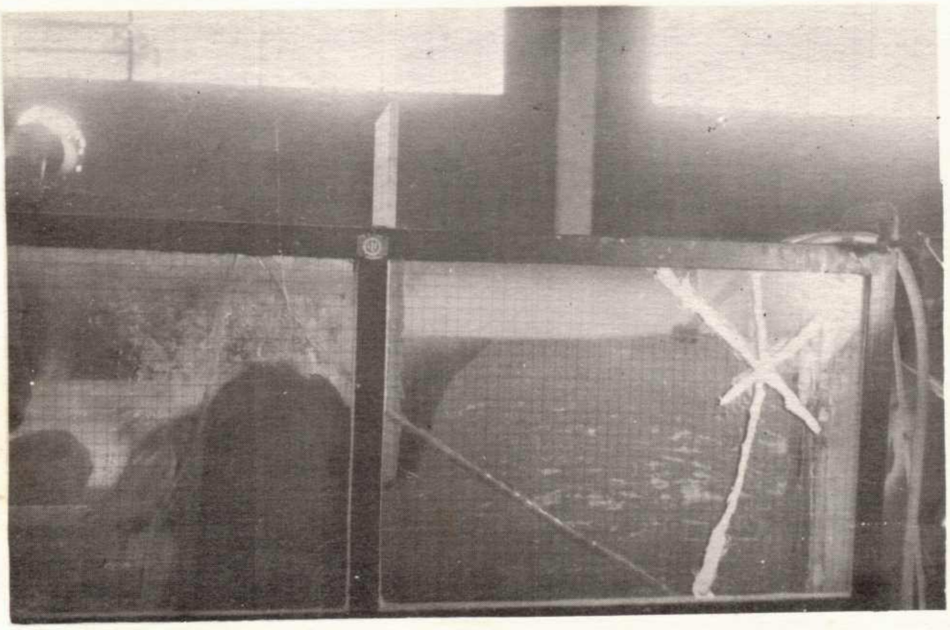


Foto 5.4.

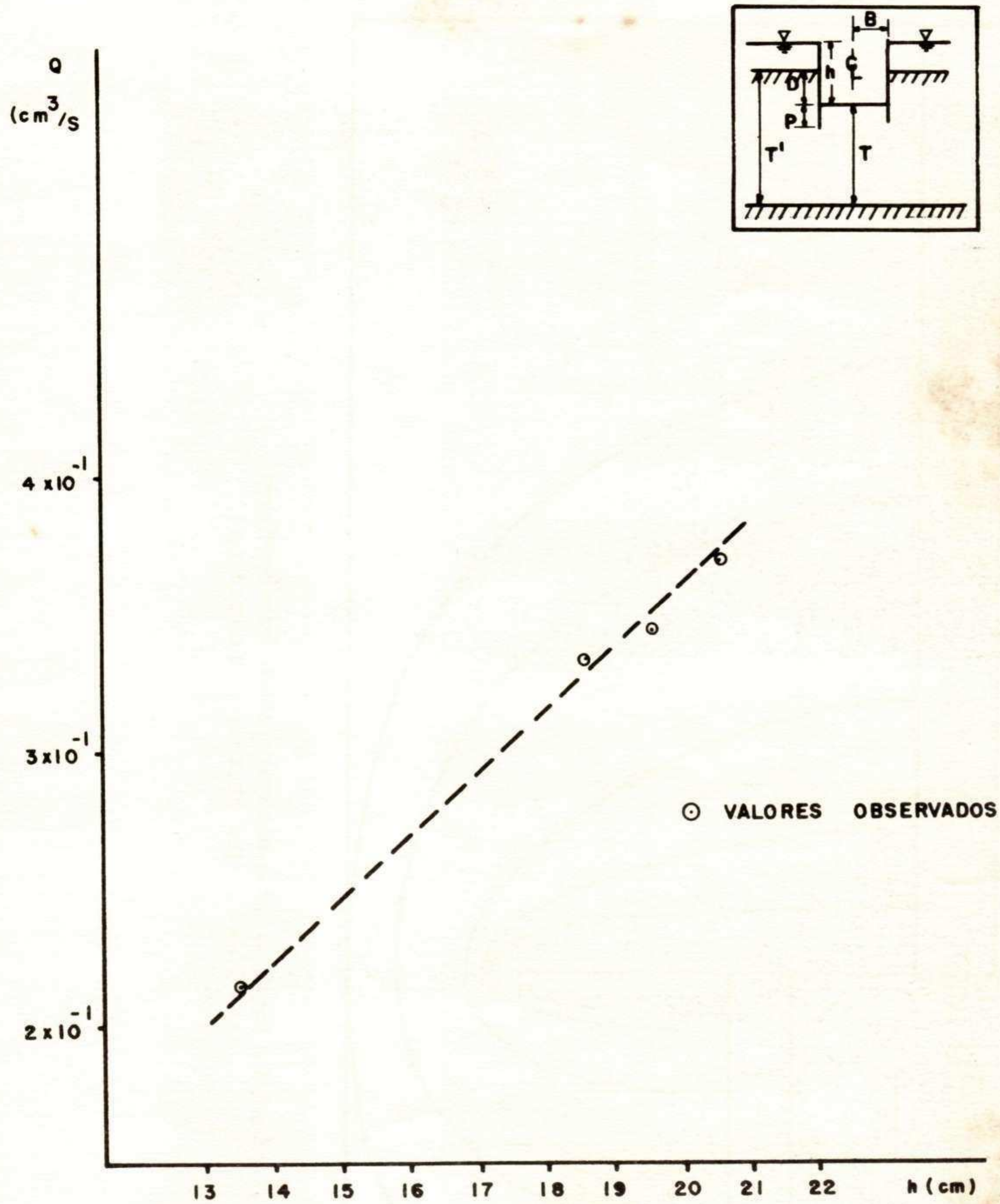


Figura 5.1 – Variação da vazão (Q) com a carga hidráulica (h)

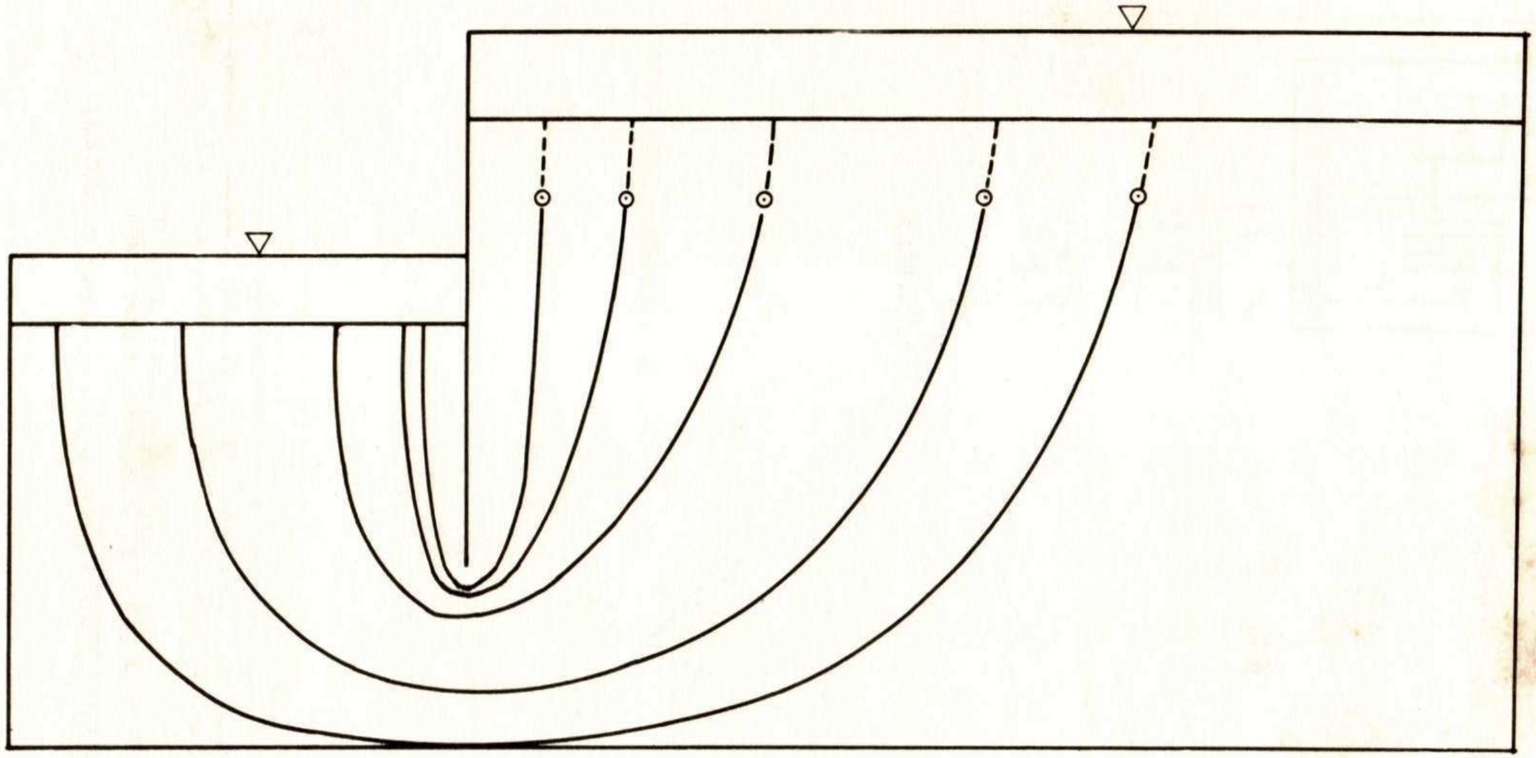


Fig. 5.2 _ Padrão de linhas de corrente obtido experimentalmente
(P = 10 cm , B = 20,0 cm , D = 19,5 cm)

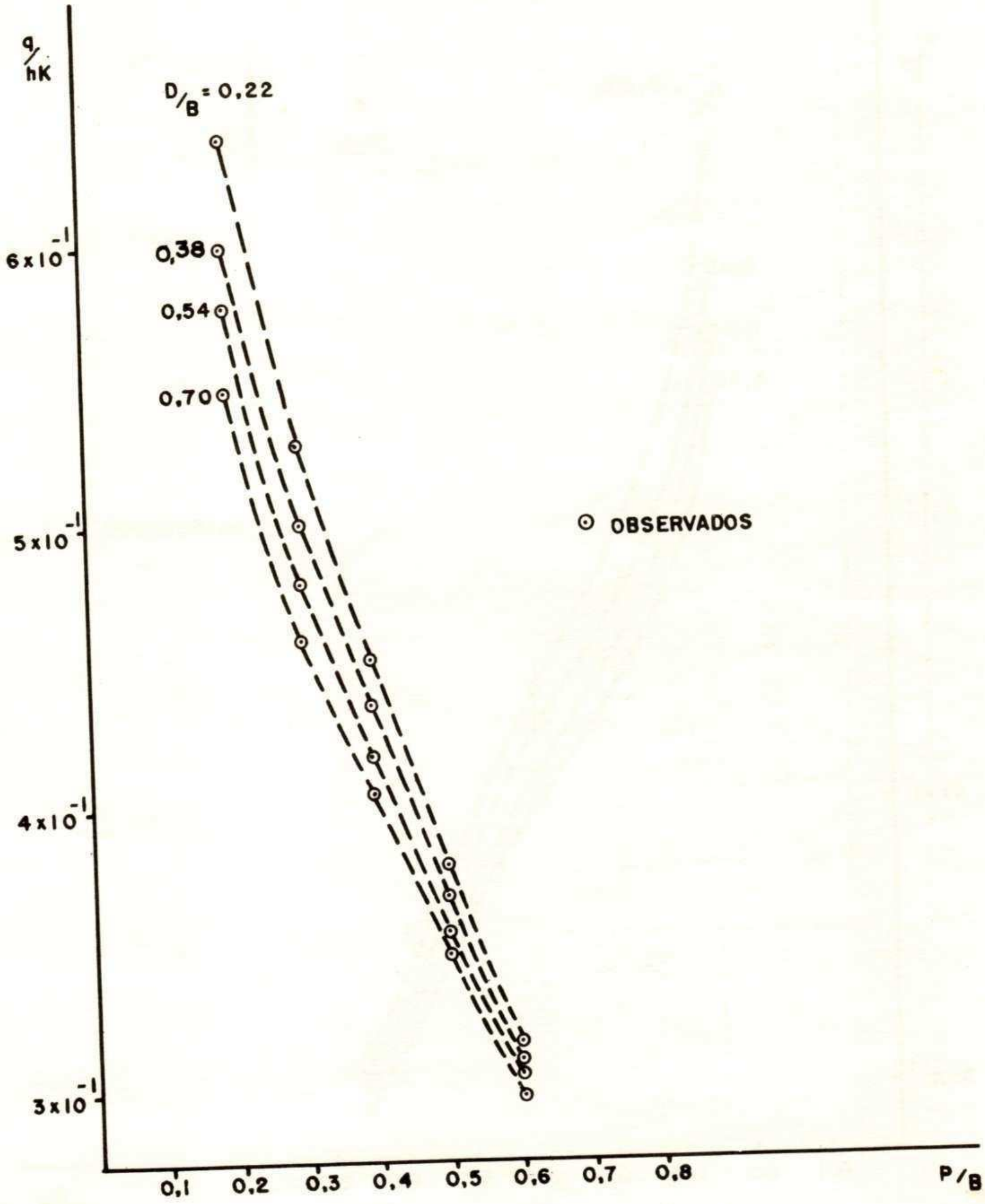


Figura 5.3 — Variação da vazão adimensional com a penetração adimensional (semilargura B=25,0 cm)

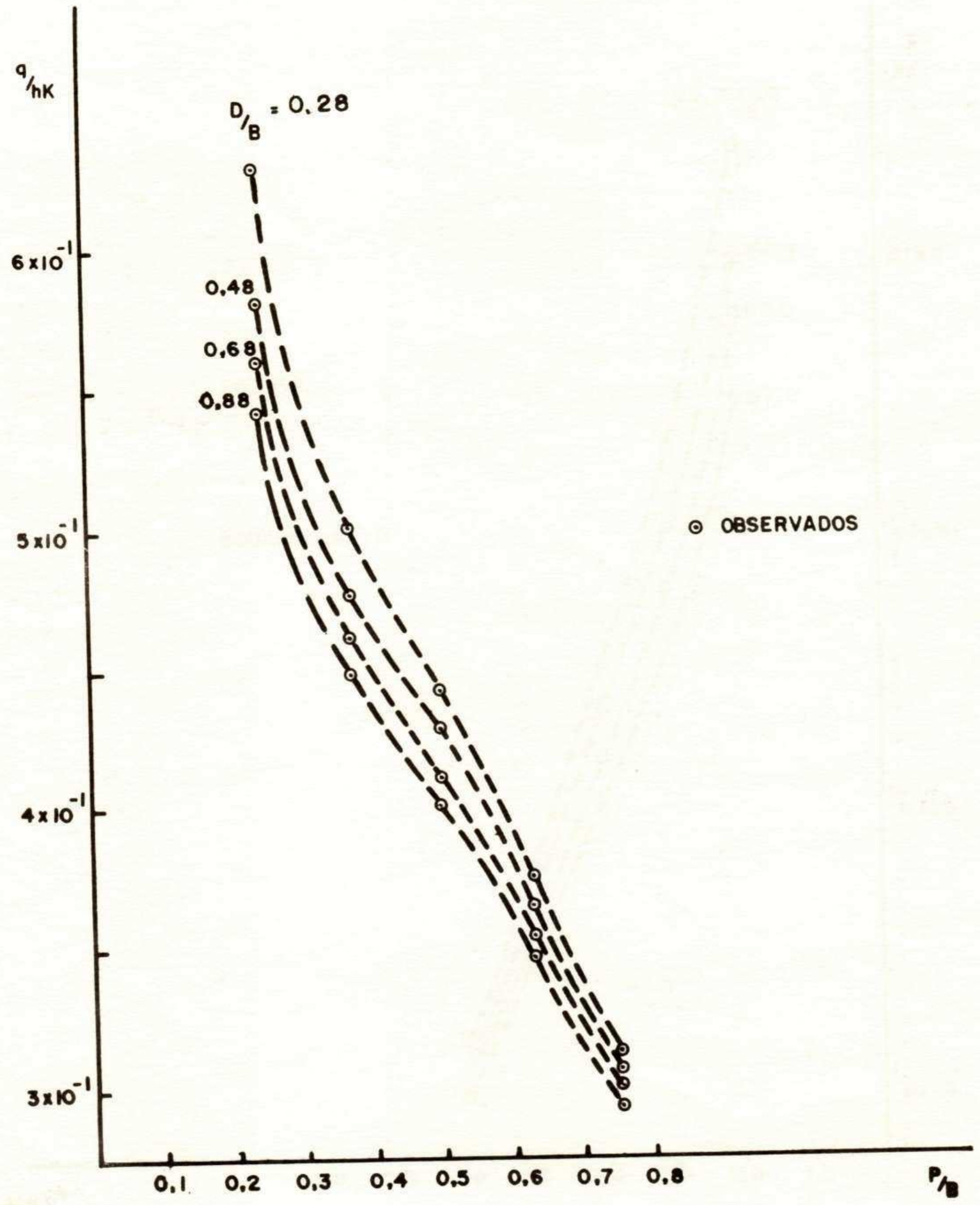


Figura 5.4 - Variação da vazão adimensional com a penetração adimensional

(semilargua B = 20,0 cm)

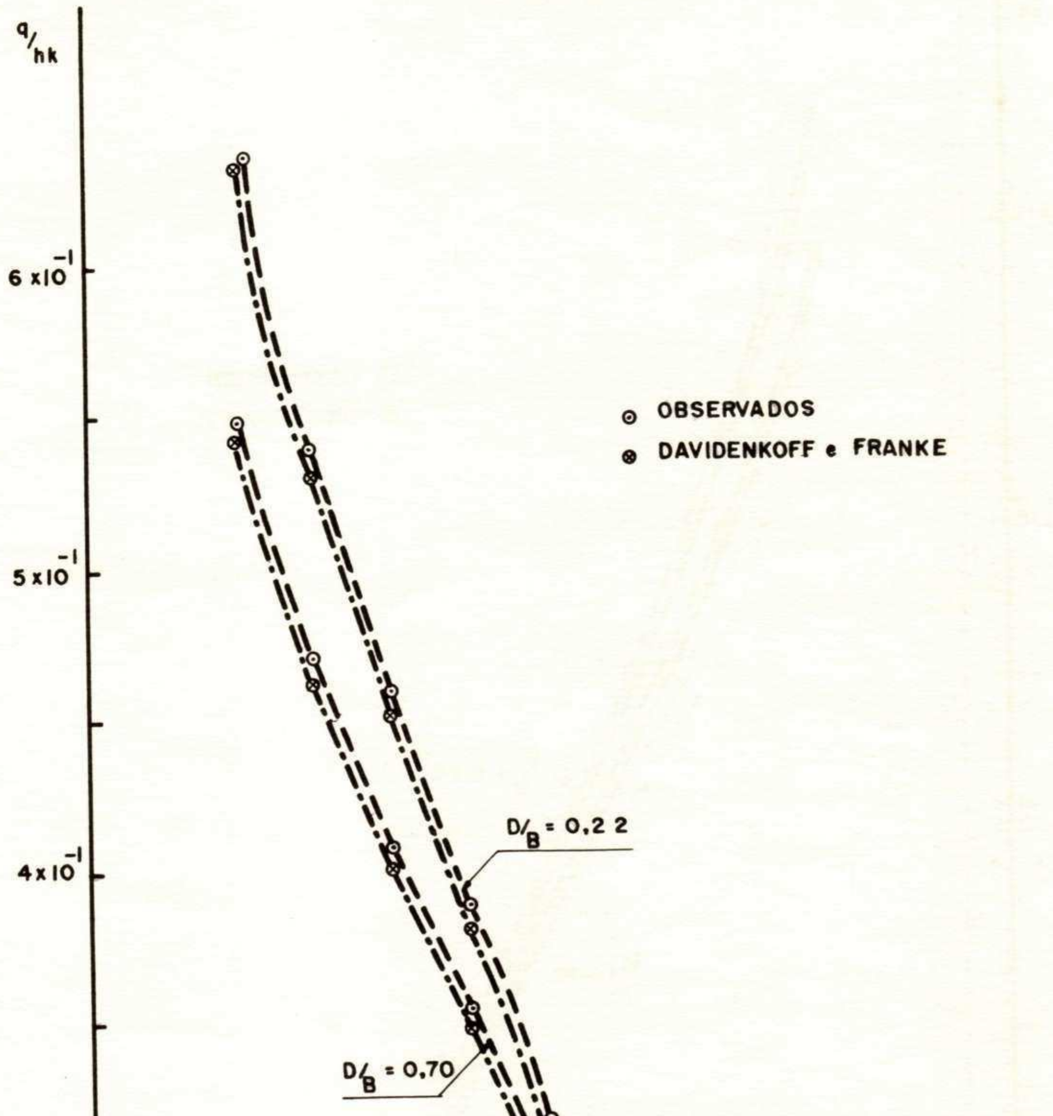


Figura 5.5 - Comparação dos resultados com os de Davidenkoff & Franke (semilargura B = 25,0 cm)

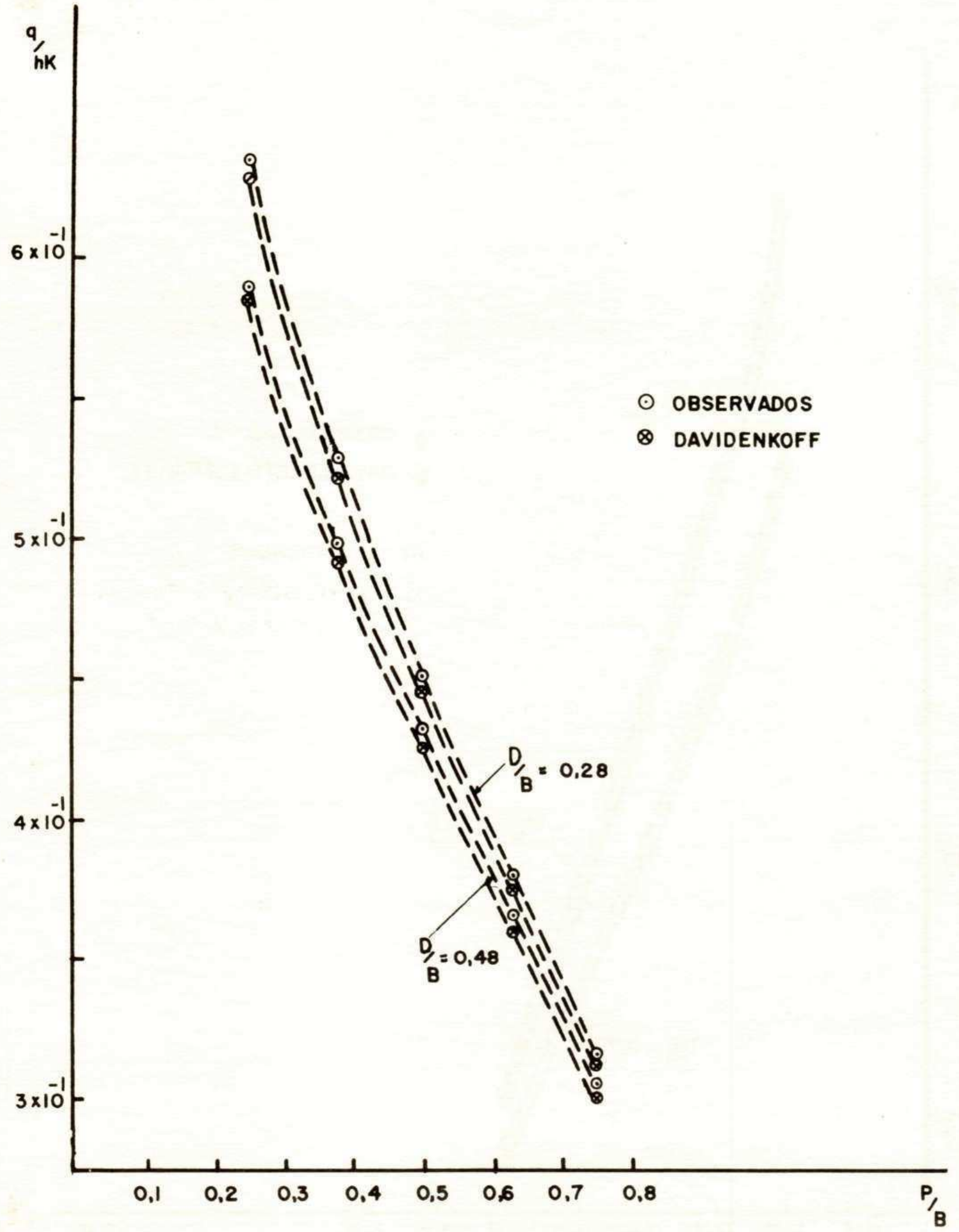


Figura 5.6 – Comparação dos resultados com os de Davidenkoff & Franke (semi-largura B = 20,0 cm)

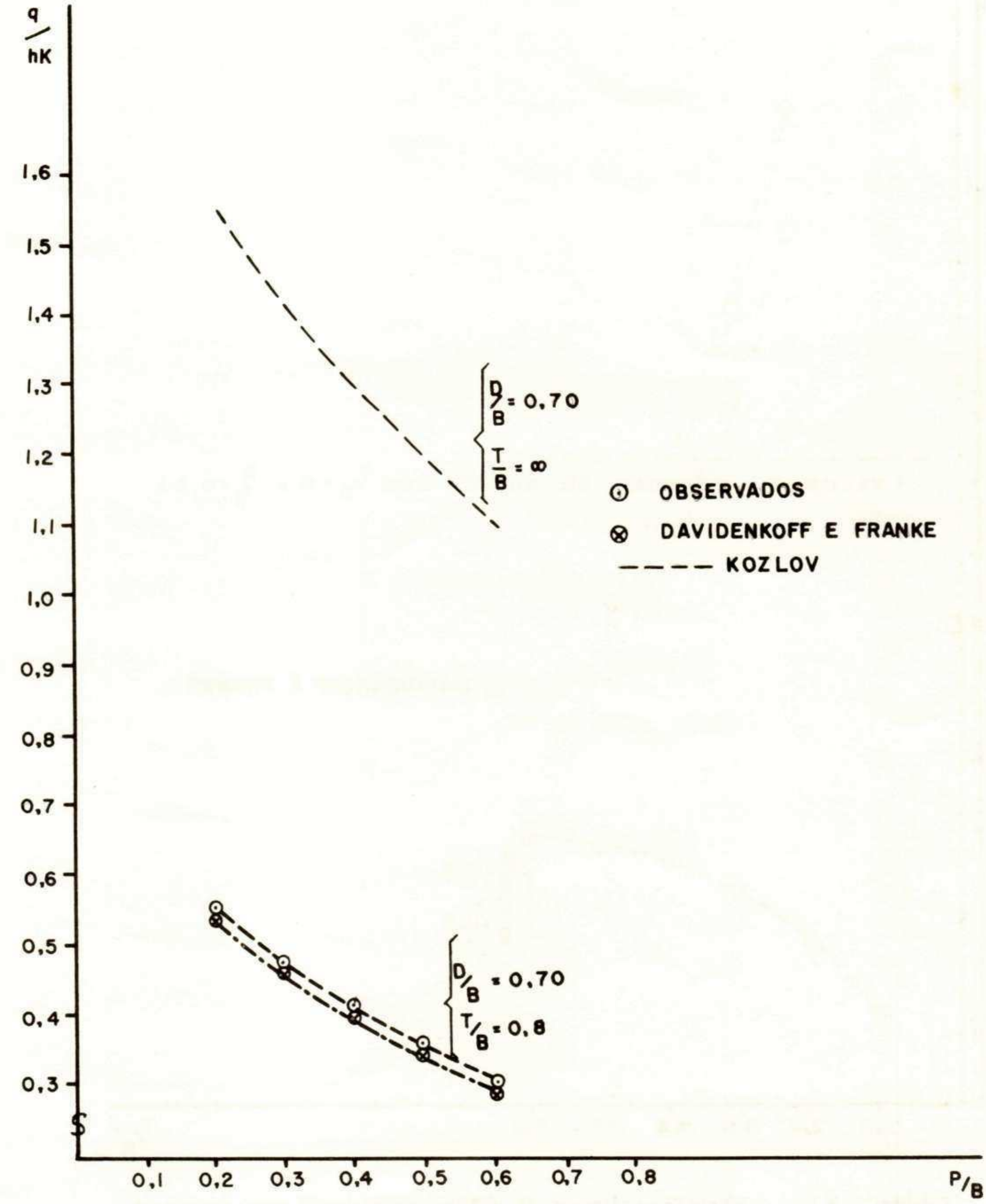


Figura 5.7 – Comparação relativa entre valores observados, de Kozlov e Davidenkoff & Franke.

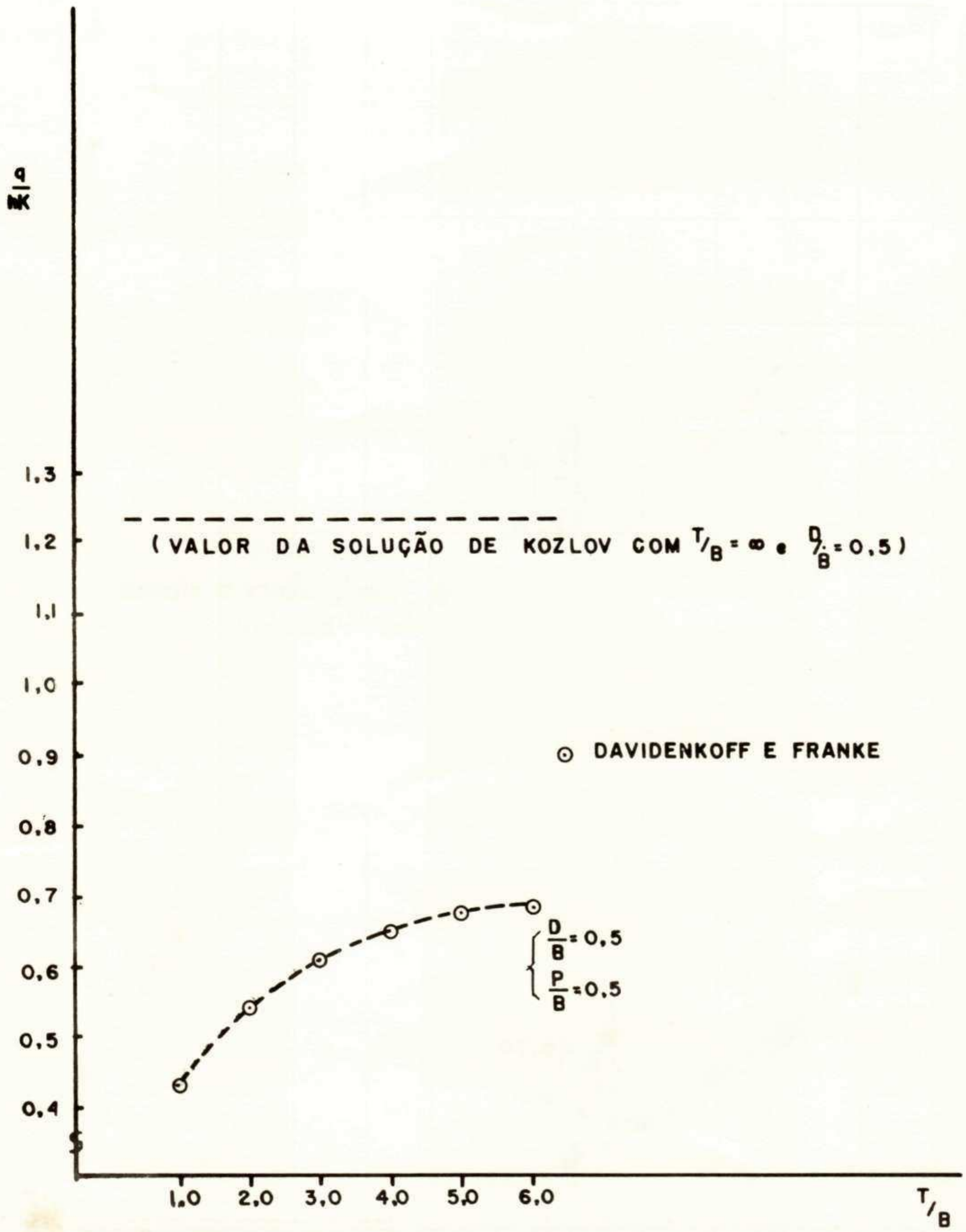


Figura 5.8 – Variação relativa da vazão adimensional com espessura do meio poroso de acordo com Davidenkoff & Franke

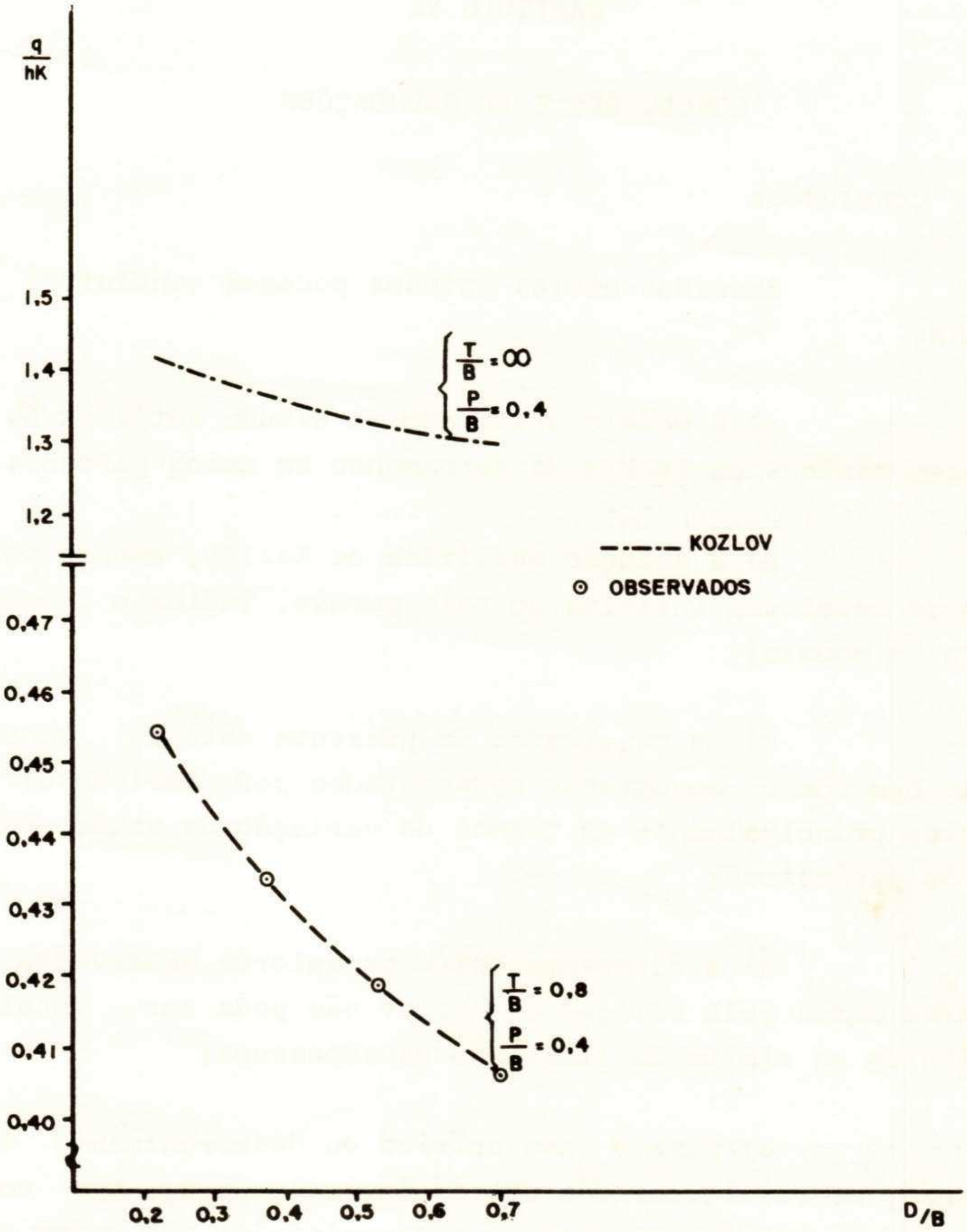


Figura 5.9 — Comparação dos resultados observados e os de Kozlov em termos de profundidade de escavação adimensional.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 - Conclusões

Baseados nestes estudos podemos concluir o seguinte:

a) O modelo utilizado no estudo satisfez às hipóteses básicas da teoria do escoamento em meios porosos;

b) a solução analítica de Kozlov, embora para o caso de espessura infinita do meio poroso, indica o comportamento do modelo;

c) os resultados do presente estudo concordam muito bem com os monogramas apresentados por Davidenkoff & Franke, principalmente em termos da variação da vazão com os outros parâmetros;

d) a diferença entre os valores observados e os valores dados pela solução de Kozlov não pode ser totalmente atribuída ao efeito da limitação da espessura;

e) para o caso crítico ou desmoronamento da escavação, os resultados dos outros investigadores, bem como o do presente estudo, discordam, e os critérios não podem ser aplicados com confiança.

6.2 - Recomendações

a) São recomendados mais estudos, para verifi -

car-se a influência da largura da escavação sobre a vazão . Também é recomendado nos estudos controlar melhor os valores dos parâmetros adimensionais (independentes), no lugar dos parâmetros básicos, como penetração, profundidade;

b) recomenda-se definir critérios que justifiquem as diferenças entre os valores de Kozlov (profundidade infinita do meio poroso) e outros obtidos para profundidade limitada do meio permeável.

R E F E R Ê N C I A S

01. BAUER, Gunther E., - Water and Seepage Pressure Considerations on Sheeted Cofferdams. *Proceedings, 1st Canadian Hydraulics Conference,* Edmonton, May, 1974.

02. BECERRIL, E. - *Hidromecanica.* Madrid, Editorial Dossat, 1960.

03. BRAHMA, S. P. - Seepage Through Opening in Cutoff wall Under Weir. *J. of the Geotechnical Engineering Division.* New York, ASCE, 93 (SM2): 45 - 64, March, 1967.

04. COMOLET, R. - *Mecanique Experimentale des Fluides.* Paris, Masson, 1963. 2v.

05. DE WIEST, R. J. M. - Discussion of "Analysis of Seepage Problems", by M. E. Harr and R. C. Dean, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,* New York, ASCE, 88 (SM1): 83 - 85, Feb., 1962.

06. DWIGHT, Herbert B. - *Tables of Integrals and Other Mathematical Data.* New York, The Macmillan Company 1972.

07. GRADSHTEYN, I. S. & KYZHIK, I. W. - *Tables of Integrals Series and Products,* New York, Academic Press, 1965 (original russo).

08. HARR, M. E. - *Groundwater and Seepage.* New York, McGraw-Hill, 1962.

09. HARR, M. E. & DEEN, R. C. - Analysis of Seepage Problems *J. of the Soil Mechanics and Foundations Division,* New York, ASCE, 87 (SM5): 91 - 107, October, 1961.

10. HSU, Hwei P. - *Análise Vetorial.* Tradução de Edgar Pereira de Cerqueira. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1972.

11. JAHNKE, E. & EMDE, F. - *Tables of Functions*. New York, Dover Publications, 1945.

12. KING, George J. W. - Seepage Under a Rectangular Dam. *J. of the Soil Mechanics and Foundations Division*, New York, ASCE, 93 (SM2): 45 - 64, March, 1967.

13. KOBER, H. - *Dictionary of Conformal Representations*. New York, Dover Publications, 1957.

14. KRIZEK, Raymond J. & ANAND, Vera B. - Flow around a Vertical Shetpile Embedded in an Inclined Stratified Medium. *Water Resources Research*, Washington, DC., 4 (1): 113 - 23. Feb., 1968.

15. LELIAVSKY, S. - *Design of Dams for Percolation and Erosion*. London, Chapman & Hall, 1965. v.3.

16. MARKUSHEVICH, A. - *Teoria de las Funciones Analiticas*. Tradução de Emiliano Aparicio Bernardo. Moscu, Editorial Mir, 1970. 2v. (original russo).

17. McNAMEE, J. - Seepage into a Sheeted Excavation, *Geotechnique*, London, 1 (4): 229 - 41, 1949.

18. MARSLAND, A. - Model Experiments to Study the Influence of Seepage on the Stability of a Sheeted Excavation in Sand. *Geotechnique*, London, 3 (6): 223 - 241.

19. MUSKAT, M. - *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*. New York, McGraw-Hill, 1937.

20. POLUBARINOVA - KOCHINA, P. Ya. - *Theory of Groundwater Movement*. Translated by J. M. Roger de Wiest. Princeton, N. J., Princeton University, 1962. (original russo).

21. RAMA RAO, B. S. & RAO VISWESWARA, J. - Seepage into Sheet Pile Cofferdam. *J. of the Hydraulics Division*, New York, ASCE, 99 (HY9): 1515 - 30, September, 1973.

22. REDDY, S. A. et alii - Flow Around Inclined Sheet Pile *J. of the Hydraulics Division*, New York, ASCE, 97 (HY7): 1101 - 14, July, 1971.

23. SCHNEEBELI, G. - *Hydraulique Souterraine*. Paris, Eyrolles, 1966. v.12.

24. SPIEGEL, M. R. - *Variáveis Complexas*. Tradução de José Raimundo Braga Coelho. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, Brasilia, INL, 1973. (original inglês).

25. VERRUIJT, A. - *Theory of Groundwater Flow*. New York, Gordon and Breach Science Publishers Inc., 1970.