

ESTUDOS EM MEIO POROSO HETEROGENEO

SUJEITO A BOMBEAMENTOS PERIÓDICOS

LUCIVAL AMÉLIO DE BARROS FERREIRA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

Aprovada por:

Ricardo
Presidente

Rei Carlos Vieira de Siqueira

Júlio Nasc

RIO DE JANEIRO
ESTADO DA GUANABARA - BRASIL
SETEMBRO DE 1969

Ao Pai

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Gaudu pela sua orientação.

Ao Prof. Massarani pela ajuda no fabrico e ensaios do meio poroso artificial.

Aos Srs. Jorge, Olympio e Oleg pelo auxílio técnico prestado.

A COPPE e à CAPES pela ajuda financeira prestada.

A Zélia e Lucy pela impressão deste trabalho.

ABSTRACT

The purpose of this work is the behavioral study of a heterogeneous porous media, when it suffers an unsteady - periodic pumping.

For this, we built a special equipment and moulded an artificial porous media to which was applied a steady contour condition upstream and the unsteady pumping was made downstream.

The level variation, determined by the pulsation, - being choosen as dependent variable, it was noticed that it proceeded like a linear function of the discharge and the - period.

From this function, we can make a distinction, for - the case, whether the most permeable media is directly - subjected to the pumping or not.

I N D I C E

Agradecimentos	i
Índice	ii
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vii
Sumário	1
Abstract	2
<u>Capítulos</u>	
1. <u>INTRODUÇÃO</u>	3
1.1 - Objetivo	4
1.2 - Limites	4
II - <u>REVISÃO DA LITERATURA</u>	6
2.1 - <u>Resolução Teórica</u>	6
2.1.1 - Regime permanente	6
2.1.2 - Regime não permanente	12
2.1.3 - Meios heterogêneos	14
2.1.4 - Conclusão da teoria	16
2.2 - <u>Resolução analógica</u>	16
2.2.1 - Papel Teledeltos	16
2.2.2 - Rêde de resistências	17
2.2.3 - Método das placas paralelas	18
2.3 - Modélo reais	18
III - <u>Material e Métodos</u>	19
3.1 - Cuba de infiltração	19
3.2 - Torre de contrôle de nível	22
3.3 - Sistema elétrico	26

3.4	-Sistema hidráulico	31
3.5	-Accessórios	37
3.6	-Preparo do modelo	37
3.7	-Método empregado	40
3.8	-Limitação do equipamento	41
3.9	-Fluido utilizado	43
IV -	<u>RESULTADOS</u>	
4.1	-Apresentação tabular dos resultados	44
4.2	-Apresentação gráfica dos resultados	44
V -	<u>DISCUSSÃO</u>	83
5.1	- Observações no meio poroso	83
5.2	- Observações nos resultados	83
5.3	- Deduções e comentários	85
VI -	<u>CONCLUSÃO</u>	90
VII-	<u>SUGESTOES</u>	92
BIBLIOGRAFIA	93
<u>APÊNDICES</u>		
Apêndice A	- Determinação da permeabilidade	94
Apêndice B	- Ensaio de porosidade	97
Apêndice C	- Ensaio de bombeamento	99
Apêndice D	- Programas de computador	101
Apêndice E	- Dados técnicos e fotografias da aparelhagem	109
Apêndice F	- Fotografias e gráficos complementares ...	110
<u>NOMENCLATURA</u>	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	- Meios heterogêneos	3
Figura 2	- Meio poroso retangular	8
Figura 3	- Condições de contorno a montante	10
Figura 4	- Condições de contorno a jusante	10
Figura 5	- Refração na linha de separação dos meios	14
Figura 6	- Meios em paralelos	15
Figura 7	- Meios em série	15
Figura 8	- Aparelhagem - vista geral	20
Figura 9	- Cuba de infiltração - projeto	21
Figura 10	- Suporte da cuba - projeto	23
Figura 11	- Cuba de infiltração e seu suporte - foto	25
Figura 12	- Reservatório elevado e seu suporte - foto	25
Figura 13	- Reservatório elevado e seu suporte-projeto	24
Figura 14	- Sistema elétrico - circuito geral	27
Figura 15	- Ponte de diodos	28
Figura 16	- Curva de calibração da ponta	32
Figura 17	-- Sistema hidráulico	33
Figura 18	- Réguas de medição- projeto	36
Figura 19	- Registrador	38
Figura 20	- Réguas de medição (foto)	38
Figura 21	- Moldagem dos meios	39
Figura 22	- Convergência para um bombeamento periódico	42
Figura 23	- Gráfico período- vasão	42
Figura 24	- Curvas $H \times T$ para $K_1 < K_2$	61
Figura 25	- Curvas $H \times T$ para $K_1 > K_2$	77
Figura 26	- Gráfico $\Delta H \times Q$ para $K_1 < K_2$	78
Figura 27	- Gráfico $\Delta H \times Q$ para $K_1 > K_2$	79
Figura 28	- Bombeamento permanente	82
Figura 29	- Nível máximo de um bombeamento periódico	84
Figura 30	- Nível mínimo de um bombeamento periódico	84

Figura 31	- Gráfico dos coeficientes angulares da reta	86
Figura 32	- Gráfico provável para T muito grande	91
Figura 33	- Camadas heterogêneas	92
Figura 34	- Permeâmetro a ar	111
Figura 35	- Porosímetro	111
Figura 36	- Determinação da permeabilidade	96
Figura 37	- Calibração da bomba B	100
Figura 38	- Material utilizado para a fabricação dos meios	112
Figura 39	- Parafusos calantes e ligações hidráulicas no reservatório	112
Figura 40	- Vertedor	113
Figura 41	- Pésos de equilíbrio	113
Figura 42	- Bomba A	114
Figura 43	- Bomba B	114
Figura 44	-- Transformador e voltímetro auxiliares da bomba B	115
Figura 45	- Sifão	115
Figura 46	- Detalhe da ponta na água	116
Figura 47	- Superfície de sugência	116
Figura 48	- Mesa de comando	117
Figura 49	- Permeâmetro - detalhe	117
Figura 50	- Material usado no ensaio de porosidade	118
Figura 51	- Escoamento para $K_1 > K_2$	118
Figura 52	- Escoamento para $K_1 < K_2$	119
Figura 53	- Escoamento para $K_1 < K_2$	119
Figura 54	- Escoamento para $K_1 < K_2$	120
Figura 55	- Escoamento para $K_1 < K_2$	120
Figura 56	- Escoamento para $K_1 < K_2$	120
Figura 57	- Escoamento para $K_1 < K_2$	120
Figura 58	- Curvas de resultados para $T = 5\text{ s}$	121
Figura 59	- Curvas de resultados para $T = 10\text{ s}$	121

Figura 60 - Curvas de resultados para $T = 15$ s	122
Figura 61 - Curvas de resultados para $T = 20$ s	122
Figura 62 - Curvas de resultados para $T = 25$ s	123
Figura 63 - Curvas de resultados para $T = 30$ s	123

ÍNDICE DAS TABELAS

Tabela 1 - Material elétrico	29
Tabela 2 - Material hidráulico	34
Tabela 3 - Características de material	40
Tabela 4 - Propriedade físicas do material	40
Tabela 5 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.030$	46
Tabela 6 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.035$	47
Tabela 7 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.040$	48
Tabela 8 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.045$	49
Tabela 9 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.050$	50
Tabela 10 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.055$	51
Tabela 11 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.060$	52
Tabela 12 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.065$	53
Tabela 13 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.070$	54
Tabela 14 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.075$	55
Tabela 15 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.080$	56
Tabela 16 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.085$	57
Tabela 17 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.090$	58
Tabela 18 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.095$	59
Tabela 19 - Valôres encontrados para $K_s < K_r$, $Q = 0.100$	60
Tabela 20 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.030$	62
Tabela 21 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.035$	63
Tabela 22 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.040$	64
Tabela 23 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.045$	65
Tabela 24 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.050$	66
Tabela 25 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.055$	67
Tabela 26 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.060$	68
Tabela 27 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.065$	69
Tabela 28 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.070$	70
Tabela 29 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.075$	71
Tabela 30 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.080$	72
Tabela 31 - Valôres encontrados para $K_s > K_r$, $Q = 0.085$	73

Tabela 32 - Valôres encontrados para $K_s > K_t$, $Q = 0.090$	74
Tabela 33 - Valôres encontrados para $K_s > K_t$, $Q = 0.095$	75
Tabela 34 - Valôres encontrados para $K_s > K_t$, $Q = 0.100$	76
Tabela 35 - Valôres das variações para a curva de Dupuit	80
Tabela 36 - Valôres dos coeficientes das retas $\Delta H = f(Q)$	88
Tabela 37 - Valôres encontrados no ensaio de permeabilidade	95
Tabela 38 - Valôres encontrados no ensaio de porosidade	98
Tabela 39 - Valôres encontrados no ensaio de bombeamento	99

Juval Avelio de Barros Ferreira
1.

SUMÁRIO

Este trabalho tem por objetivo o estudo do comportamento de um meio poroso quando sujeito a um bombeamento não permanentemente do tipo periódico.

Para isto, foi construído um equipamento especial e moldado um meio poroso artificial ao qual se aplicou uma condição de contorno constante, a montante, sendo realizado o bombeamento transitório a jusante.

Tendo-se escolhido a variação de altura, acarreta - da pela pulsação, para variável dependente, observou-se que a mesma se portava como uma função linear da vazão e do período.

Com base nesta função, pode ser feita uma distinção, para o caso, se o meio mais permeável está sujeito diretamente ao bombeamento ou não.

I. INTRODUÇÃO

Nas formações naturais do solo, encontra-se comumente lençóis de elevado grau de heterogeneidade que, na maioria dos casos, são reduzidos por hipóteses simplificadoras, a casos homogêneos.

Para lençóis homogêneos, quando sujeitos à vazão constante, há métodos satisfatórios para seu estudo que nos permite a distinção, como o método de Theiss. Quando há, - porém, diversas camadas sobrepostas ou justapostas parece impossível uma distinção, sob um bombeamento permanente, como no caso da figura (1).



Fig. 1 - Meios heterogêneos

O estudo, neste campo, em regime não permanente - tem se resumido a casos particulares, como barragens tendo,- um dos lados, o nível d'água sujeito a um abaixamento ou elevação de modo a se poder tratar o problema como uma sucessão de casos de regime permanente.

O interesse demonstrado por entidades científicas provindo de problemas surgidos na prática, nos levou ao estudo que constitui o presente trabalho.

1.1 - Objetivo

A pesquisa, que nos propuzemos realizar, teve por finalidade, investigar as consequências advindas de um bombeamento periódico em um lençol heterogêneo constituído por dois meios porosos artificialmente consolidados comparando os resultados obtidos com os provindos da mesma situação, alternando-se, porém, os meios, figuras (1a) e (1b) para, dentro destas características, procurarmos estabelecer uma lei que represente a influência dêste bombeamento.

1.2 - Limites

A impossibilidade do estudo em um meio suficientemente extenso longitudinalmente dá uma limitação natural no tocante ao comprimento. Isto acarretará a impossibilidade de se tratar o problema unidimensionalmente. Dando, ainda, ao caso um cunho bi-dimensional, há o aparecimento da superfície livre que vai acrescer o problema, de mais condições.

Tendo sido usado, na experiência, unicamente dois meios diferentes, os resultados ficam, de certo modo, limitados numéricamente às duas permeabilidades embora as conclusões possam ser extendidas para uma generalização.

Como limite físico temos o limite de validade da lei de Darcy, dentro do qual trabalharemos, ou seja,

$$\mathcal{R} = \frac{V \cdot \delta}{\nu} \leq 60$$

Os meios utilizados foram considerados, individualmente, homogêneos e isotropos.

Outras limitações serão tratadas quando falarmos do material e dos métodos pois são características dos instrumentos e aparelhos utilizados.

II. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta revisão, procuramos ver o que há de mais objetivo relacionado com o problema, para o modelo utilizado. Para isto, abordamos soluções teóricas e práticas verificando as maneiras usuais de se tratar a questão.

2.1. - Resolução Teórica

2.1.1. - Regime permanente

Consideremos a figura (2) e tomemos, para seu estudo as seguintes hipóteses-

- a) Validade da lei de Darcy
- b) Terreno homogêneo e isotropo
- c) Líquido filtrante e material incompressíveis.

Baseados na hipótese (a) temos-

$$\mathbf{V} = -k \cdot \operatorname{grad} \varphi \quad (2-1)$$

e na b. teremos:

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0 \quad (2-2)$$

Substituindo 2 - 1 em 2 - 2 temos:

$$\Delta \varphi = 0 \quad (2-3)$$

que nada mais é que a equação de Laplace e que dá a distribuição do potencial de velocidades no meio poroso.

No caso da figura (2), para resolver esta equação teríamos as seguintes condições de contorno:

Em a-b

$$\varphi = \text{cte} = H_1 \quad (\text{a})$$

Em b-c (abstraindo-se da capilaridade)

$$\varphi = \gamma \quad (\text{b})$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (\text{c})$$

Em c-d (reinando a pressão atmosférica)

$$\varphi = \gamma \quad (\text{d})$$

Em d-e

$$\varphi = \text{cte} = H_2 \quad (\text{e})$$

Finalmente, em a-e (impermeável)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (\text{f})$$

O problema é resolvido empregando-se o método de integração de Tcharnii.

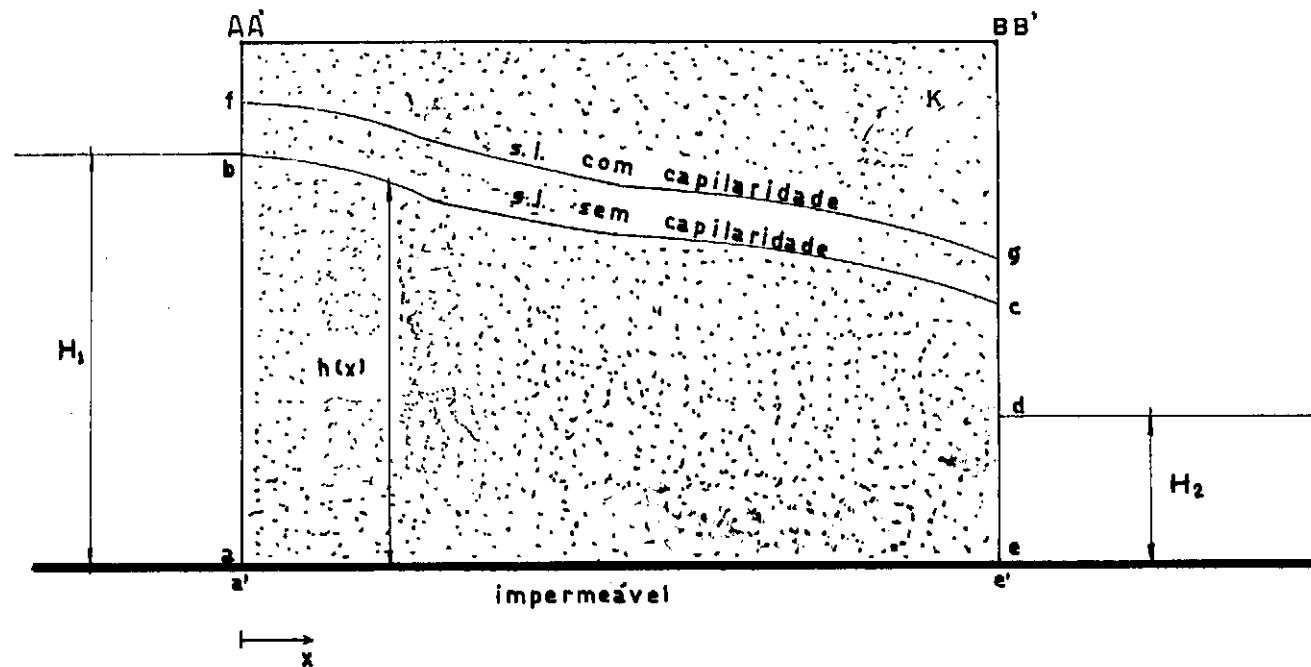
A vazão em uma determinada secção é dada por:

$$dQ_x = \int_0^h u \cdot dy \cdot dz = -k \cdot dz \int_0^h \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot dy$$

Tomemos a vazão elementar por unidade de largura:

Figura 2.

MEIO POROSO RETANGULAR .



$$\frac{dq_x}{dz} = \frac{d q_x}{dx} = \int_0^h u \cdot dy = -k \cdot \int_0^h \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot dy$$

Utilizando-se a regra de integração temos:

$$q_x = -k \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h \varphi dy - \varphi(y=h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (2-4)$$

com a abstração da capilaridade temos:

$$\varphi(y=h) = y = h$$

$$q_x = -k \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_0^h \varphi dy - \frac{h^2}{2} \right] \quad (2-5)$$

sendo o têrmo entre colchetes função únicamente de x escrevemos:

$$I(x) = \int_0^h \varphi dy - \frac{h^2}{2} \quad (2-6)$$

$$q_x = -k \cdot \frac{\partial I}{\partial x}$$

mas, pela equação da continuidade:

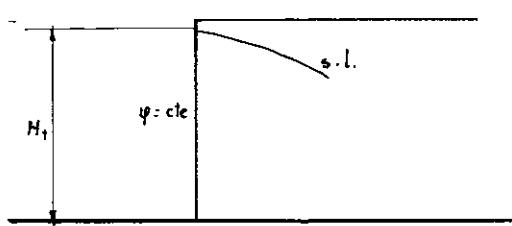
$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} &= 0 \end{aligned} \quad (2-7)$$

por (2-7) podemos escrever:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = c_1$$

$$I = c_1 x + c_2 \quad (2-8)$$

Aplicando as condições de contorno temos:



Para $x=0$

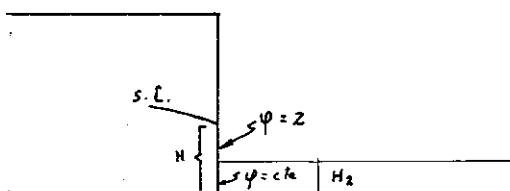
$$I = \int_0^{H_1} H_1 \cdot dz - \frac{H_1^2}{2}$$

$$I = - \frac{H_1^2}{2}$$

figura 3 - condições de contorno à montante.

levando para (2-8) sai:

$$C_1 = - \frac{H_1^2}{2} \quad (2-9)$$



Para $x=L$

$$I = \int_0^{H_2} H_2 \cdot dz + \int_{H_2}^H z \cdot dz - \frac{H^2}{2}$$

$$I = - \frac{H_2^2}{2}$$

figura 4 - condições de contorno à jusante.

Substituindo-se na equação (2-8) temos:

$$I = C_1 \cdot L + \frac{H_1^2}{2} - \frac{H_2^2}{2}$$

$$\therefore C_1 = - \frac{H_2^2 - H_1^2}{2L} \quad (2-10)$$

Levando-se os valores de (2-9) e (2-10) para (2-8) temos, finalmente:

$$I = - \frac{H_2^2 - H_1^2}{2L} \cdot \infty - \frac{H_1^2}{2} \quad (2-11)$$

Se tomarmos um plano vertical, consequentemente perpendicular ao "substratum" impermeável, que tenha por traço neste - uma curva C teremos, para vazão nesta secção :

$$Q = - k \phi_c \frac{\partial I}{\partial n} \cdot ds$$

sendo K = permeabilidade relativa do meio
 ds = arco elementar de C
 dn = normal

Tomando nosso plano vertical como sendo o BBee' temos:

$$\frac{dI}{dh} = \frac{dI}{dx} - \frac{H_2^2 - H_1^2}{2L}$$

$$ds = dy$$

$$\therefore Q = -k \cdot \frac{(H_2^2 - H_1^2)}{2L} \cdot \int_0^b dy$$

$$Q = \frac{k \cdot b}{2L} \cdot (H_1^2 - H_2^2) \quad (2-12)$$

Esta fórmula é conhecida como a fórmula de Dupuit e dá a vazão dos meios para condições externas definidas e será utilizada posteriormente para um confronto com a prática.

Considerando-se a capilaridade teremos uma elevação da superfície livre para uma posição f-g, mostrada na figura - (2).

Se seguirmos os mesmos passos do estudo anterior chegaremos à conclusão que o acréscimo na descarga, por unidade de largura, devido à capilaridade é:

$$(2-13) \quad q - q_D = \frac{k \cdot hc}{L} (z_f - z_g) - \frac{k}{\bar{\omega} L} \left(\int_c^g p dz + \int_f^b p dz \right)$$

$$\text{em que } q_D = k \cdot \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L}$$

hc = altura capilar

$\bar{\omega}$ = peso específico da água

p = pressão

z_f e z_g = cotas de f e g

2.1.2 - Regime não Permanente

No escoamento bi-dimensional não permanente entra mais uma variável que é o tempo. No presente caso, ela se faria sentir através de uma variação das condições de contorno o que iria acarretar um movimento da superfície livre.

Fundamentado nas hipóteses

- 1 - Validade da Lei de Darcy
- 2 - Incompressibilidade do líquido filtrante
- 3 - $\varphi(x, y, t) = h(x, t)$

Teríamos a equação que rege o movimento transitório em um meio homogêneo que é

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2.14) \text{ em que}$$

$$\alpha = \frac{\epsilon}{k \cdot b}$$

ϵ = porosidade efetiva

k = permeabilidade relativa

b = espessura

Nas condições de contorno não teríamos a superfície livre regida por uma condição do tipo (b), (c) do item anterior, mas sim, uma equação que regeraria seu movimento, da forma:

$$\frac{\epsilon}{k} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial x} \times \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (2.15)$$

Resumindo-se, para se solucionar o problema da figura (2) em regime não permanente, necessitar-se-ia solucionar a equação (2.14) para as seguintes condições de contorno, abstraindo-se do efeito capilar:

$$\text{Em } a-b \quad \varphi = H_1(t)$$

$$\text{Em } b-c \quad \text{dada pela eq. (2.15)}$$

$$\text{Em } c-d \quad \varphi = y(t)$$

$$\text{Em } d-e \quad \varphi = H_2(t)$$

$$\text{Em } a-e \quad \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$$

Como podemos observar, o caso, mesmo sendo homogêneo, é de difícil tratamento, ainda que casos particulares simples possam ser resolvidos, como aquêles em que o nível de montante ou jusante sofrem um abaixamento ou elevação muito lento, que se faz considerando como uma sequência de casos permanentes.

2.1.3 Meios Heterogêneos

Tomemos um escoamento através de dois solos de permeabilidades diferentes k_1 e k_2 , e chamemos à linha de separação de A-B. figura (5) e seja n uma normal.

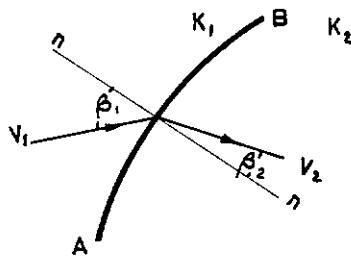


figura 5 - refração na linha de separação dos meios.

A lei que rege o fenômeno é semelhante à lei da refração e nos dá:

$$\frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_2} = \frac{k_1}{k_2} \quad (2-16)$$

No estudo de meios como este, costuma-se substitui-los por um meio equivalente homogêneo, adotando-se para isto fórmulas conforme se tratem de meios em paralelo - figura (6) - ou meios em série - figura (7).

Para meios em paralelo:

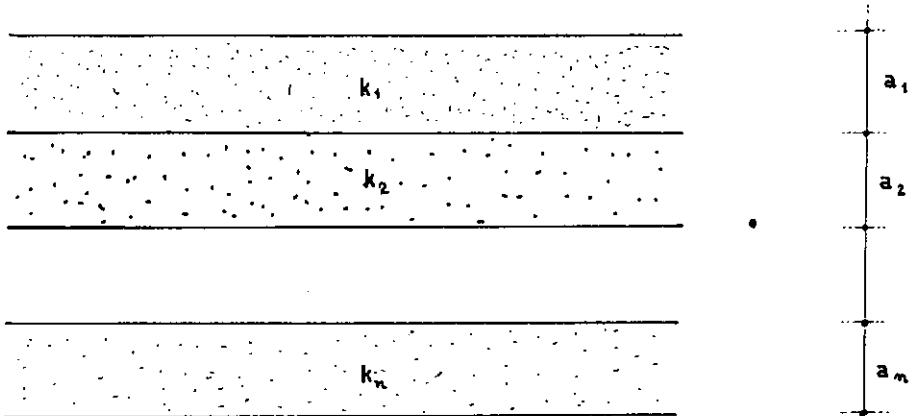


figura 6 - meios em paralelo.

$$k = a_1 \cdot k_1 + a_2 \cdot k_2 + \dots + a_n \cdot k_n \quad (2-17)$$

em que:

$$a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n = 1$$

Para meios em série.

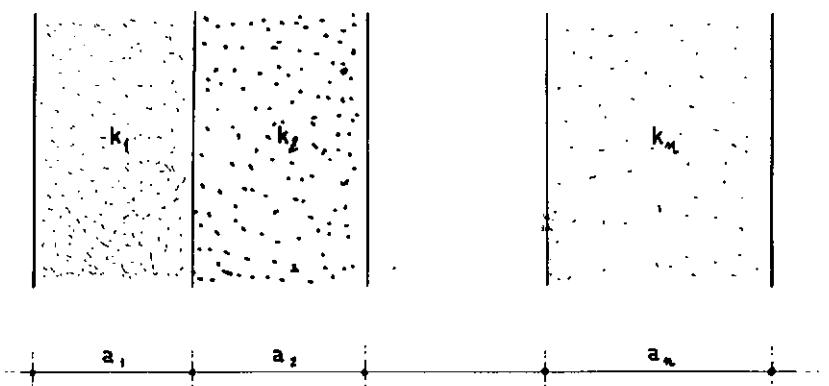


figura 7 - meios em série

$$K = \frac{1}{\frac{a_1}{k_1} + \frac{a_2}{k_2} + \dots + \frac{a_n}{k_n}}$$

Fórmula ésta de bom resultado para escoamentos em carga.

2.1.4 Conclusão da teoria

Para solução do problema proposto, teríamos então que solucionar o caso do item 2.1.2 acrescido da condição 2-16 o que ainda complicaria ainda mais o problema transformando-o em um caso de difícil solução.

2.2 - Resolução analógica

Muito empregados nas soluções de problemas de escoamento, os métodos analógicos são um recurso que pode ser de grande auxílio não só na solução, como também, na visualização dos problemas, destacando-se os de analogia elétrica e o de analogia viscosa

2.2.1 - Papel Teledeltos

O emprêgo do papel Teledeltos recorre à analogia existente entre as diversas variáveis elétricas e hidráulicas em suas leis fundamentais. Ao papel, são figuradas as condições de contorno e a distribuição do potencial é verificada com o plotador. No caso de escoamento a superfície livre, acresce o problema de esta dever ser determinada "a priori", por tentativas, para depois, poder-se -

tratar o caso.

A heterogeneidade do meio, principal dificuldade do uso deste método, pode ser simulada pela associação de papéis de resistividades diferentes ou, mais simplesmente, pela perfuração do papel para a consideração de uma permeabilidade menor. Se utilizamos furos circulares, a densidade de furos máxima que pode ser utilizada é:

$$\frac{S_{\text{solid}}}{S_{\text{tot}}} = \frac{1}{10,8}$$

Este método, porém, oferece a restrição de não ser de fácil aplicação para o caso do movimento não permanente - sendo útil, se bem que com bastante cautela, para o caso de uma superfície livre descendente.

2.2.2 - Rêde de resistências

O uso da rôde de resistências é mais completo no trato da percolação em um meio heterogêneo que o papel Tele-deltos, se regendo pelos mesmos princípios, embora, como aquêle, sua aplicação se restrinja, praticamente, ao movimento permanente.

Neste método, substitui-se uma área do solo por uma resistência equivalente, calculada, segundo o caso, por fórmulas de conversão. Após armada, são aplicadas as condições no contorno e a distribuição dos potenciais é plotada nos diversos nós, traçando-se, posteriormente, com eventuais interpolações, as linhas equipotenciais.

Uma das vantagens deste método sobre o do Teledeltos é a possibilidade de representação de anisotropia do solo.

2.2.3 - Método das placas paralelas

Também conhecido como da analogia viscosa ou do modelo de Hele-Shaw, consiste em duas placas paralelas montadas em conjunto tendo entre elas um espaço capilar - (0,5 a 3,5 mm). Baseia-se na similitude entre as equações diferenciais que descrevem o escoamento, como da água, através de um meio poroso saturado e as que descrevem o escoamento laminar de fluidos viscosos através do espaço capilar entre duas placas paralelas.

Seu uso em movimento transitório também se resume a casos em que a variação com o tempo é lenta e contínua. A heterogeneidade pode ser representada por placas de distâncias proporcionais.

2.3 - Modélos reais

O emprêgo de modélos é, para o caso, o método muito mais prático pois nos facilita a estabelecer as condições desejadas, assim como, verificar diversos fenômenos que ocorrem na prática, e é o método utilizado em nosso estudo e de que trataremos nos próximos capítulos.

III - MATERIAL E MÉTODOS

O equipamento utilizado - figura (8), foi projetado e construído com a finalidade principal de capacitar o estudo a que nos propuzemos de maneira que procuraremos dar aqui uma descrição mais detalhada.

Para efeito explicativo, dividimos-a em cinco partes a saber:

- a) Cuba de infiltração
- b) Tôrre de controle de nível
- c) Equipamento elétrico
- d) Equipamento hidráulico
- e) Accessórios.

3.1 - Cuba de infiltração

Trata-se de uma caixa estanque, de secções transversal e longitudinal retangulares, - figura (9) - destinada a alojar o meio poroso, tendo a parte de cima livre, - construída totalmente em acrílico de 10 mm de espessura, - tendo em sua base dois furos, dispostos simetricamente, - por onde será injetado o fluido. Nestes furos, estão fixados dois níples de 1 1/4", que servirão para o engate da mangueira condutora de água.

Para evitar a penetração de poeira foram colocadas tampas dobráveis de acrílico cobrindo a parte onde ficará o líquido. Para a prevenção de abaulamento da caixa, foram feitos tirantes, também de acrílico, enquanto que, - com a finalidade de dar apoio e segurar a régua, foram fi-

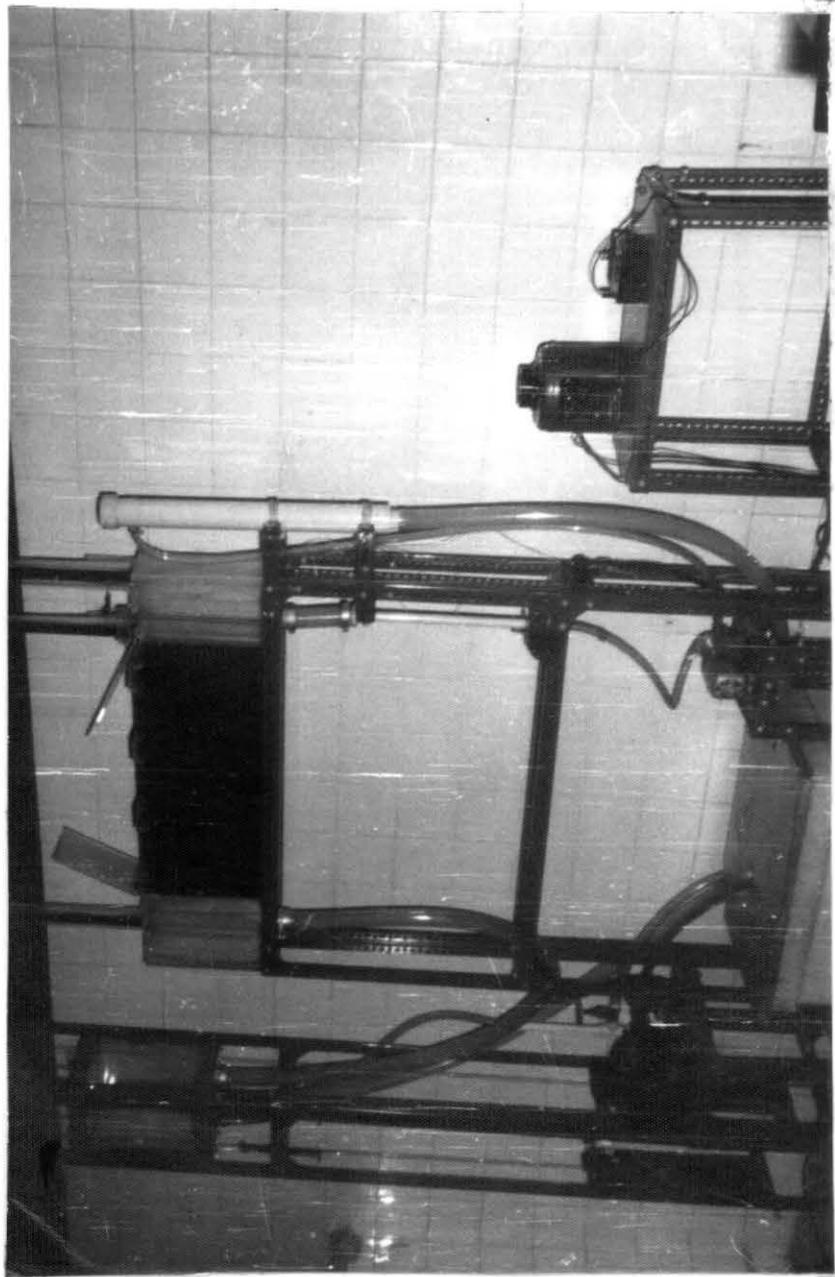
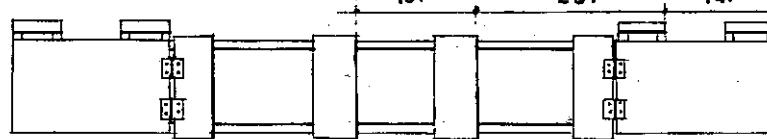
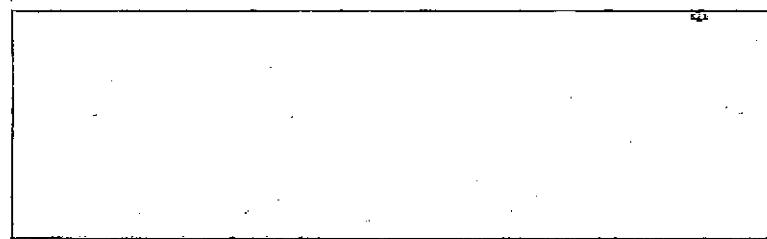


Figura 8. - Aparelhagem (vista geral)

CUBA DE INFILTRAÇÃO

102.



DETALHES

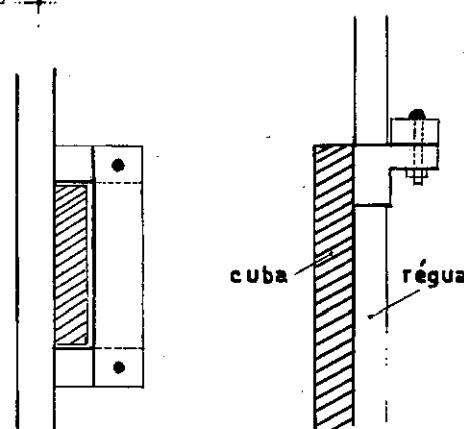
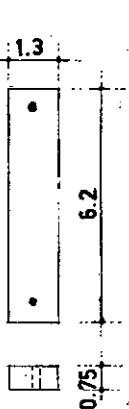
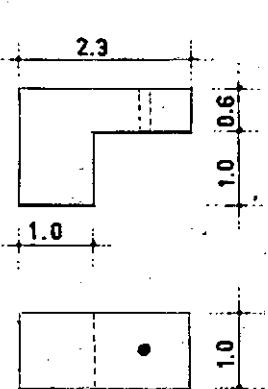
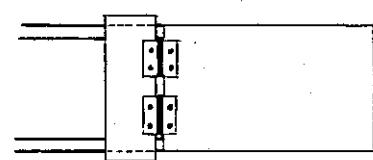
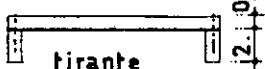
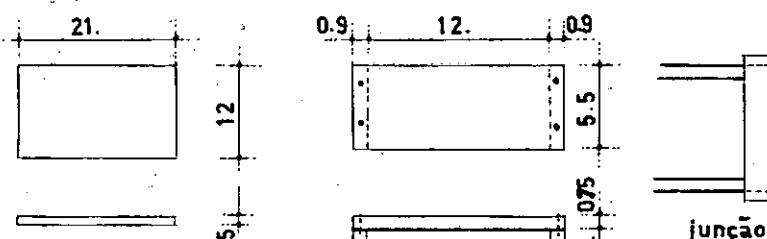


Figura 9.

xados à caixa retentores de acrílico, figura (9).

A cuba é ligada ao reservatório elevado por um tubo - de 1 1/2" e por outro tubo de mesmo diâmetro à bomba destinada a imprimir o bombeamento periódico.

Seu suporte é totalmente feito com "dexon", de dimensões transversais cotadas na figura (10). Nêle estão alojados - um encaixe para o registro, suporte para o sifão, ambos de dexon, além de tomadas para as duas bombas.

As cantoneiras são ligadas com parafusos de 1/2", - apropriadas e possuem reforços especialmente fabricados.

A figura (11) mostra o sistema cuba-suporte.

3.2 - Tôrre de contrôle de nível

Consiste em uma estrutura suporte feita de "dexon" - na qual foram fixadas duas roldanas por onde passam os cabos - de aço que seguram o reservatório elevado, figura (12). Este, feito em acrílico contém um vertedor com um "niplo" para o - extravasamento, uma saída para a tomada d'água e um outro "ni- plo" para a condução à cuba. Está emoldurado por uma estrutura em dexon que lhe serve de apoio e onde estão presos os ca - bos de aço.

As outras extremidades dos cabos prendem-se em pesos de aço estrutural, pesando 5 kg cada, para equilibrar o peso - do reservatório, num total de 16 kg, cheio d'água, facilitando assim seu manejo através de parafusos calantes que, apoiados - na estrutura principal dão ao mesmo uma variação de altura de 13 cm, tendo sido feitos com vergalhão de 3/8".

Esta torre de equilíbrio, detalhada na figura (13), irá manter uma condição limite fixa a montante do escoamento.- O sistema possui ainda guias para os pesos. O reservatório es - tá ligado diretamente a uma bomba que a alimenta com o líquido provindo de um tanque, para onde reverte o excesso descarrega - do pelo vertedor.

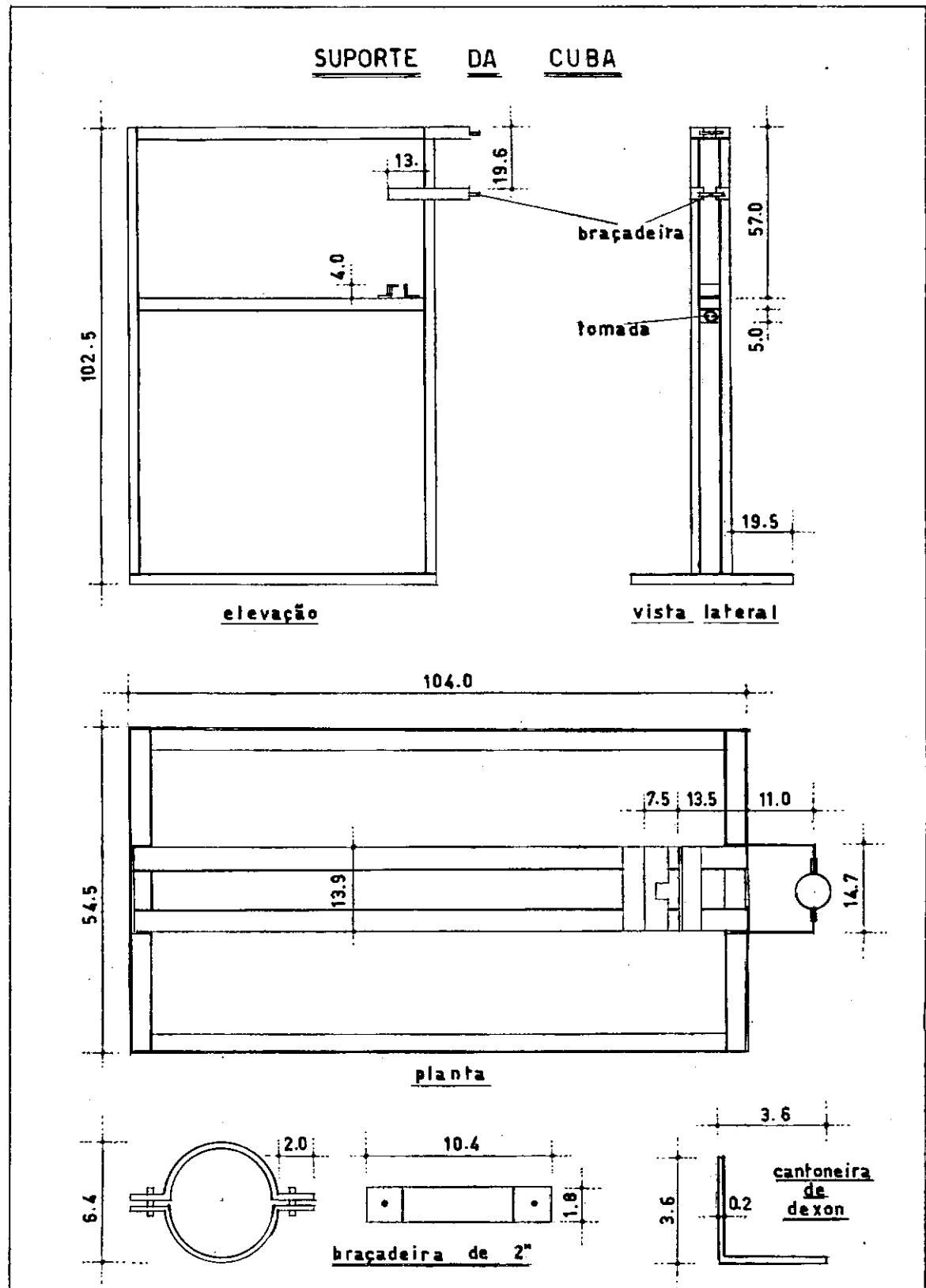


Figura 10.

RESERVATÓRIO ELEVADO

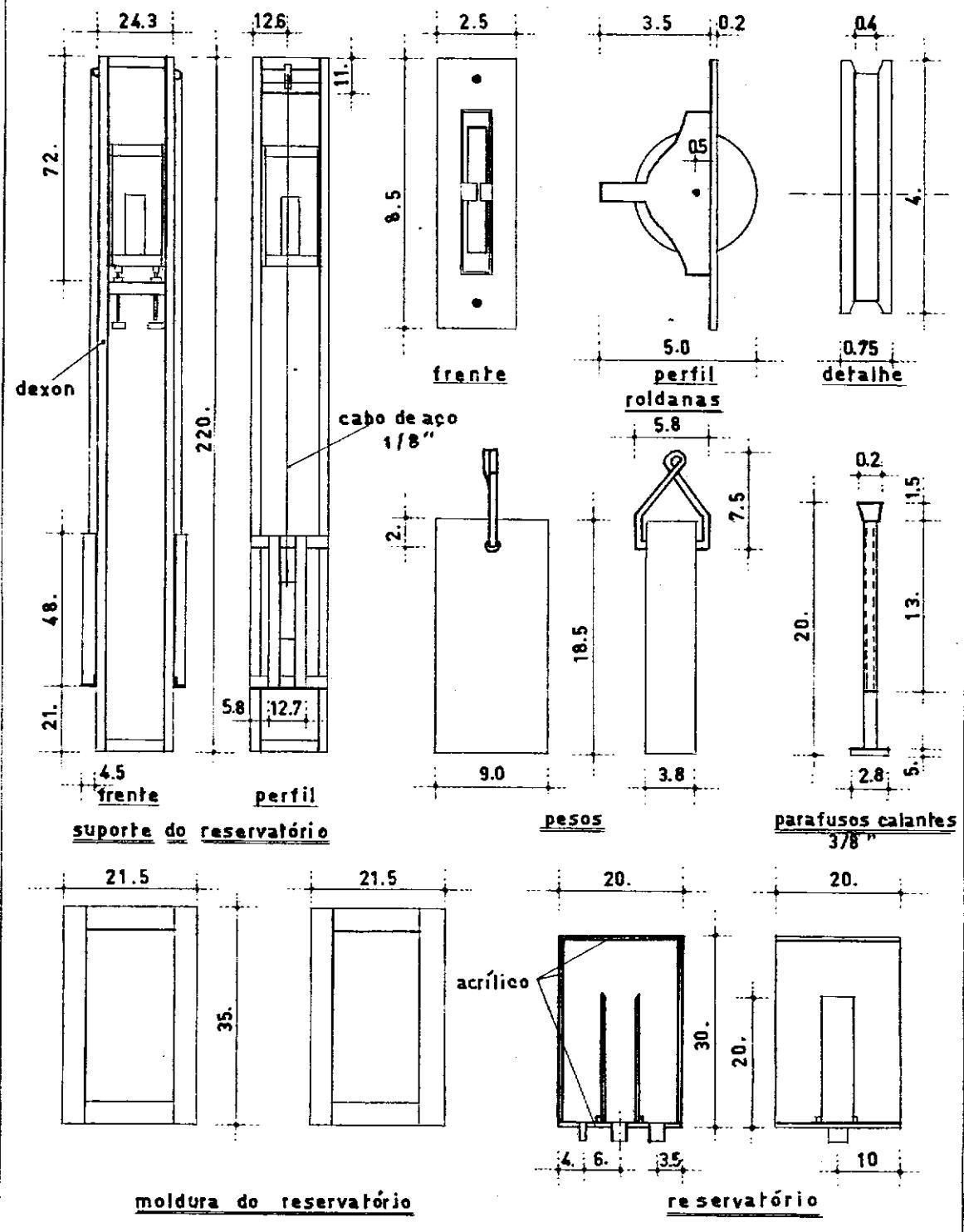


Figura 13.

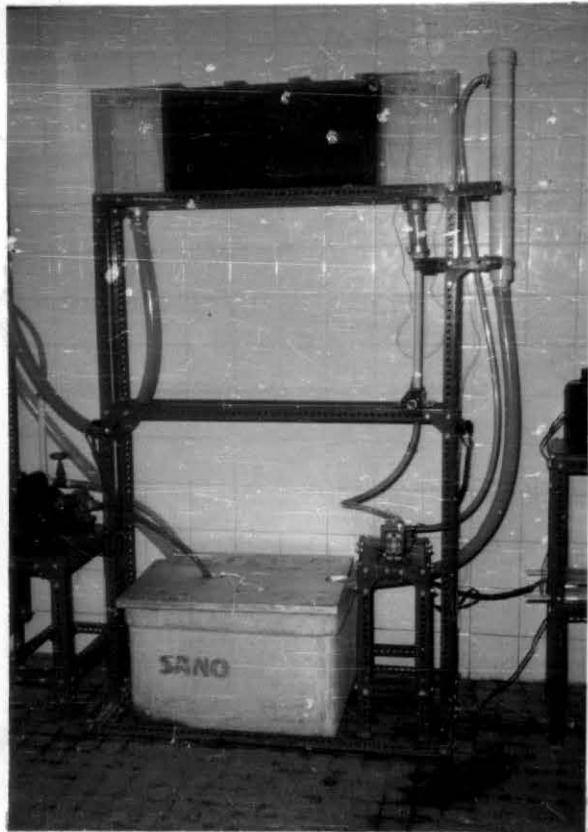
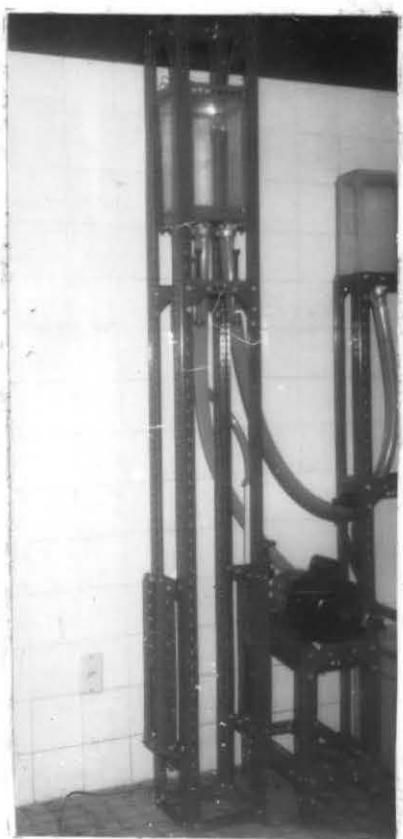


Figura 11. -

Cuba de infiltração
e seu suporte.

Figura 12.
Reservatório elevado
e seu suporte.



3.3 - Sistema elétrico

O sistema elétrico constitui-se, basicamente de 2 circuitos. O primeiro é o de alimentação das bombas e o segundo o elétrico de medição - figura (14).

O circuito de alimentação das bombas se subdivide no de alimentação da bomba A constituída pela tomada de 110v (1), circuito 5,6 e 11 e é controlado pelo interruptor (I); e no de alimentação da bomba B que consiste na tomada (1), circuito 7,8 e 12, interruptor (J) e transformador (B) com saída para a bomba B e com finalidade de variar a tensão de entrada na mesma, modificando, com isto, sua vazão. A alimentação é feita por corrente alternada.

O circuito elétrico de medição é constituído de uma alimentação (4) reduzida pelo transformador (D), uma ponta elétrica de medição (E), um sistema retificador de sinal (H), detalhado na figura (15), que, em conjunto com os interruptores (i) e (J), constituem o painel de comando (G), e um registrador (c).

A alimentação é feita pela tomada através de um variador de tensão, que imprime ao circuito um potencial de 10 v. A utilização da corrente alternada visa evitar os efeitos da eletrólise, que ocorreriam se se tivesse utilizado corrente contínua e o emprêgo de baixa tensão é por questão de segurança.

A ponta elétrica consiste de dois fios de cobre, de 1,0 mm de diâmetro e 40 cm de comprimento, situados, paralelamente, a uma distância de 1,0 cm, um do outro, fixos em -

Figura 14

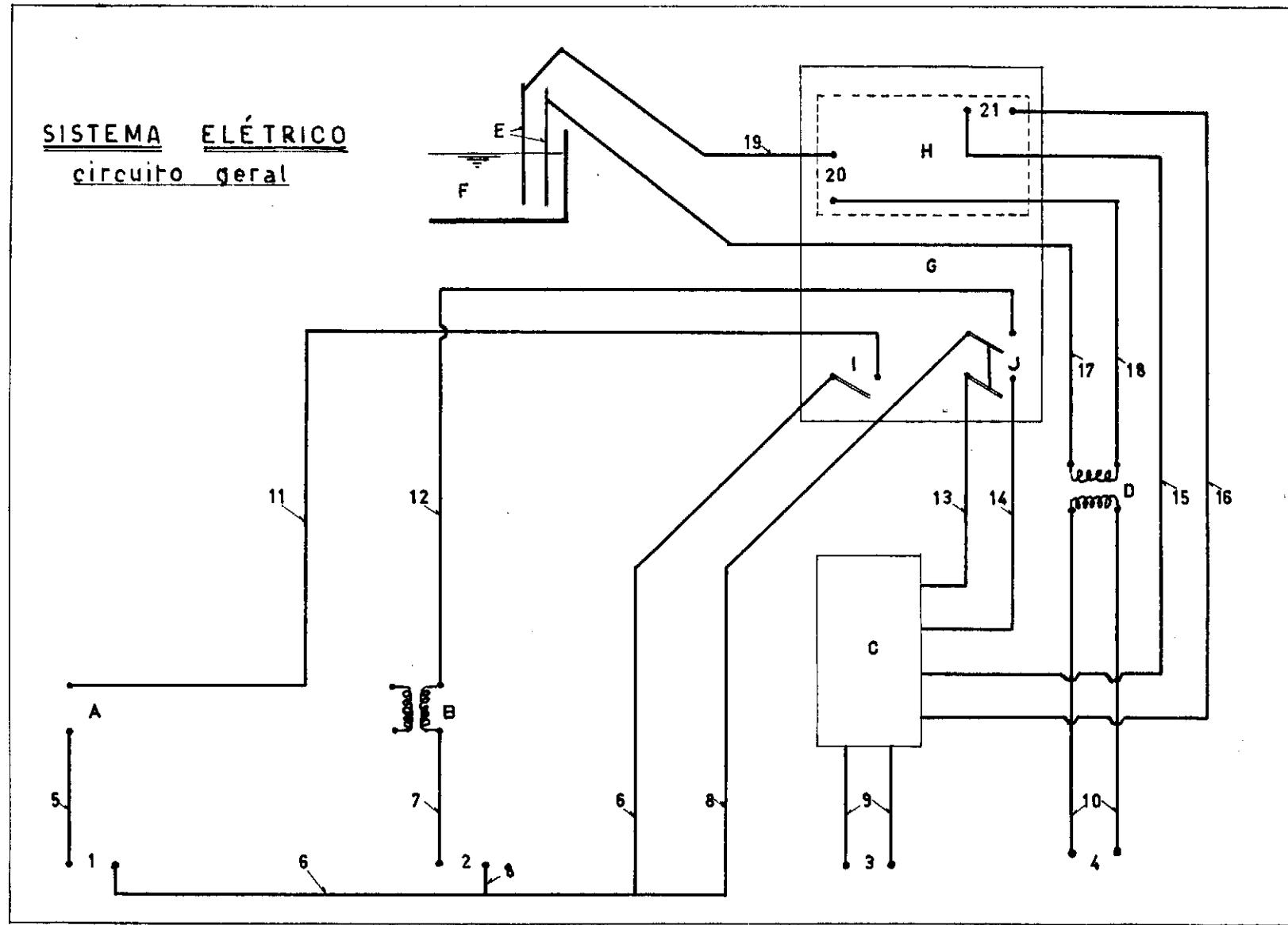


Figura 15.

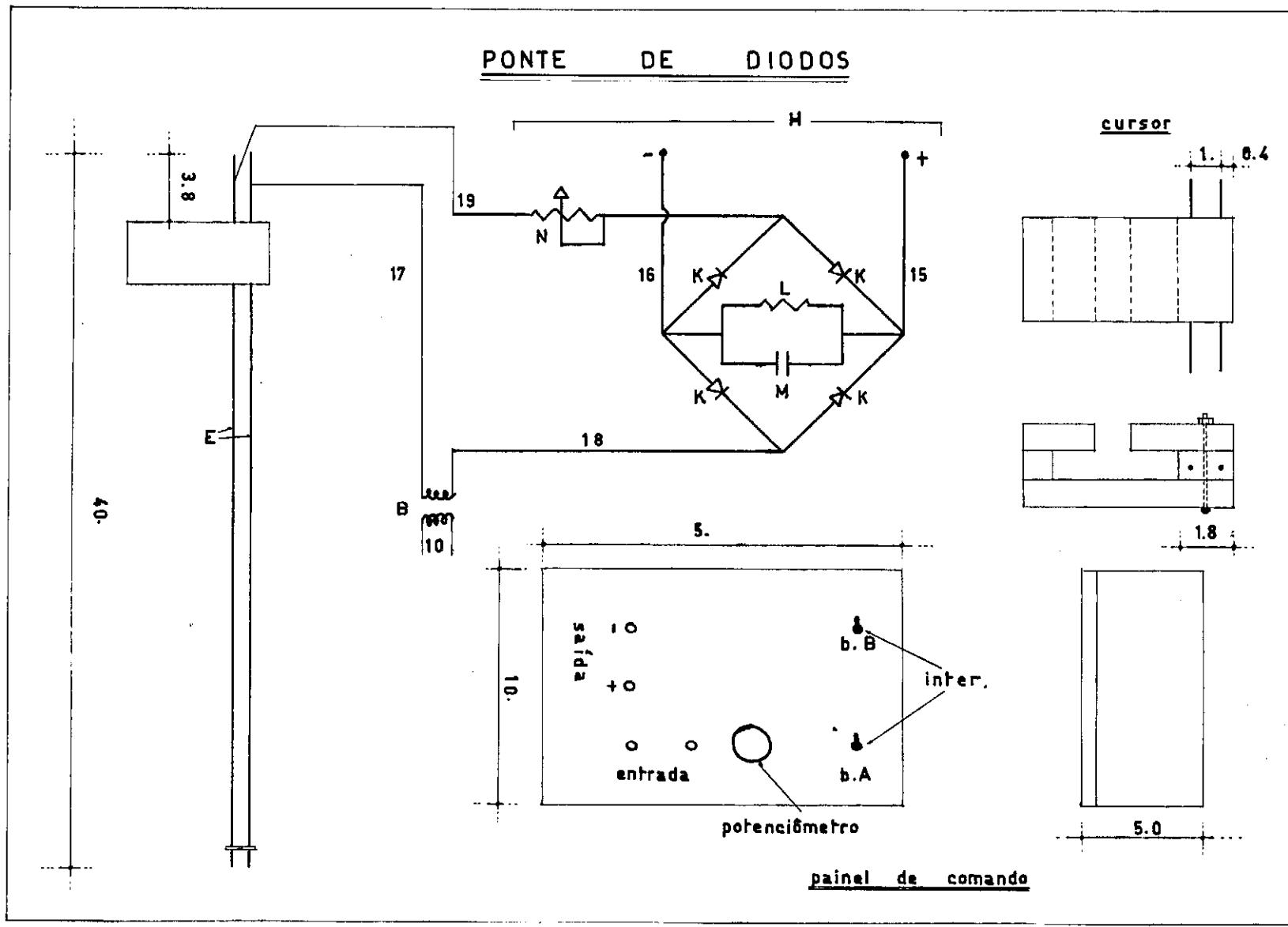


TABELA 1

Material elétrico

Nº	ESPECIFICAÇÃO	UNID	QUANT.
1	Tomada de plástico, 15 A	u	1
2	Tomada de plástico, 15 A	u	1
3	Tomada de plástico, 15 A	u	1
4	Tomada de plástico, 15 A	u	1
5	Fio nº 14.	m	1.0
6	Fio nº 14	m	5.0
7	Fio nº 14	m	1.0
8	Fio nº 14	m	4.0
9	Fios do registrador	-	-
10	Fios do registrador	-	-
11	Fio nº 14	m	5.0
12	Fio nº 14	m	4.0
13	Fio nº 18	m	1.0
14	Fio nº 18	m	1.0
15	Fio nº 18	m	1.5
16	Fio nº 18	m	1.5
17	Fio nº 18	m	5.0
18	Fio nº 18	m	1.5
19	Fio nº 18	m	4.0
20	Entrada da Ponte	-	-
21	Saída da Ponte	-	-
DETALHES DA FIG. nº 14			
A	Tomada plástico, 15A da bomba A		
B	Transformador de tensão B, da bomba B		
C	Registrador		
D	Transformador de tensão D		
E	Ponte elétrica de medição		
F	Cuba de infiltração		

Nº	ESPECIFICAÇÃO	UNID.	QUANT.
G	Painel de comando		
H	Ponte retificadora		
I	Interruptor de 15 A, da bomba A		
J	Interruptor de 15 A, da bomba B		
DETALHES DA FIG. nº 15			
K	Diódos OA 85		
L	Resistência de 1 k Ω		
M	Capacitor de 200 mf, 50 V		
N	Potenciômetro linear 5 K Ω		

um cursor que corre em uma escala graduada, podendo a parte imersa daquela variar de 0 a 30 cm. Se alterarmos a altura da parte imersa, a corrente conduzida variará em função dessa variação, função esta estabelecida antes das medições, através da calibração da ponta elétrica, por uma curva como a da figura (16). Com ela, posteriormente, faremos as conversões de altura no registrador para altura real. A utilização de água com alguma impureza nos permite o emprego desse sistema, pois funciona como uma resistência.

O sinal emitido vai para a ponte de diodos - figura (15), que o retifica enviando-o ao registrador que se encarrega de imprimir os resultados que serão interpretados - "à posteriori", com a curva de calibração.

Completando o sistema, temos um pequeno circuito - para impressão de sinais (13) e (14) que, alimentado internamente pelo registrador e controlado pelo interruptor J, - simultaneamente com a bomba B, sem, entretanto, dela sofrer influência, servirá para registrar no papel, os períodos de funcionamento da bomba B.

3.4 - Sistema Hidráulico

Constitui-se essencialmente de duas bombas, uma - caixa d'água e uma série de peças e tubulações esquematizadas na figura (17). A bomba A, (7), que é a maior das duas, cuida do abastecimento e a bomba B (39) cuida do esgotamento e tem sua vazão variando com a tensão de entrada. Com esta finalidade foi traçada uma curva de calibração para facilitar esta escolha.

A caixa d'água é do tipo comum, em cimento-amian-

HEWLETT-PACKARD/MOSLEY DIVISION

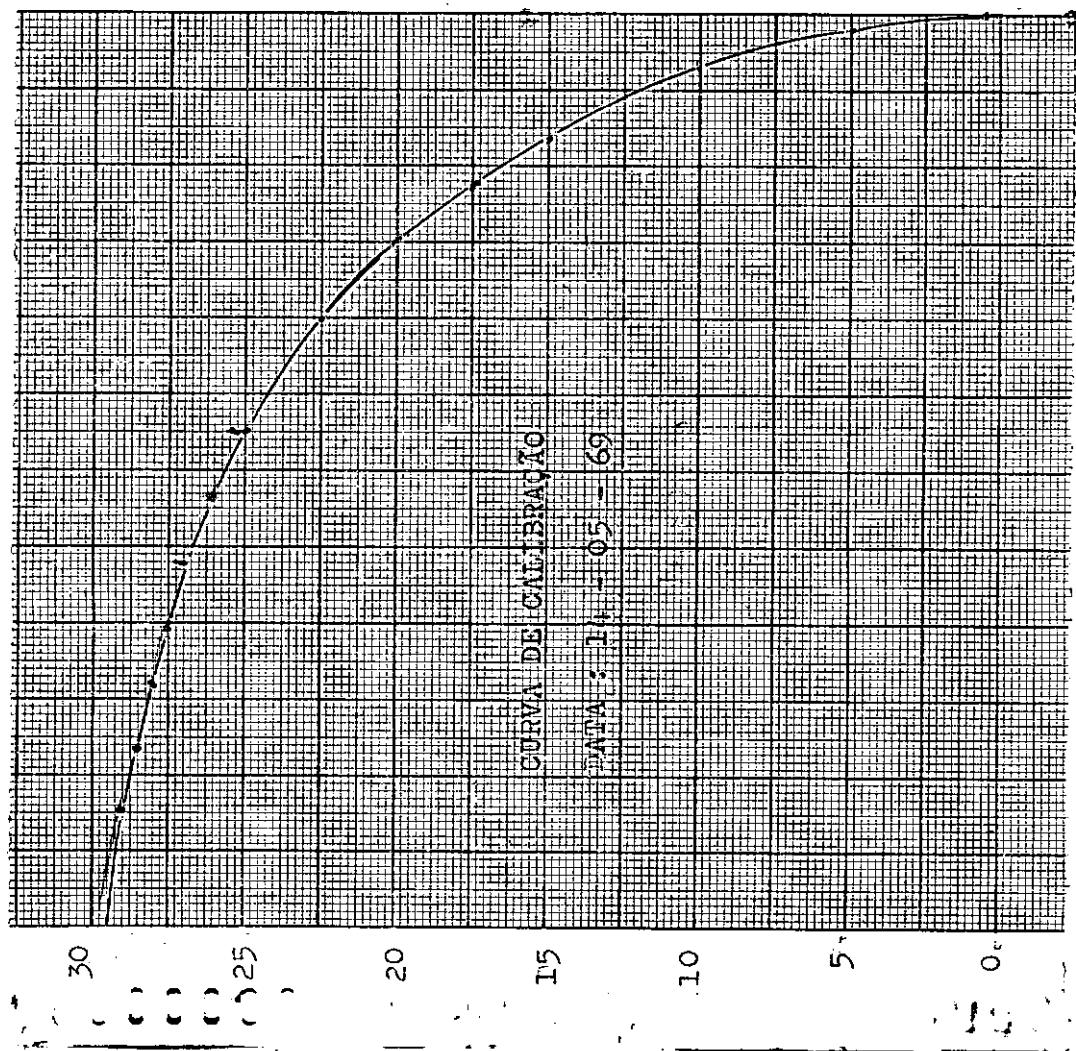


Figura 16. - Curva de calibração da ponta

SISTEMA HIDRÁULICO

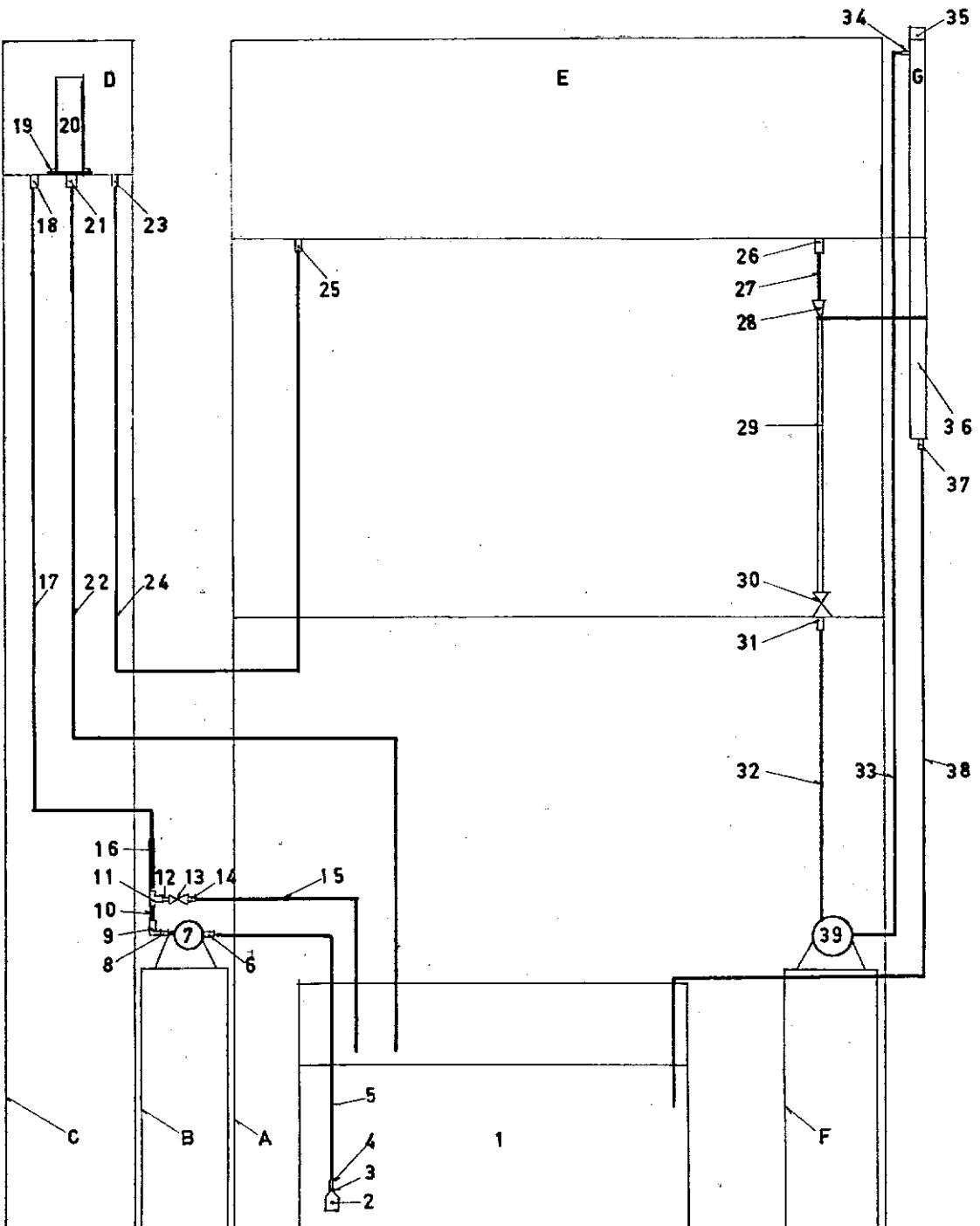


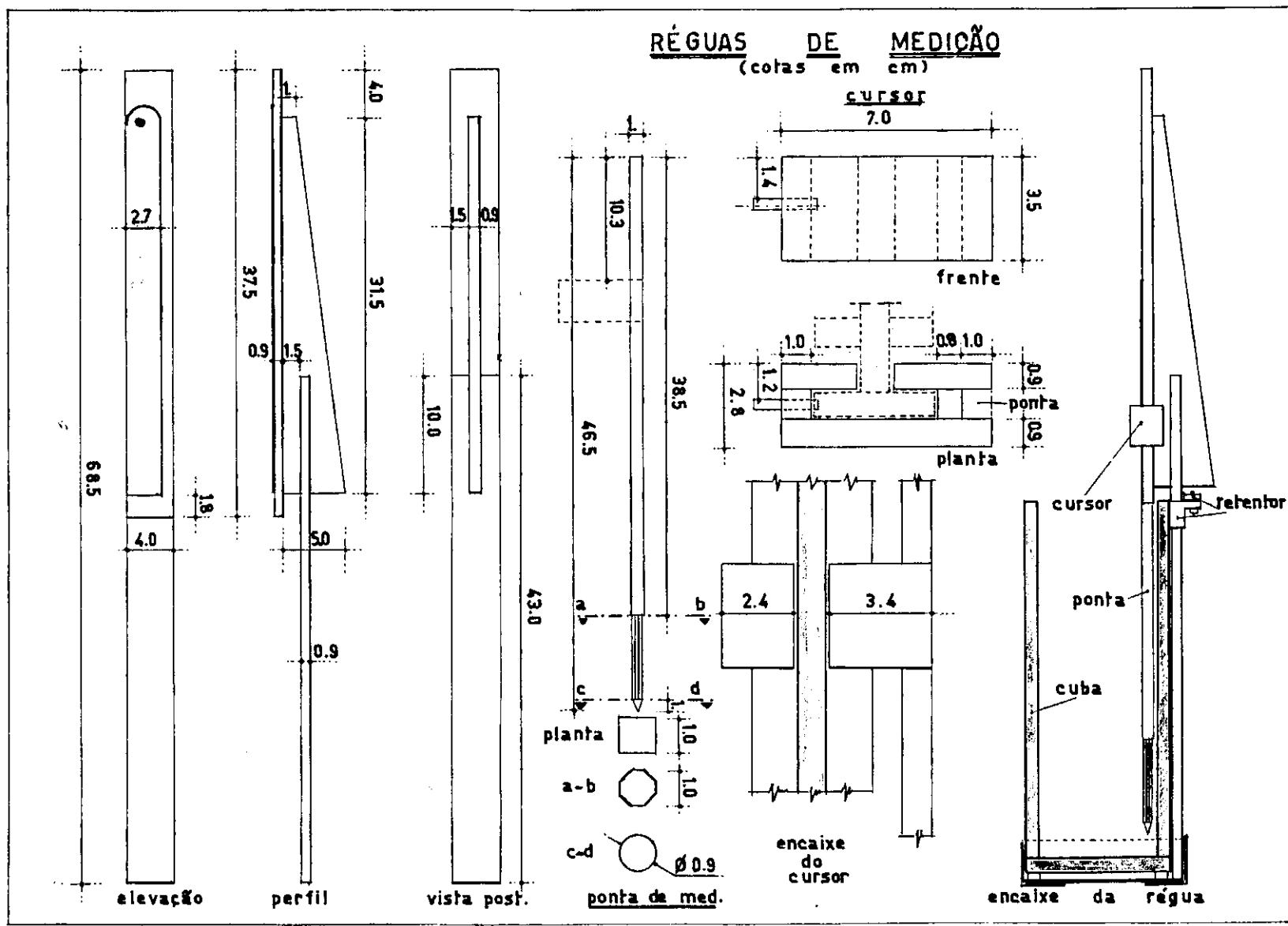
Figura 17.

TABELA (2)
Material Hidráulico .

Nº	ESPECIFICAÇÃO	UNID.	QUANT.
1	Caixa d'água "SANO" para 100 litros	u	1
2	Válvula de Fe F, de ponta, 3/4"	u	1
3	Redução 3/4" x 1/2" de plástico	u	1
4	Niplo de 1/2", plástico	u	1
5	Tubo de plástico flexivel, transparente de 3/4"	m	0,75
6	Niplo de 1/2", plástico	u	1
7	Bomba A (vide apêndice E)	-	-
8	Niplo de 1/2", plástico	u	1
9	Curva de 1/2", plástico	u	1
10	Niplo de 1/2", plástico	u	1
11	Tê de 1/2", plástico	u	1
12	Niplo de 1/2", plástico	u	1
13	Registro de gaveta de 1/2", Fe. Fund.	u	1
14	Niplo de 1/2", plástico	u	1
15	Tubo plástico flexivel, transparente, 3/4"	m	0,70
16	Tubo plástico rígido de 1/2"	m	0,25
17	Tubo plástico flexível, transparente, 3/4"	m	1.00
18	Saida de 3/4", Fe. Fund.	u	1
19	Flange de 2", de plástico	u	1
20	Vertedor - tubo plástico de 2" rígido	m	0.20
21	Niplo de 1 1/4" , plástico	u	1
22	Tubo plástico de 1 1/2", flexivel, transparente	m	2,00
23	Niplo de 1 1/4" , plástico	u	1
24	Tubo plástico de 1 1/2", flexivel, transparente	m	1.80
25	Niplo de 1 1/4" , plástico	u	1

Nº	ESPECIFICAÇÃO	UNID.	QUANT.
26	Niplo de 1 1/4", plástico	u	1
27	Tubo plástico de 1 1/2", flexível, transparente	m	1
28	Redução 1 1/4" x 1/2" , plástico	u	1
29	Tubo plástico de 1/2", rígido	m	0,39
30	Registro de gaveta de 1/2" , Fe. Fund.	u	1
31	Saida de 1/2", Fe. Fund.	u	1
32	Tubo plástico de 1/2", flexível, transparente	m	0,60
33	Tubo plástico de 1/2", flexível, transparente	m	1.55
34	Virola de 1/2", latão	u	1
35	"Caps" de 2" , plástico	u	1
36	Tubo plástico de 2" rígido	m	0,60
37	Niplo de 1 1/4", plástico	u	1
38	Tubo plástico de 1 1/2", flexível, transparente	m	1.60
39	Bomba B (vide apêndice E)	-	-
DETALHES			
A	Suporte da cuba		
B	Suporte da Bomba A		
C	Suporte do reservatório		
D	Reservatório elevado		
E	Cuba de infiltração		
F	Suporte da bomba B		
G	Sifão		

Figura 18.



to, com capacidade para 100 l.

3.5 - Accessórios

Complementando ainda a aparelhagem temos, ainda, - um sistema de medição estático formado pelas pontas de medição, - figura (9) para evitar o vasamento na bomba B, um voltímetro e um cronômetro.

O sistema de medição estático é constituído de pontas feitas em acrílico fixadas em cursores que correm em régua, ambos do mesmo material da ponta, às quais estão fixadas escalas de aço inoxidável de 30 cm. Utiliza-se para medir níveis estáticos. O voltímetro encontra-se acoplado ao transformador que regula a bomba B e tem por finalidade ratiificar a tensão. Finalmente, o cronômetro é importante no controle do período que se escolher.

Ao lado deste equipamento foram utilizados peneiradores, porosímetro e permeâmetro para confecção do meio e ensaios característicos. Utilizou-se, ainda, o computador - IBM 1130 para minimização dos cálculos. Foi ainda valioso o equipamento mecânico que nos facultou a construção desta aparelhagem.

3.6 - Preparo do modelo

Uma vez escolhido o meio poroso artificial consolidado, vantajoso por sua estrutura estável, em condições normais, e possuindo boa aderência com o material da cuba o que evitaria caminhos preferenciais, passamos à moldagem do mesmo.



Figura 19. Registrador.

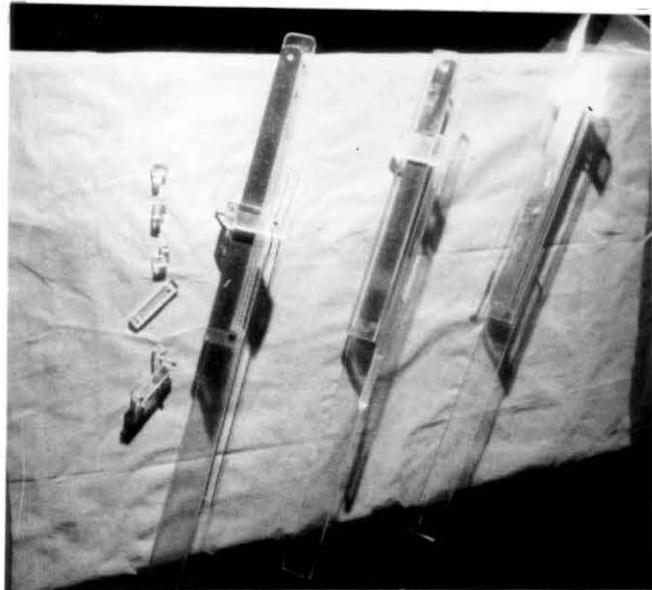


Figura 20 - Réguas de medição.

Na sua confecção utilizou-se areia, que, após - peneirada em faixas de granulometria adequada, foi lavada - e seca, posteriormente, em estufa; e cola do tipo Araldite. Foram utilizadas duas faixas de granulometria diferentes.

O preparo do meio heterogêneo se deu em duas fases. Na primeira, após o preparo de uma fôrma na cuba, - que iria dar ao meio o formato que se desejava, misturou-se areia de uma granulometria com Araldite, este na proporção de 5% em peso, até constituir uma massa homogênea. Esta - massa foi colocada na fôrma, em camadas de 3 cm. aproximadamente, que iam sendo compactadas com um socuete a medida que iam sendo depositadas. Após 24 h. de secagem, preparou-se a 2a fase, após a desformagem da 1a, tendo, agora, uma das faces laterais do meio já moldado como fôrma, e procedendo-se do mesmo modo com o 2º tipo de areia.

Da mesma forma com que era feito o modelo, eram - retiradas amostras em tubos plásticos de 1", para os ensaios de permeabilidade e porosidade.

O meio heterogêneo, após moldado tomou o aspecto da figura (21)

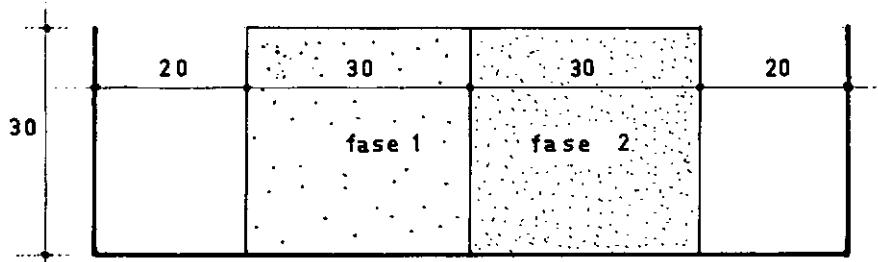


Figura 21 - Moldagem dos meios.

Na tabela (3) estão as características dos meios conseguidos.

Tabela 3 - Características do material.

TIPO	MATERIAL	$d_{gr\circ s}$ (mm)	PENEIRAS	DIMENSÕES (cm)	QUANTIDADE	ARALDITE
A	areia	2.0 - 1.19	10 - 16	30 x 30 x 10	16 kg	800 g
B	"	1.19 - 1.0	16 - 18	30 x 30 x 10	16 kg	800 g

As características físicas, da tabela 4, foram determinadas em ensaios de laboratório, transcritos no anexo - para as amostras retiradas.

Tabela 4 - Propriedades físicas do material.

Tipo	Perm. Geométrica	Porosidade
A	$1.80 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$	38,2 %
B	$0.95 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$	35.7 %

3.7 - Método empregado

Uma vez pronta a aparelhagem e o modelo, partimos para o estudo do efeito de um bombeamento periódico no meio, com os objetivos já definidos no item 1.1. Com o auxílio da bomba A e da torre de equilíbrio, fixamos o montante do meio uma condição de contorno constante para todos os ensaios e que, com o auxílio dos parafusos calantes, manteremos no correr dos mesmos. O líquido percola através do meio - heterogêneo, saindo a jusante.

Quando atingido o equilíbrio estático, escolhe-se uma vasão para a bomba B e imprime-se ao sistema uma pulsa-

ção, resultando em um desequilíbrio em que níveis máximo e mínimo se modificam a cada período, convergindo, porém, para valores constantes como se pode verificar, na figura (22) pelo gráfico plotado pelo registrador.

Chegando a este ponto de estabilização, cessamos o bombeamento e retiramos aqueles valores dos níveis máximo e mínimo, da vazão e período em que foram alcançados, fazendo, com eles, tabelas.

Normalmente, toma-se uma vazão determinada e aplica-se ao sistema uma variação periódica do tipo da figura (23) em que o período de bombeamento é igual ao período em que a bomba não funciona.

Os períodos e vazões foram escolhidos de acordo com as limitações da aparelhagem que trataremos a seguir.

O valor das alturas para $T = 0$ equivale àquelas encontradas em regime permanente para uma vazão igual à metade da vazão que se considera.

3.8 - Limitações do equipamento

Entre as dificuldades advindas do trabalho, ficamos limitados naturalmente no tocante à manutenção das variáveis período e vazão.

Fomos obrigados a tomar períodos múltiplos de 5, por ser de mais eficaz acompanhamento visual no cronômetro, já que é muito difícil manter-se divisões com outro tipo de fracionamento. A bomba B tinha sua curva de vazão alterada para bombeamentos muito longos, o que nos levou a limitar o pe-

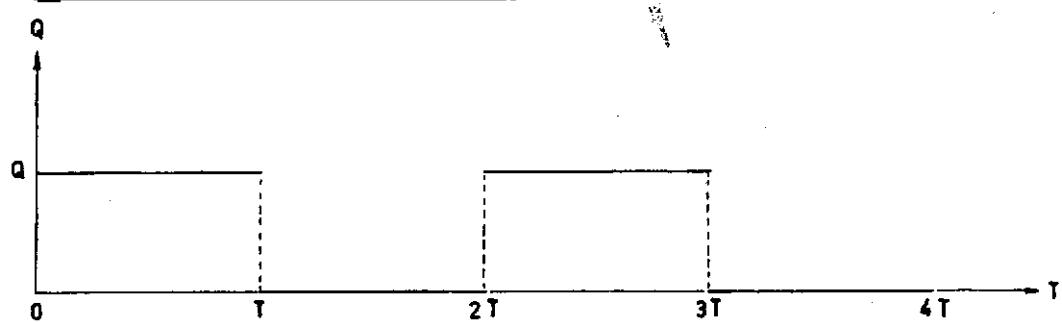
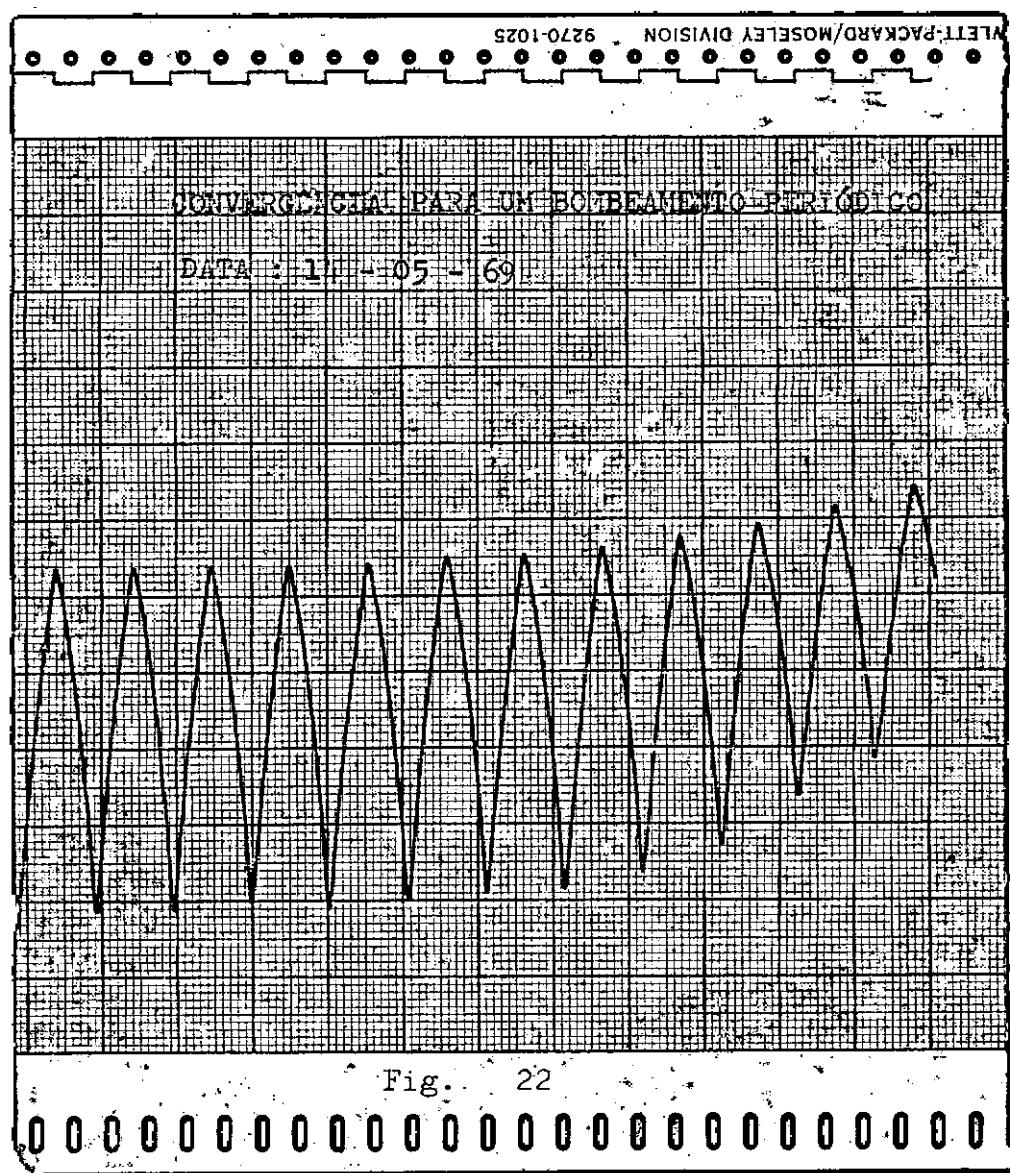


Fig. 23

ríodo máximo em 40 s. Esta alteração interna era acrescida pela variação da tensão da rede de alimentação, que chegava a mais de 5 volts na saída, o que, como podemos observar pela figura (37) no Anexo, chega a corresponder, principalmente para baixas tensões, a uma variação de vasão muito grande, de sorte que o controle através do voltímetro, colocado na saída do transformador da bomba, tinha que ser constante e cuidadosa.

Se observarmos novamente a figura (37), vemos que a vasão é limitada inferiormente pela tensão de 45 v onde ela tem o valor de $0,025 \text{ cm}^3/\text{s}$. Abaixo deste valor ela não funciona.

O valor da vasão é limitado superiormente pelo débito máximo que o meio admite sem que o nível mínimo seja menor que 0, para evitar incorrer em erros de leitura do nível máximo.

3.9 - Fluido utilizado

Finalmente, como líquido a utilizar, escolhemos a água filtrada, pois seria portadora de uma percentagem mínima de impurezas, que facultaria a condutividade, permitindo o uso da ponta elétrica.

IV : RESULTADOS

4.1 - Apresentação tabular dos resultados

Os valores obtidos, foram tabulados obedecendo aos seguintes princípios:

- a) O meio 1, de permeabilidade k_1 , será sempre o meio situado a montante, sujeito diretamente ao nível estático. Consequentemente, o meio 2, de permeabilidade k_2 será o situado a jusante, afetado diretamente pelo bombeamento periódico. figura (21).
- b) As tabelas serão apresentadas por vasão tomada, variando-se o período, à exceção do primeiro valor que será o correspondente à vasão média.
- c) Nelas também estarão representados os valores de ΔH que equivalem à diferença $H_{max} - H_{min}$

Unidades

$$\begin{aligned} Q &= l/s & H_{max}, H_{min}, \Delta H &= \text{cm.} \\ T &= s \end{aligned}$$

Para uma comparação com a teoria foram calculados - valôres pela fórmula de Dupuit (2-12), apresentados na tabela (35) para $K = k_{min} = 0,95 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$.

4.2 - Apresentação gráfica do resultado

Após as tabelas apresentamos os resultados dispostos em gráfico.

Para representar as variáveis escolhidas, utilizamos o gráfico relação vasão x ΔH , por dispor de mais pontos o que viria a facilitar um ajuste.

Os gráficos encontram distribuidos da figura(24) - até afigura (28), inclusives.

**DOCUMENTO
ILEGIVEL**

TABELA 5

VALORES ENCONTRADOS PARA K1 < K2

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	Δ H
0.015	0	29.20	25.20	0.00
0.030	5	25.20	24.85	0.35
0.030	10	25.20	24.50	0.70
0.030	15	25.10	24.10	1.00
0.030	20	25.20	23.80	1.40
0.030	25	25.30	23.60	1.70
0.030	30	25.40	23.30	2.10
0.030	40	25.75	23.00	2.75

**DOCUMENTO
ILEGIVEL**

TABELA 6

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.017	0	29.20	24.40	0.00
0.035	5	24.70	24.30	0.40
0.035	10	24.30	23.50	0.80
0.035	15	24.45	23.25	1.20
0.035	20	24.60	23.10	1.50
0.035	25	24.75	22.75	2.00
0.035	30	24.80	22.40	2.40
0.035	40	25.20	22.00	3.20

DOCUMENTO
ILEGIVEL

TABELA 7

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.020	0	29.20	23.30	0.00
0.040	5	24.00	23.60	0.40
0.040	10	23.90	23.00	0.90
0.040	15	24.10	22.70	1.40
0.040	20	23.90	22.10	1.80
0.040	25	24.40	22.10	2.30
0.040	30	24.20	21.40	2.80
0.040	40	24.80	21.10	3.70

DOCUMENTO
ILEGIVEL

TABELA 8

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.022	0	29.20	22.60	0.00
0.045	5	22.80	22.30	0.50
0.045	10	22.90	21.90	1.00
0.045	15	22.90	21.40	1.50
0.045	20	23.00	21.00	2.00
0.045	25	23.20	20.70	2.50
0.045	30	23.40	20.40	3.00
0.045	40	23.90	19.90	4.00

TABELA 9

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.025	0	29.20	21.60	0.00
0.050	5	22.25	21.70	0.55
0.050	10	22.20	21.10	1.10
0.050	15	22.20	20.55	1.65
0.050	20	22.40	20.20	2.20
0.050	25	22.60	19.80	2.80
0.050	30	22.90	19.60	3.30
0.050	40	23.30	18.80	4.50

TABELA 10

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.027	0	29.20	20.90	0.00
0.055	5	21.00	20.40	0.60
0.055	10	21.05	19.85	1.20
0.055	15	21.20	19.40	1.80
0.055	20	21.40	19.00	2.40
0.055	25	21.80	18.70	3.10
0.055	30	22.00	18.30	3.70
0.055	40	22.40	17.50	4.90

DOCUMENTO
ILEGIVEL

TABELA 11

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.030	0	29.20	19.80	0.00
0.060	5	20.15	19.45	0.70
0.060	10	20.30	18.90	1.40
0.060	15	20.40	18.30	2.10
0.060	20	20.60	17.80	2.80
0.060	25	20.80	17.30	3.50
0.060	30	21.00	16.80	4.20
0.060	40	21.70	16.10	5.60

TABELA 12

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.032	0	29.20	19.00	0.00
0.065	5	19.90	19.15	0.75
0.065	10	19.75	18.20	1.55
0.065	15	19.40	17.20	2.20
0.065	20	19.80	16.80	3.00
0.065	25	20.00	16.20	3.80
0.065	30	20.10	15.50	4.60
0.065	40	21.00	15.00	6.00

DOCUMENTO
ILEGIVEL

TABELA 13

VALORES ENCONTRADOS PARA K1 < K2

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	Δ H
0.035	0	29.20	17.90	0.00
0.070	5	18.50	17.70	0.80
0.070	10	18.50	16.90	1.60
0.070	15	18.30	15.90	2.40
0.070	20	18.70	15.40	3.30
0.070	25	19.10	15.00	4.10
0.070	30	19.30	14.40	4.90
0.070	40	19.90	13.40	6.50

TABELA 14

VALORES ENCONTRADOS PARA K1 < K2

VASAC	PERIODO	H MAX	H MIN	Δ H
0.037	0	29.20	16.40	0.00
0.075	5	16.90	16.05	0.85
0.075	10	16.80	15.10	1.70
0.075	15	17.00	14.40	2.60
0.075	20	17.00	13.60	3.40
0.075	25	17.40	13.10	4.30
0.075	30	18.20	13.00	5.20
0.075	40	18.70	11.80	6.90

TABELA 15

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.040	0	29.20	15.00	0.00
0.080	5	15.80	14.90	0.90
0.080	10	15.20	13.40	1.80
0.080	15	15.50	12.80	2.70
0.080	20	15.80	12.20	3.60
0.080	25	16.30	11.80	4.50
0.080	30	16.00	10.50	5.50
0.080	40	16.80	9.30	7.50

TABELA 16

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.042	0	29.20	12.70	0.00
0.085	5	12.80	11.85	0.95
0.085	10	12.80	10.80	2.00
0.085	15	13.10	10.00	3.10
0.085	20	13.30	9.30	4.00
0.085	25	13.60	8.60	5.00
0.085	30	13.90	7.90	6.00
0.085	40	14.85	6.60	8.25

TABELA 17

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.045	0	29.20	11.00	0.00
0.090	5	10.20	9.20	1.00
0.090	10	10.30	8.20	2.10
0.090	15	10.40	7.20	3.20
0.090	20	10.80	6.40	4.40
0.090	25	11.35	6.00	5.35
0.090	30	12.15	5.60	6.55
0.090	40	12.60	3.80	8.80

TABELA 18

VALORES ENCONTRADOS PARA $\nu_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.047	0	29.20	9.30	0.00
0.095	5	9.50	8.40	1.10
0.095	10	9.60	7.40	2.20
0.095	15	8.70	5.40	3.30
0.095	20	8.10	3.60	4.50
0.095	25	7.80	2.20	5.60
0.095	30	-	-	-
0.095	40	-	-	-

TABELA 19

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 < K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	I MIN	ΔH
0.050	0	29.20	7.20	0.00
0.100	5	7.30	6.20	1.10
0.100	10	6.40	4.00	2.40
0.100	15	5.40	1.90	3.50
0.100	20	-	-	-
0.100	25	-	-	-
0.100	30	-	-	-
0.100	40	-	-	-

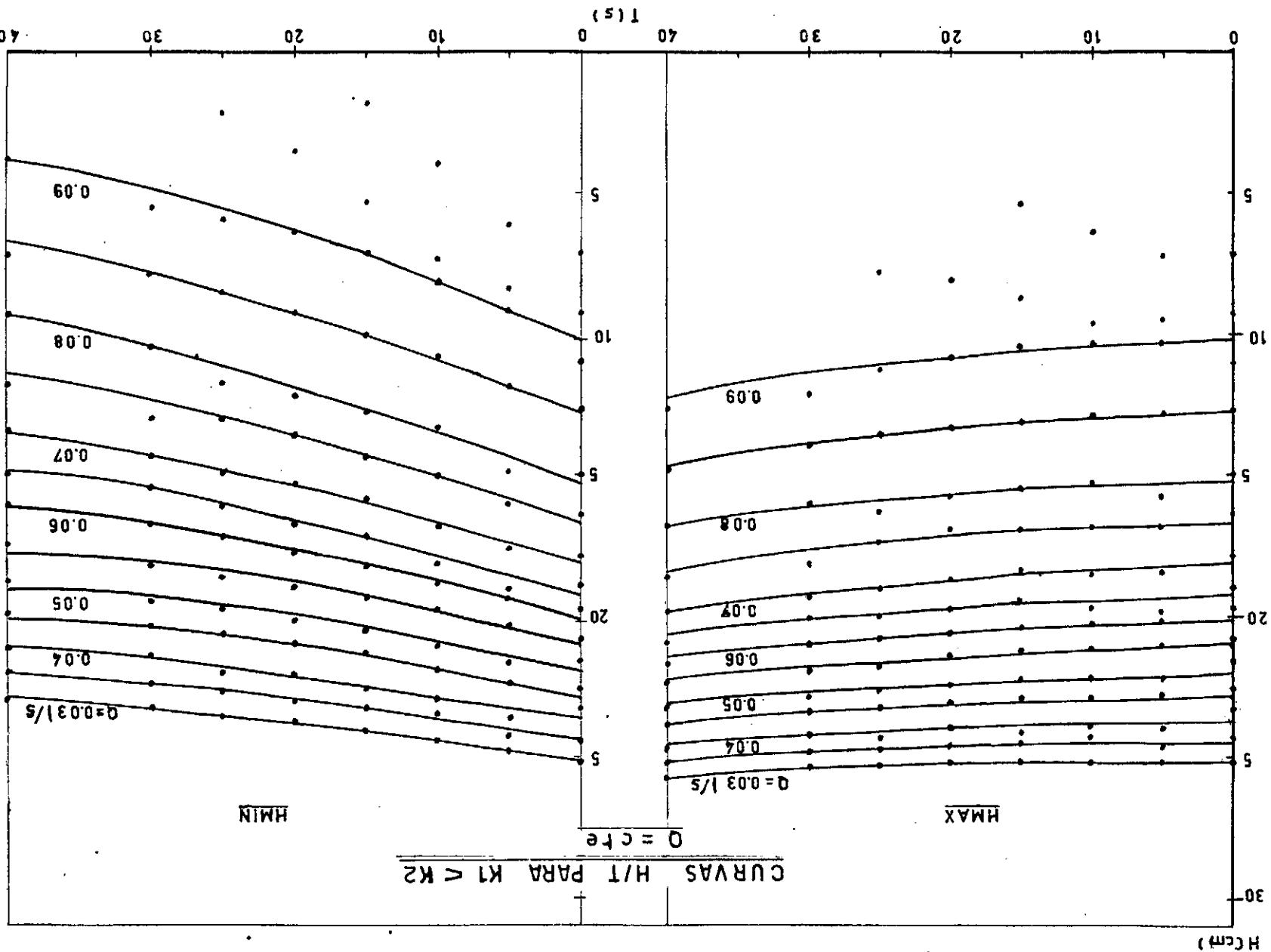


Figura 24.

DOCUMENTO
ILEGIVEL

TABELA 20

VALORES ENCONTRADOS PARA K1 > K2

VASAO	PERÍODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.015	0	29.20	25.45	0.00
0.030	5	25.60	25.40	0.20
0.030	10	25.50	24.90	0.60
0.030	15	25.30	24.30	1.00
0.030	20	25.40	24.00	1.40
0.030	25	25.50	23.70	1.80
0.030	30	25.60	23.40	2.20
0.030	40	25.80	22.50	3.30

TABELA 21

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.017	0	29.20	24.80	0.00
0.035	5	25.00	24.60	0.40
0.035	10	24.80	24.00	0.80
0.035	15	24.60	23.40	1.20
0.035	20	24.70	23.10	1.60
0.035	25	24.80	22.80	2.00
0.035	30	24.90	22.40	2.50
0.035	40	25.15	21.90	3.25

TABELA 22

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERÍODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.020	0	29.20	24.00	0.00
0.040	5	24.30	23.90	0.40
0.040	10	24.20	23.30	0.90
0.040	15	24.00	22.70	1.30
0.040	20	24.20	22.40	1.80
0.040	25	24.30	22.00	2.30
0.040	30	24.30	21.55	2.75
0.040	40	24.50	20.80	3.70

TABELA 23

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.022	0	29.20	23.20	0.00
0.045	5	23.80	23.30	0.50
0.045	10	23.50	22.60	0.90
0.045	15	23.40	21.90	1.50
0.045	20	23.40	21.40	2.00
0.045	25	23.30	20.80	2.50
0.045	30	23.40	20.30	3.10
0.045	40	24.00	19.50	4.50

TABELA 24

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERÍODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.025	0	29.20	22.30	0.00
0.050	5	22.60	22.00	0.60
0.050	10	22.40	21.30	1.10
0.050	15	22.50	20.90	1.60
0.050	20	22.50	20.30	2.20
0.050	25	22.70	19.80	2.90
0.050	30	22.90	19.30	3.60
0.050	40	23.40	18.70	4.70

TABELA 25

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERÍODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.027	0	29.20	21.50	0.00
0.055	5	21.60	20.95	0.65
0.055	10	21.40	20.00	1.40
0.055	15	21.30	19.30	2.00
0.055	20	21.75	19.15	2.60
0.055	25	21.90	18.60	3.30
0.055	30	22.05	18.15	3.90
0.055	40	22.50	17.20	5.30

TABELA 26

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.030	0	29.20	20.30	0.00
0.060	5	20.50	19.80	0.70
0.060	10	20.40	19.00	1.40
0.060	15	20.50	18.40	2.10
0.060	20	20.60	17.70	2.90
0.060	25	20.80	17.10	3.70
0.060	30	21.00	16.60	4.40
0.060	40	21.60	15.80	5.80

**DOCUMENTO
ILEGIVEL**

TABELA 27

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.032	0	29.20	18.50	0.00
0.065	5	18.90	18.10	0.80
0.065	10	19.00	17.40	1.60
0.065	15	18.80	16.40	2.40
0.065	20	19.10	15.90	3.20
0.065	25	19.20	15.20	4.00
0.065	30	19.70	14.90	4.80
0.065	40	20.20	13.80	6.40

DOCUMENTO
ILEGIVEL

TABELA 28

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERÍODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.035	0	29.20	17.50	0.00
0.070	5	17.80	16.90	0.90
0.070	10	18.00	16.20	1.80
0.070	15	17.90	15.20	2.70
0.070	20	18.10	14.50	3.60
0.070	25	18.30	13.90	4.40
0.070	30	18.60	13.30	5.30
0.070	40	19.30	12.20	7.10

DOCUMENTO
ILEGIVEL

TABELA 29

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.037	0	29.20	16.50	0.00
0.075	5	16.60	15.70	0.90
0.075	10	16.70	14.80	1.90
0.075	15	16.75	13.85	2.90
0.075	20	16.90	13.10	3.80
0.075	25	17.10	12.40	4.70
0.075	30	17.30	11.70	5.60
0.075	40	18.00	10.55	7.45

DOCUMENTO
ILEGIVEL

TABELA 30

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERÍODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.040	0	29.20	15.00	0.00
0.080	5	15.60	14.60	1.00
0.080	10	15.40	13.40	2.00
0.080	15	15.70	12.60	3.10
0.080	20	15.80	11.80	4.00
0.080	25	15.90	10.90	5.00
0.080	30	16.10	10.10	6.00
0.080	40	16.80	8.80	8.00

TABELA 31

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERÍODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.042	0	29.20	13.80	0.00
0.085	5	14.60	13.50	1.10
0.085	10	14.30	12.10	2.20
0.085	15	14.50	11.20	3.30
0.085	20	14.70	10.30	4.40
0.085	25	15.00	9.60	5.40
0.085	30	15.30	8.80	6.50
0.085	40	15.70	6.90	8.80

DOCUMENTO
ILEGIVEL

TABELA 32

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERÍODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.045	0	29.20	12.00	0.00
0.090	5	12.60	11.40	1.20
0.090	10	12.50	10.10	2.40
0.090	15	13.00	9.50	3.50
0.090	20	13.40	8.80	4.60
0.090	25	13.80	8.10	5.70
0.090	30	14.00	7.20	6.80
0.090	40	14.60	5.60	9.00

TABELA 33

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERIODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.047	0	29.20	10.50	0.00
0.095	5	10.60	9.40	1.20
0.095	10	10.60	8.20	2.40
0.095	15	10.50	6.90	3.60
0.095	20	10.40	5.60	4.80
0.095	25	10.70	4.80	5.90
0.095	30	11.30	4.10	7.20
0.095	40	11.70	2.10	9.60

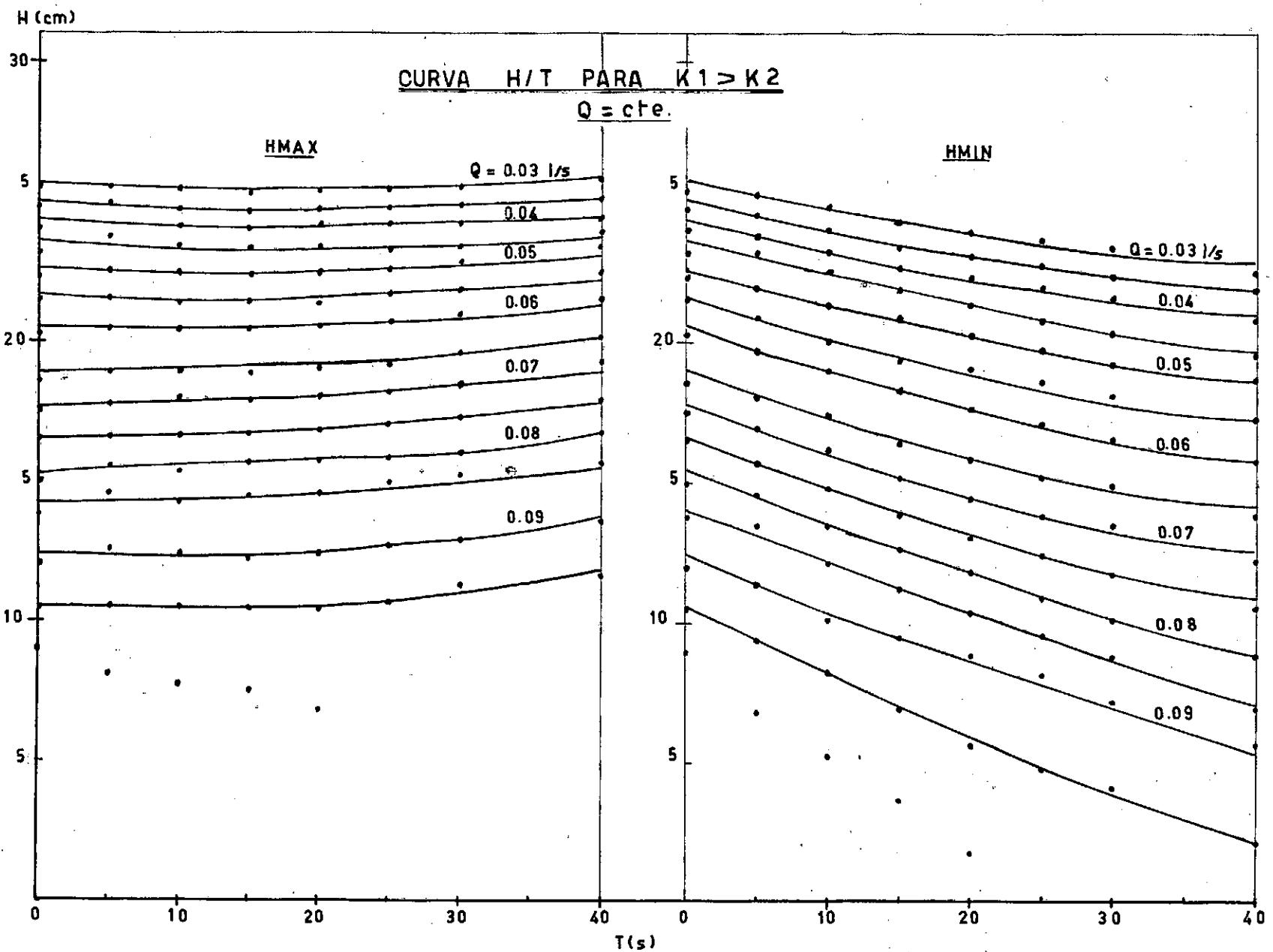
DOCUMENTO
ILEGIVEL

TABELA 34

VALORES ENCONTRADOS PARA $K_1 > K_2$

VASAO	PERÍODO	H MAX	H MIN	ΔH
0.050	0	29.20	9.00	0.00
0.100	5	8.00	6.70	1.30
0.100	10	7.80	5.20	2.60
0.100	15	7.60	3.70	3.90
0.100	20	6.80	1.80	5.00
0.100	25	-	-	-
0.100	30	-	-	-
0.100	40	-	-	-

Figura
25.



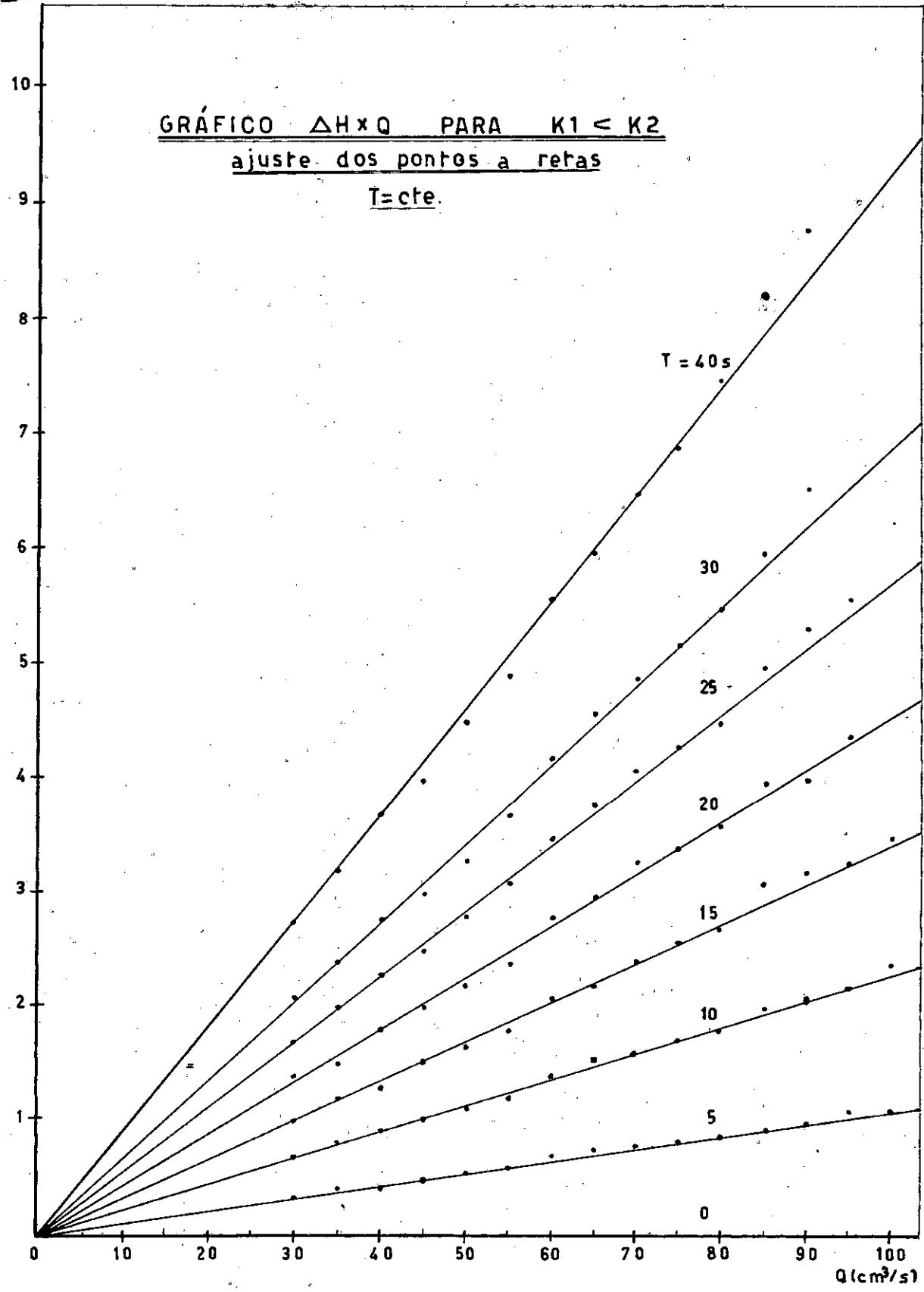
ΔH (cm).

Figura 26.

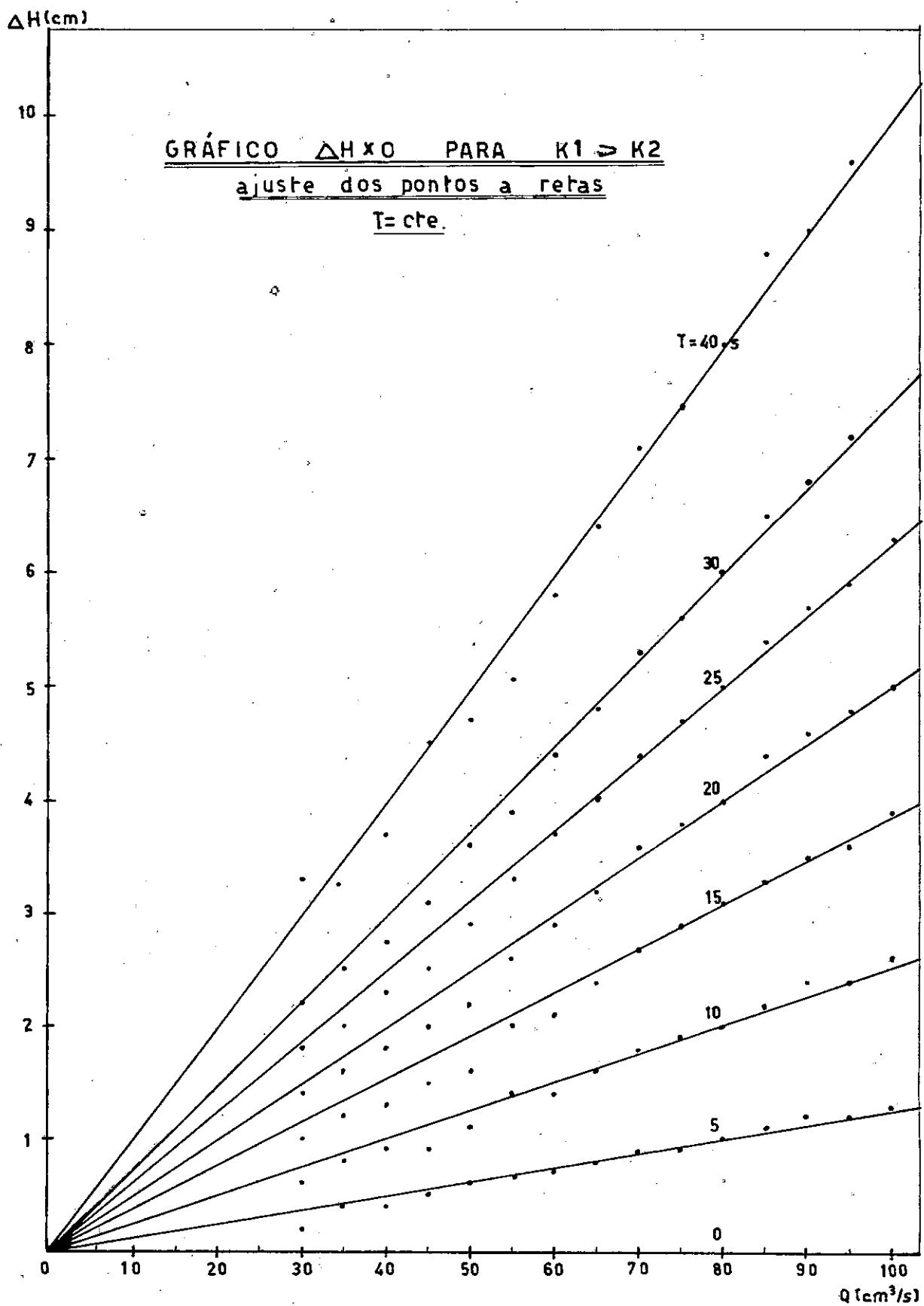


Figura 27.

**DOCUMENTO
ILEGIVEL**

TABELA 35

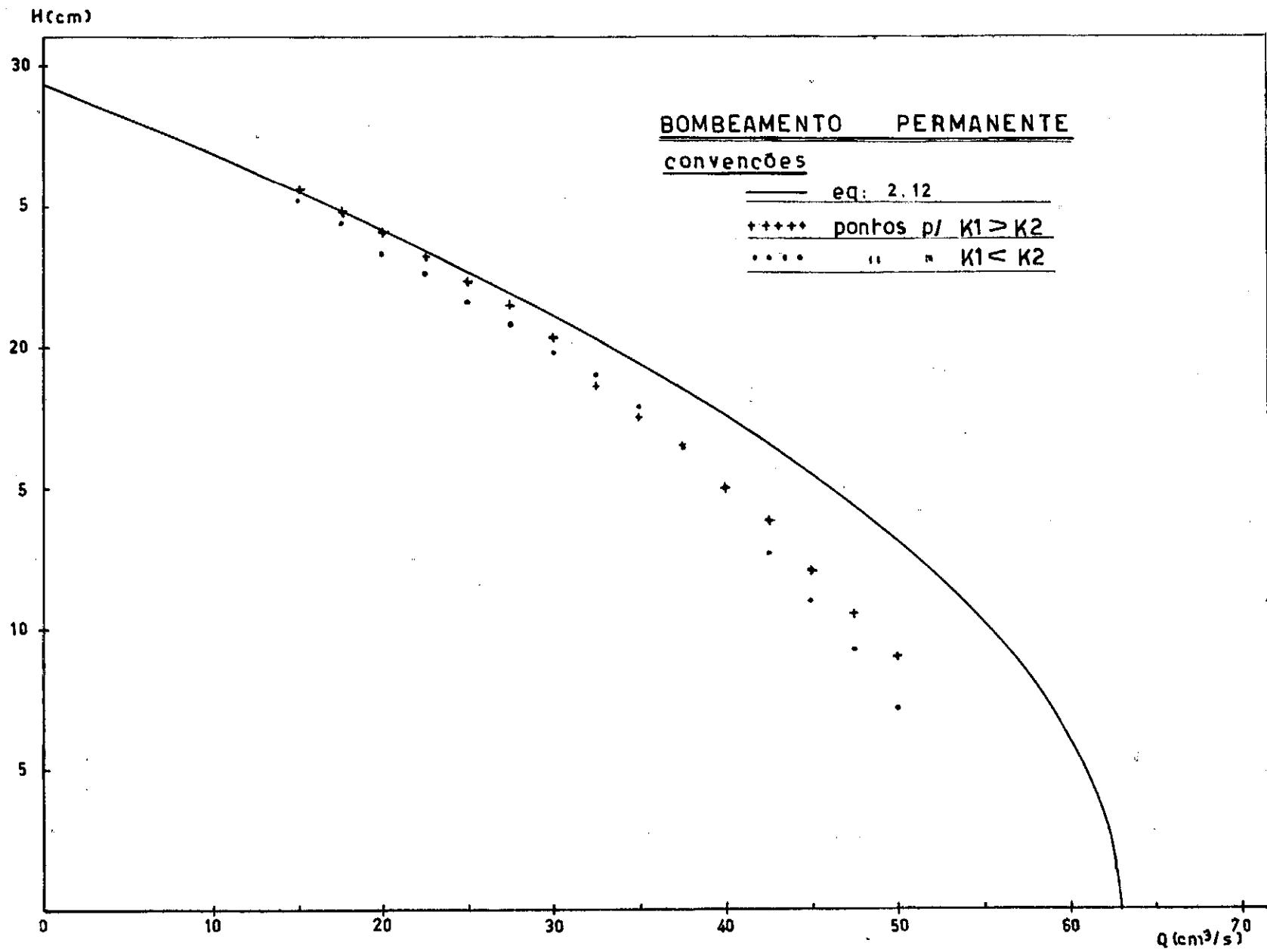
VALORES DAS VASOES PARA A CURVA DE DUPUIT

H 1	H 2	VASAO
29.20	29.20	0.00
29.20	29.00	0.85
29.20	28.00	5.05
29.20	27.00	9.09
29.20	26.00	12.99
29.20	25.00	16.74
29.20	24.00	20.35
29.20	23.00	23.81
29.20	22.00	27.12
29.20	21.00	30.28
29.20	20.00	33.30
29.20	19.00	36.17
29.20	18.00	39.89
29.20	17.00	41.46
29.20	16.00	43.89
29.20	15.00	46.17
29.20	14.00	48.31
29.20	13.00	50.29
29.20	12.00	52.13

DOCUMENTO
ILEGIVEL

H 1	H 2	VASAO
29.20	11.00	53.83
29.20	10.00	55.37
29.20	9.00	56.77
29.20	8.00	58.02
29.20	7.00	59.12
29.20	6.00	60.03
29.20	5.00	60.89
29.20	4.00	61.55
29.20	3.00	62.07
29.20	2.00	62.43
29.20	1.00	62.65
29.20	0.00	62.73

Figura 28.



V - DISCUSSÃO

5.1 - Observações no meio poroso.

Durante os ensaios foram feitos as seguintes observações no meio poroso:

- a) Para as vasões de até 0.07 l/s, a perturação atravessa o meio nos períodos de 10 e 15 s. Acima deste valor, isto ocorre nos períodos de 10 s.
- b) O bombeamento pouco influencia o perfil da superfície livre no meio 1, considerando-se as figuras (29) e (30). A variação observável ocorre, praticamente no meio 2.
- c) A superfície de surgência altera-se muito pouco durante um bombeamento, para o mesmo período e vasão.

5.2 - Observações nos resultados

Após a leitura dos valores e seu lançamento em gráfico, foi constatado o seguinte:

- a) A variação dos valores máximos eram menores que a dos mínimos, em relação aos valores precedentes

$$\Delta H_{\max}{}_{10-5} < \Delta H_{\min}{}_{10-5}$$

- b) Os valores máximos incrementam de valores mais elevados em relação ao anterior, ao passo que os mínimos decrementam - menor rapidamente.

$$\Delta H_{\max}{}_{10-5} < \Delta H_{\max}{}_{15-10}$$

$$\Delta H_{\min}{}_{10-5} > \Delta H_{\min}{}_{15-10}$$

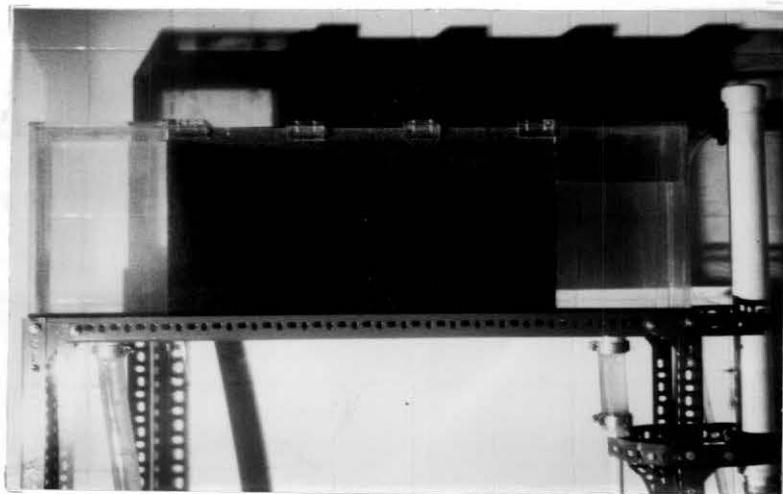


Figura 29 - Nível máximo de um bombeamento periódico.

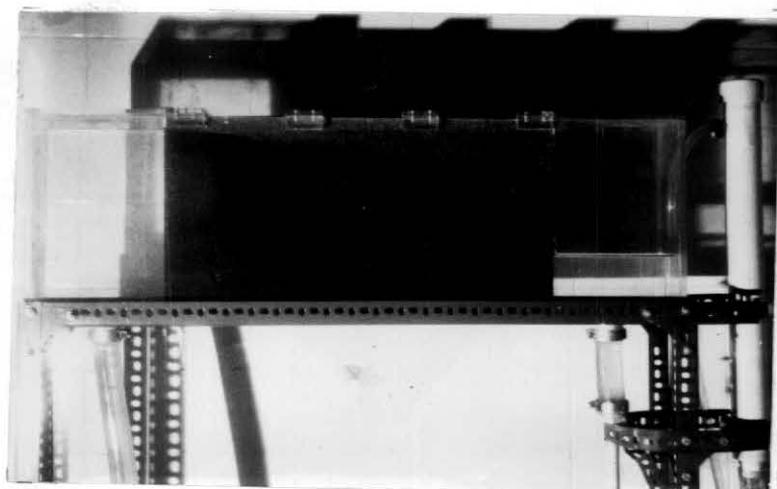


Figura 30 - Nível mínimo de um bombeamento periódico.

- c) Os níveis máximos, em grande parte dos casos, decrescem do bombeamento em período de 5s para o de 10s para, posteriormente, subir de valor.

$$H_{max} - 5 > H_{max} 10$$

- d) A variação da altura (ΔH) considerando-se a vasão constante, é sensivelmente proporcional ao período.
- e) Esta mesma variação, plotada em função do período constante, acusou uma elevada proporcionalidade para com a vasão.
- f) Os valores adimensionais $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}$ se distribuiram em uma faixa, encontrando-se muito misturados, de modo que tornou-se impossível uma individualização.
- g) Os valores encontrados em regime permanente se dispunham inferiormente à curva de Dupuit para a menor permeabilidade.
- h) Estes valores se mostravam, na maioria das vezes, superiores no caso de $K_1 > K_2$ aos de $K_1 < K_2$.

5.3 - Deduções e comentários

Nos abstrairemos de comentar fatos ocorridos no interior do meio poroso, pois só possuímos informações visuais, não se dispondo de meios para verificar diversas influências como a da capilaridade, por ficar fora do objetivo da pesquisa.

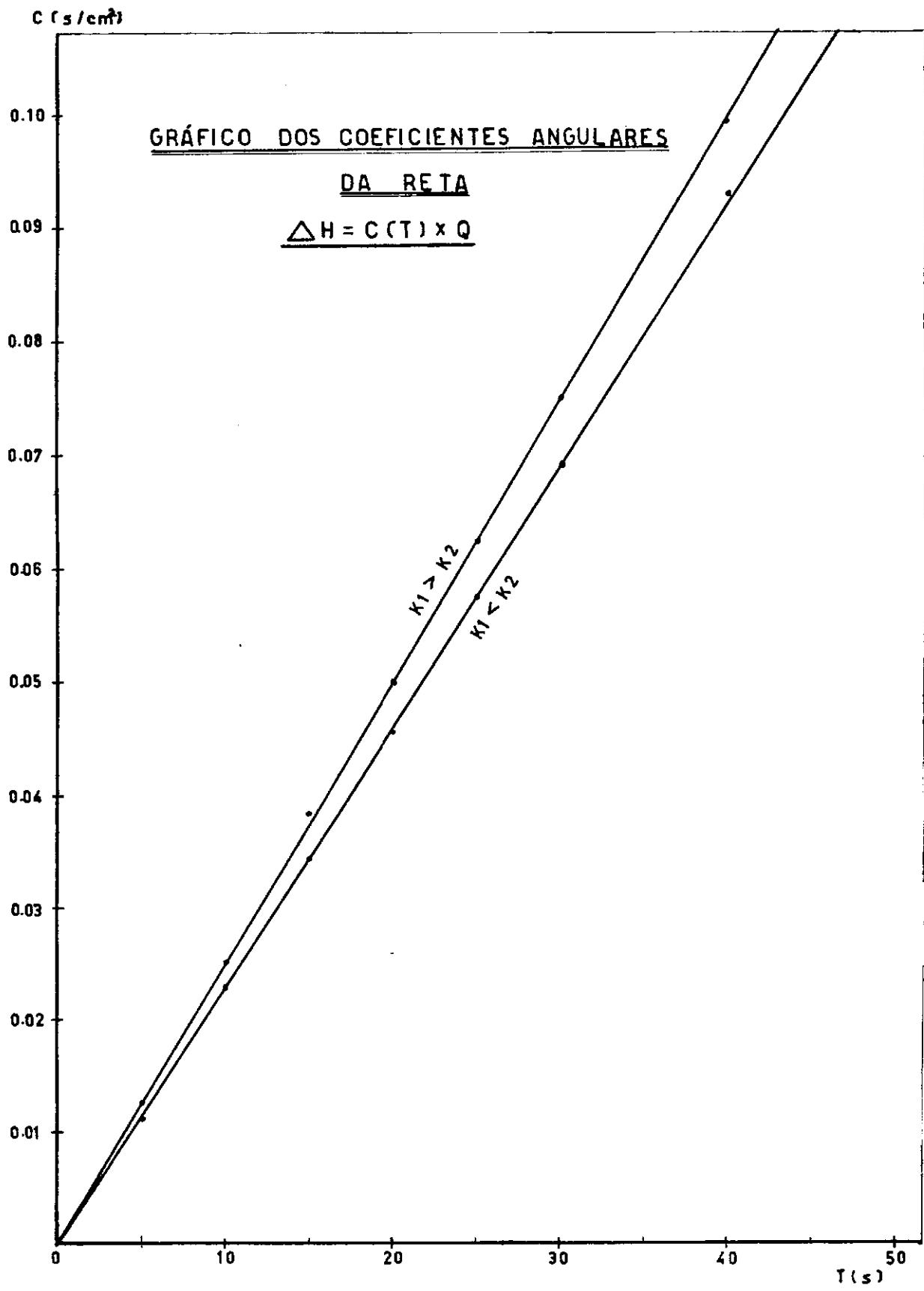


Figura . 31.

No meio poroso, a vasão surgente vai aumentando à medida que cresce o gradiente de potencial do meio ($\Delta H / \Delta L$). Desta maneira, a vasão constante com que é feito o bombeamento, vai encontrando uma oposição cada vez maior do meio, de maneira que o nível mínimo tenderá, lógicamente, para períodos muito levados, a um valor constante. Esta estabilização do nível mínimo vai acarretar, por sua vez, um incremento consecutivamente maior no nível máximo, embora deva decrescer posteriormente e tender este nível também para um limite, que deverá ser igual ao nível de montante.

Referentemente ao item c, pode-se atribuir esta queda de altura máxima ao fato de a perturbação haver atravessado o meio 2 e sua ação se fazer sentir no meio 1 e, posteriormente, no reservatório à montante. Como o nível a montante não varia, os valores recomeçam sua ascensão.

A verificação da proporcionalidade entre os valores encontrados de ΔH a vasão Q e o período T , levou-nos a procurar estabelecer uma função que descrevesse o fenômeno usando ΔH como variável dependente.

Assim, uma vez ajustados os pontos das figuras 26 e - 27 a retas, podemos escrever que:

$$\Delta H = C(T) \times Q.$$

Com base nos gráficos calculamos os valores de $C(T)$ - para os dois casos, que dispuzemos na tabela (36)

Tabela 36 - Valores dos coeficientes das retas
 $\Delta H = f(Q)$

T (s)	C (s/cm ²)	
	K ₁ < K ₂	K ₁ > K ₂
5	0.0112	0.0126
10	0.0230	0.0252
15	0.0346	0.0387
20	0.0457	0.0502
25	0.0575	0.0625
30	0.0695	0.0752
40	0.0932	0.0998

Estes valores foram dispostos na figura(31) em função do período e confirmou-nos a linearidade dos valores que foram ajustados a retas dando, às equações seguintes valores, considerando-se:

$$\text{Eq. geral: } \Delta H = C_1 \times T \times Q$$

$$[C_1] = L^{-2}$$

Para nosso caso temos:

$$U.Q = \text{cm}^3/\text{s}$$

$$U.T = \text{s}$$

$$U.\Delta H = \text{cm}$$

$$U.C_1 = \text{cm}^{-2}$$

a) Para $K_1 < K_2$

$$\Delta H_1 = 0,00233 \times T \times Q$$

b) Para $K_1 > K_2$

$$\Delta H_2 = 0,00250 \times T \times Q$$

Estas equações justificam o fato dos valores adimensionais $\Delta H_1 / \Delta H_2$ haverem dado misturados e sua variação é facilmente explicável considerando-se os erros de leitura que acarreta uma flutuação em torno da média.

No tocante ao ítem g, a não padronização do preparo dos meios artificiais, pode chegar a acarretar uma diferença de permeabilidade entre meio e amostra causando o desvios dos pontos da linha de Dupuit, pois não se pode afirmar que ambos possuam exatamente a mesma permeabilidade e sim aproximadamente, acrescido de que as constantes para aplicação da fórmula de Dupuit, haverem sido retiradas de tabelas que retratam condições ideais que, na prática, se confirmam mais ou menos. Além destes fatos, não está totalmente afastada a hipótese de colimatagem, apesar das precauções tomadas, nem ainda possui-se estudos sobre a variação da permeabilidade com o tempo e temperatura e a relação água/meio poroso artificial, Por outro lado, pode-se verificar que os pontos encontrados podem ser ajustados a um perfil de approximado ao de Dupuit, para ambos os casos.

VI - CONCLUSÃO

6.1 - Conclusões

Baseados nos fatos expostos no capítulo precedente podemos concluir que:

1 - É perfeitamente possível a distinção em um meio heterogêneo dos casos em que uma permeabilidade maior esteja a montante da menor e seu recíproco, com um bombeamento periódico.

2 - Meios heterogêneos que possuem a parte permeável sob a ação direta do bombeamento, apresenta valores da variação de altura inferiores ao caso em que esta ação ocorre diretamente sobre o menos permeável.

3 - Para o tipo de bombeamento em questão, figura (23), estas variações de altura dispõem-se como função linear do período e da vazão podendo ser escritas em uma forma geral:

$$\Delta H = C \times Q \times T$$

em que C tem a dimensão L^{-2}

4 - Para períodos muito elevados, os valores de H tendem para uma constante. A altura máxima converge para o valor do nível estático à montante enquanto que a mínima converge para o equivalente ao alcançado pela vazão em regime permanente.

A figura (32) ilustra esta afirmativa.

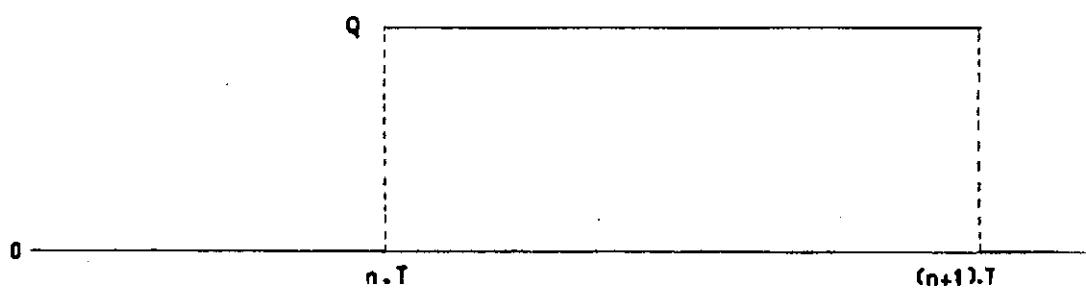
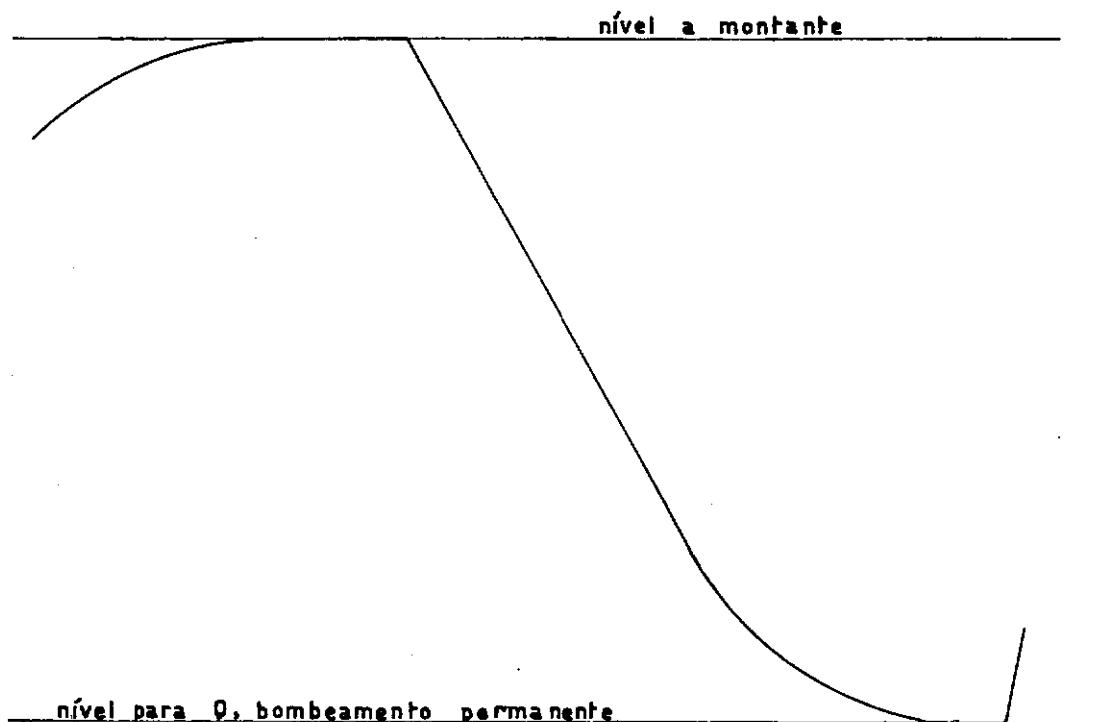
GRÁFICO PROVÁVEL PARA T MUITO GRANDE

Figura 32.

VII - SUGESTOES

Aqui, anotamos algumas sugestões acarretadas por - dificuldades surgidas durante a pesquisa e que visam facilitar futuros trabalhos:

- 1) Padronização da confecção dos meios porosos artificiais, - através de ensaios que, para determinada granulometria, - quantidade de aglutinante e modo de prepará-los, identifiquem o mesmo através, principalmente, da permeabilidade e porosidade.
- 2) Uso de um medidor de vazão na saída da bomba B e para sua alimentação um transformador estabilizado.
- 3) Um estudo mais acurado da ponta elétrica de medição para a determinação da tensão de trabalho ótima, assim como, um - sistema sensível.
- 4) Estudar um meio de se alterar o sentido do bombeamento sem maiores trabalhos.
- 5) Estudar outro tipo de configuração tal como uma disposição em camadas fig.: (33)

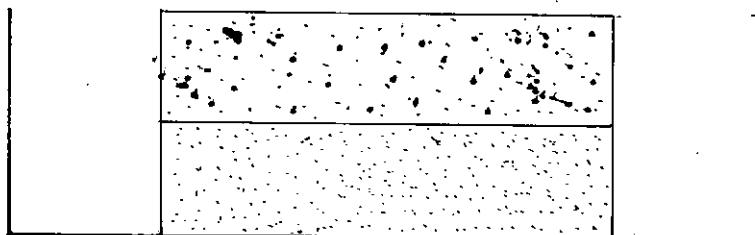


Fig. (33) - Camadas heterogêneas.

BIBLIOGRAFIA

- HARR, M. E. - "Groundwater and Seepage", Mc Graw-Hill,
 - 1962.
- THIRRIOT, C - "Quelques suggestions pour l'étude des nappes en Milieux hétérogènes ou stratifiés"
- SCHNEEBELI, G - "Hydraulique Souterraine", Eyrolles, Paris, 1966 -
- CHAPMANN, T. G. - "Capillary Effects in a two-dimensional ground-water flow system", Géotechnique - Vol X, 55-61, 1960.
- POLUBARINOVA - KOCHINA, P. Ya - "Theory of ground-water movement", Princeton, -
 - 1962 -
- SCOTT, R.F. - "Principles of Soil Mechanics", Addison - Wesley - Massachussets, 1965.
- BEAR, J. - "Scales of Viscous Analogy Models for ground-water studies", Journal of the Hydraulics Division, HY 2, 11-23, 1960.

APÊNDICE A

Determinação da Permeabilidade

O ensaio para a determinação do coeficiente de permeabilidade, foi feito utilizando-se a lei de Darcy e um permeâmetro (figura (33)) que usa como fluido, o ar.

É constituído por um compressor (A), de um rotâmetro (B), destinado a medir a vasão do fluido, de um suporte (c) - no qual se coloca o corpo de prova (E), e um manômetro a água (D) para medir as variações em mm. c. a.

O conjunto funciona da seguinte maneira: Regula-se - no compressor uma vasão que será lida no rotâmetro. Ao passar pelo meio porosom haverá uma perda de carga entre os extremos do corpo de prova que será lida, com o auxílio de um catetômetro (F) para melhor precisão, no manômetro e, com isto teremos uma série de pares de valôres vasão - diferença de pressão.

Com êstes dados, constantes da tabela (37), transformado já em gradiente de pressão, plotamos as retas constantes da figura (36), contra a velocidade. A fórmula usada foi:

$$V = K_g \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad \text{em que:}$$

$$K_g = \frac{P}{\mu_{ar}} \quad P = \text{permeabilidade geométrica - do meio (cm)}$$

$$\Delta p = \bar{\omega} \cdot \Delta H \quad K = \text{permeabilidade relativa ao ar.}$$

$$V = \frac{Q}{S} \quad \mu_{ar} = \text{viscosidade dinâmica do ar}$$

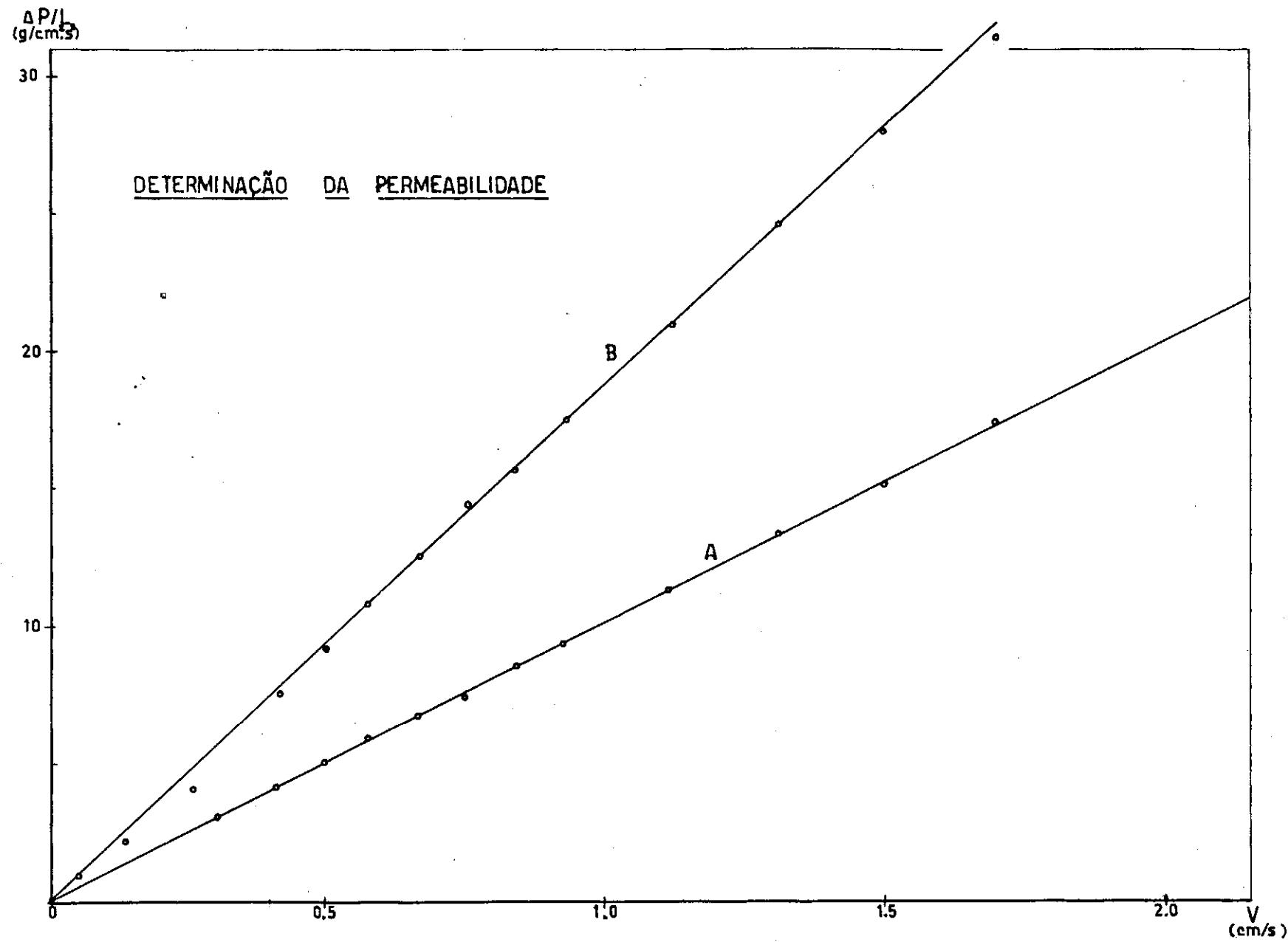
$$\bar{\omega} = \text{pêso específico da água.}$$

TABELA 37

Valores encontrados no ensaio de Permeabilidade

Velocidade (cm/s)	$\Delta p/l$ (g/cm ² . s ²)	
	A	B
0	0	0
0.053	-	0.955
0.140	-	2.184
0.261	-	4.101
0.306	3.139	-
0.412	4.185	7.462
0.495	4.970	9.104
0.595	5.821	10.700
0.663	6.605	12.446
0.751	7.325	14.349
0.840	8.502	15.500
0.928	9.208	17.324
1.120	11.282	20.823
1.310	13.211	24.453
1.505	14.977	27.723
1.700	17.266	31.111

Figura
36.



APÊNDICE B

Ensaio de porosidade.

Para o ensaio de porosidade emprega-se um porosímetro - constante da figura (35). Ele consta essencialmente de um sistema de dois vasos comunicantes (A) e (B), associados a um capilar (C) e de uma bomba de vácuo. Controlando este sistema estão 3 torneiras (T_1), (T_2) e (T_3), que permitem a passagem do fluido de um vaso para outro ou destes para o exterior. O funcionamento se faz da seguinte maneira.

Com o sistema formado por (A), (B), (C), (T_1) e (T_2), com (T_3) fechada e (T_1) aberta colocamos água destilada, em uma altura suficiente para cobrir a amostra, e, ao ser atingido o equilíbrio estático, fixamos o nível em (C) com um catetômetro. A seguir, fechamos (T_1), e abrindo (T_2) retirando a água de (A) e a colocamos em (B). Após a operação, colocamos em (A) a amostra e adaptamos nela a cúpula (D).

Nesta situação, fechamos também (T_2) e abrimos (T_3) por onde, com auxílio da bomba de vácuo, retiramos o ar do recipiente (A) - (D) e da amostra. Devemos prevenir previamente a possibilidade de entrada ou saída de ar através das torneiras. Após isto fechamos (T_3) e abrimos (T_1) fazendo a pressão atmosférica com que a água passe do recipiente (B) para o conjunto - (A)-(D), cobrindo a amostra como podemos ver na figura (35). Para assegurar uma melhor saturação podemos fechar (T_1) e ligar a bomba de vácuo e abrir (T_3) deixando assim por algum tempo.

Uma vez estando a amostra saturada, deixa-se entrar o ar em (A)-(D) e abre-se (T_3) deixando equilibrar o sistema. Abrindo-se (T_2) retira-se um volume de água V_a que faz com que fique restabelecido o nível antigo. Este volume equivale ao volume de sólidos da amostra saturada. Sendo a porosidade π

dada por:

$$\eta = 1 - \frac{V_s}{V_t}$$

e sendo a forma da amostra conhecida e, consequentemente seu volume total, e sendo $V_s = V_a$ temos então a porosidade determinada. Tomamos 4 amostras de cada meio na determinação da mesma, dando os valôres constantes da tabela (38), valôres bastante dispersos. Cada amostra tinha altura de 5 cm.

TABELA (38)

Valôres encontrados no ensaio de porosidade

Nº	A (%)	B (%)
1	44.0	34.1
2	32.0	35.1
3	31.6	41.2
4	45.0	32.2
Média	38.21	35.7

APÊNDICE C

Ensaio de Bombeamento

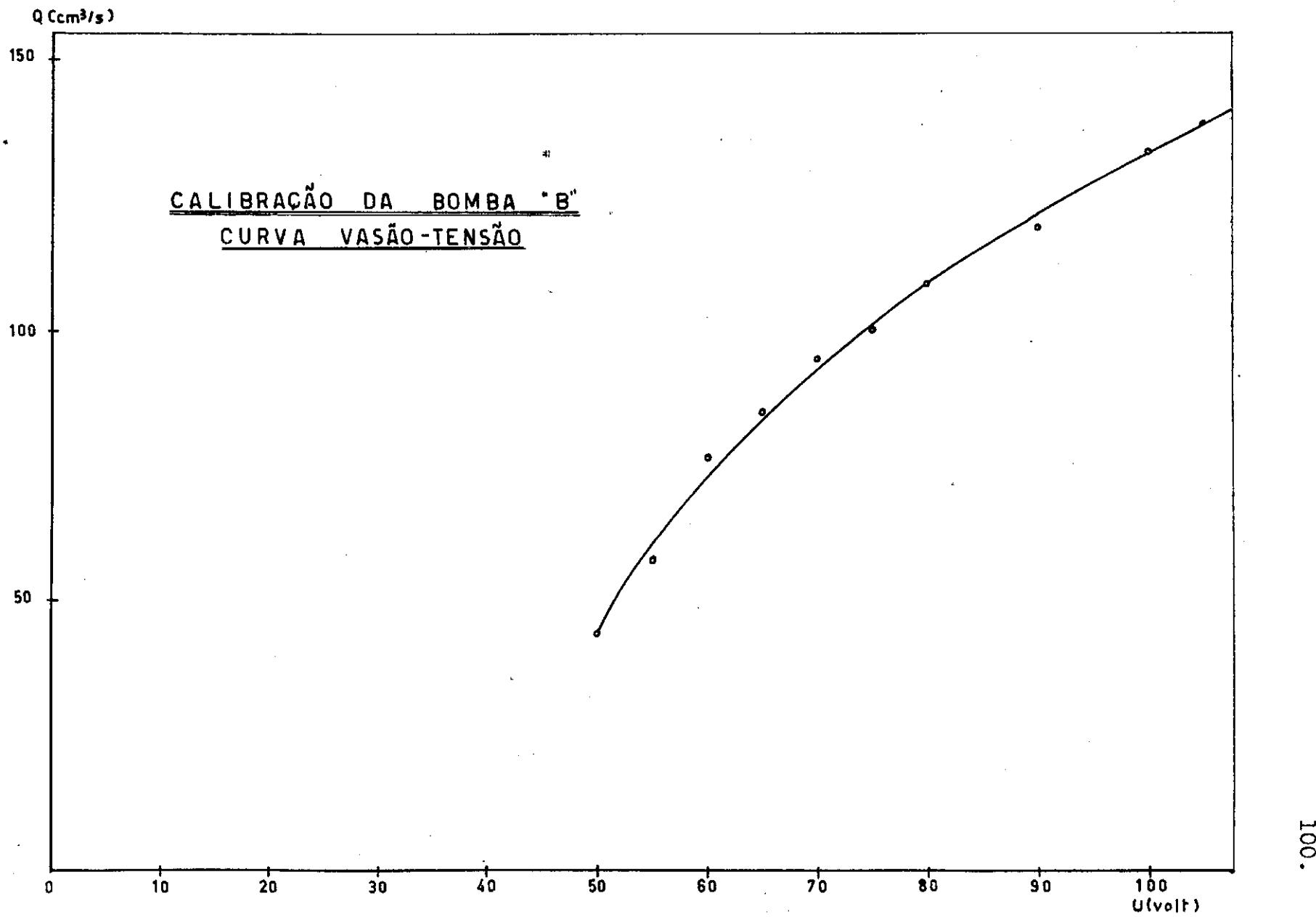
O ensaio de bombeamento foi feito simplesmente alimentando a bomba B com determinada tensão e verificar o tempo que levava para encher o volume de 1 litro. Dividindo-se o volume pelo tempo de enchimento, teve-se, então, a tabela (39), dos valores tensão - vazão. Estes valores foram lançados no gráfico da figura (37) e auxiliaram grandemente nos ensaios.

TABELA (39)

Valores encontrados no ensaio de Bombeamento

Tensão (volt)	vazão (l/s)
50	0.0441
55	0.0577
60	0.0769
65	0.0833
70	0.0944
75	0.1000
80	0.1080
90	0.1190
100	0.1330
110	0.1470

Figura
37



A P E N D I C E D

PROGRAMAS DE COMPUTADOR

// JOB T

TS 68195

LOG DRIVE	CART SPEC	CART AVAIL	PHY DRIVE
0000	0008	0008	0000

V2 M04 ACTUAL 16K CONFIG 16K

```
// FOR
*IOCS(CARD,1132PRINTER)
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
```

LUCIVAL

```
C
C      PROGRAMA PARA ESCREVER AS TABELAS
C
```

```
DIMENSION INT(8),Q(15,8),HMAX(15,8,2),HMIN(15,8,2),DELTA(15,8,2)
RFAD(2,10)(INT(I),I=1,8)
10 FORMAT(8I4)
READ(2,30)(Q(I,2),I=1,15)
30 FORMAT(15F5.3)
READ(2,40)((HMAX(J,K,I),K=1,8),J=1,15),I=1,2)
READ(2,40)((HMIN(J,K,I),K=1,8),J=1,15),I=1,2)
40 FORMAT(8F10.2)
DO 2 K=1,2
DO 2 I=1,15
M=(K-1)*15+I+4
WRITE(3,100)M
100 FORMAT(1H1//////////56X,'TABELA',I3//45X,'VALORES ENCONTRADOS
1PARA K1   K2'//30X,'VASAO',8X,'PERIODO',10X,'H MAX',10X,'H MIN',
20X,' H'//)
J=1
Q(I,J)=Q(I,2)/2.
DO 1 J=3,8
1 Q(I,J)=Q(I,2)
DO 2 J=1,8
TEST3=INT(J)
IF(TEST3)7,8,7
7 DELTA(I,J,K)=HMAX(I,J,K)-HMIN(I,J,K)+0.001
TEST1=HMAX(I,J,K)
TEST2=HMIN(I,J,K)
IF(TEST1)4,5,4
4 IF(TEST2)6,5,6
5 WRITE(3,200)Q(I,J),INT(J)
GO TO 2
8 DELTA(I,J,K)=0.
6 WRITE(3,300)Q(I,J),INT(J),HMAX(I,J,K),HMIN(I,J,K),DELTA(I,J,K)
2 CONTINUE
200 FORMAT(30X,F5.3,11X,I2,14X,'-',14X,'-',13X,'-'//)
300 FORMAT(30X,F5.3,11X,I2,12X,F5.2,10X,F5.2,10X,F4.2//)
CALL EXIT
END
```

FEATURES SUPPORTED

ONE WORD INTEGERS

IOCS

CORE REQUIREMENTS FOR

COMMON 0 VARIABLES 1702 PROGRAM 530

END OF COMPILED

// XEQ

PAGE 1 TS 68195

// JOR T

TS 68195

LOG DRIVE	CART SPEC	CART AVAIL	PHY DRIVE
0000	0008	0008	0000

V2 M04 ACTUAL 16K CONFIG 16K

```
// FOR
*IOCS(1132PRINTER)
*CNE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
```

LUCIVAL

```
C
C      CALCULO DOS VALORES PARA A CURVA DE DUPUIT
C
```

```
REAL MU
AH1=29.2
R=10.
EL=60.
PI=981.
MU=0.01
PERGI=0.90E-5
XKAI=PERGI*PI/MU
COFFI=XKAI*B*0.5/EL
ALT=AH1*AHI
WRITE(3,100)
```

```
100 FORMAT(1H1//////////55X,'TABELA 35'//39X,'VALORES DAS VASOES PARA A
1 CURVA DE DUPUIT'//48X,'H 1',7X,'H 2',6X,'VASAO'//)
VASI=0.
WRITE(3,300)AH1,AHI,VASI
300 FORMAT(42X,3F10.2/)
DO 1 I=1,291,10
AHJ=(291-I)*0.1
DIF=ALT-AHJ*AHJ
VASI=COFFI*DIF
IF(I-181)1,2,1
2 WRITE(3,400)
400 FORMAT(1H1//////////48X,'H 1',7X,'H 2',6X,'VASAO'//)
1 WRITE(3,300)AH1,AHJ,VASI
CALL EXIT
END
```

FEATURES SUPPORTED
 ONE WORD INTEGERS
 IOCS

CORE REQUIREMENTS FOR
 COMMON 0 VARIABLES 26 PROGRAM 264

END OF COMPILEATION

// XEQ

PAGE 1 TS 68195

// JOB T

TS 68195 *

LOG DRIVE	CART SPEC	CART AVAIL	PHY DRIVE
0000	0008	0008	0000

V2 M04 ACTUAL 16K CONFIG 16K

// FOR

LUCIVAL

*IOCS(CARD,1132PRINTER)

*ONE WORD INTEGERS

*LIST SOURCE PROGRAM

```

C      PROGRAMA PARA O CALCULO DA PERMEABILIDADE
C      PERMEAMETRO A AR - 12 VALORES - VASAO EM CC/MIN - H EM MM
C

```

DIMENSION Y(12),X(12),C(2),A(12),B(12)

READ(2,9)N,XL,YL,NX,NY

9 FORMAT(1I10,2F10.3,2I10)

```

C      DETERMINACAO DOS VALORES PARA A ESCALA - PAPEL DE TESE
C

```

EX=15.5/2.54/XL

EY=22.0/2.54/YL

DIVX=XL/NX

DIVY=YL/NY

CALL SCALF(EX,EY,0.,0.)

CALL FGRID(1,0.,0.,DIVY,NY)

CALL FGRID(0,0.,0.,DIVX,NX)

CALL FPLOT(2,XL,YL)

CALL FPLOT(-1,0.,YL)

DO 11 IK=1,N

READ(2,1)(Y(I),I=1,12)

1 FORMAT(12F6.3)

READ(2,2)(X(I),I=1,12)

2 FORMAT(12F6.1)

READ(2,10)HL,AR,PI,XMU

10 FORMAT(4F10.5)

```

C      AJUSTAMENTO DOS PONTOS
C

```

DO 5 I=1,12

A(I)=X(I)

5 P(I)=Y(I)

CALL APOL(Y,X,1,12,C)

```

C      CALCULO DA PERMEABILIDADE OK
C

```

DELTA=C(2)*XL

OK=HL*XMU/(12.0*PI*AR*C(2))

```

C      SAIDA DOS RESULTADOS
C

```

WRITE(3,3)N

3 FORMAT(1H1//////////43X,'VALORES DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE'//52X,
1,'CORPO DE PROVA',I2/52X,'VASAO ALTURA'//)

DO 8 I=1,12

WRITE(3,4)A(I),B(I)

4 FORMAT(52X,F5.1,5X,F6.4//)

D=A(I)

PAGE 2 TS 68195

```

E=R(1)
CALL FPLOT(-2,D,E)
CALL POINT(1)
8 CALL FPLOT(1,D,E)
WRITE(3,6)C(2),C(1)
6 FORMAT(//44X,'AJUSTAMENTO DOS PONTOS A UMA RETA'//53X,'EQUACAO DA
IRETA'//54X,'Y = ',F8.5,' X'//54X,'ERRO = ',F6.3//)
WRITE(3,7)OK
7 FORMAT(//48X,'PERMEABILIDADE DO MEIO A'//54X,'K = ',E10.3)
ER=C(1)
DELTA=DELTA+ER
CALL FPLOT(-2,0.,ER)
CALL FPLOT(0,XL,DELTA)
11 CALL FPLOT(1,0.,0.)
CALL EXIT
END

```

FEATURES SUPPORTED
 ONE WORD INTEGERS
 IOCS

CORE REQUIREMENTS FOR
 COMMON 0 VARIABLES 140 PROGRAM 514

END OF COMPILATION

// XEQ

Y = valôres de ΔH

X = valôres de Q

N = número de amostras ensaiadas

XL = maior valor de que se deseja colocar no gráfico

YL = maior valor de H que se deseja colocar no gráfico

NX = número de intervalos no eixo dos X

NY = número de intervalos no eixo dos Y

HL = altura da amostra

AR = área da amostra

PI = peso específico do ar

XMU = viscosidade dinâmica do ar.

VALORES DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE

CORPO DE PROVA 2
VASAO ALTURA

173.1	0.4950
233.0	0.6440
279.0	0.7600
325.0	0.8920
375.0	1.0160
425.0	1.1290
475.0	1.3090
525.0	1.4130
633.0	1.7270
741.0	2.0230
850.5	2.3020
960.0	2.6530

AJUSTAMENTO DOS PONTOS A UMA RETA

EQUACAO DA RETA
 $Y = 0.00273 X$

ERRO = -0.000

PERMEABILIDADE DO MEIO A
 $K = 0.180E-04$

VALORES DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE

CORPO DE PROVA 2
VASAO ALTURA

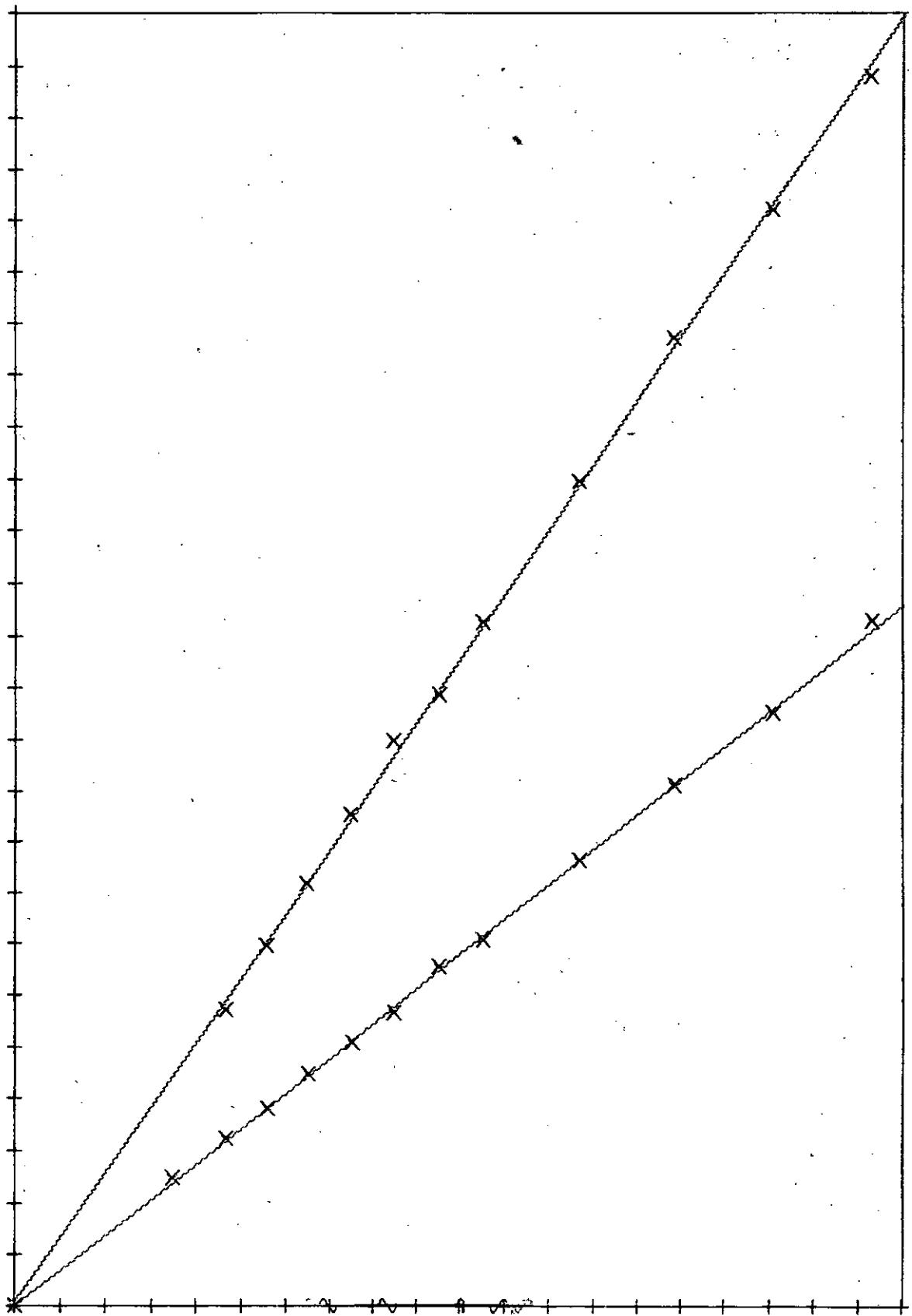
0.0	0.0000
233.0	1.1410
279.0	1.3920
325.0	1.6360
375.0	1.9030
425.0	2.1940
475.0	2.3700
525.0	2.6490
633.0	3.1840
741.0	3.7390
850.5	4.2390
960.0	4.7570

AJUSTAMENTO DOS PONTOS A UMA RETA

EQUACAO DA RETA
 $Y = 0.00498 X$

ERRO = 0.016

PERMEABILIDADE DO MEIO A
 $K = 0.989E-05$



APÊNDICE E

Dados técnicos e fotografias da aparelhagem

1 - Bomba A fig. (42)

Motor nº 84976 DAL

Tipo M44- 4

Ciclos 60

HP 1/2 RPM - 1720

Volts 110/220 AMP- 7.8 - 3.9

2 - Bomba B fig. (43)

Entrada - 0 a 110 volts.

ciclos - 50 a 60

3 - Transformador D (fig 48)

METERED VARIAC

TYPE W5 MT3VM

LINE 120 50-60 ciclos variação -0- 1500

4 - Voltímetro fig (44)

Multitester Sanwa 360-YTR

5 - Transformador B (fig 44) Variac

Tipo VM 115 nº 620

Corrente máxima 11 A

Entrada 115 saída de 0 a 130

50/60 Hertz

6 - Registrador

A P E N D I C E F

FOTOGRAFIAS E GRÁFICOS COMPLEMENTARES.

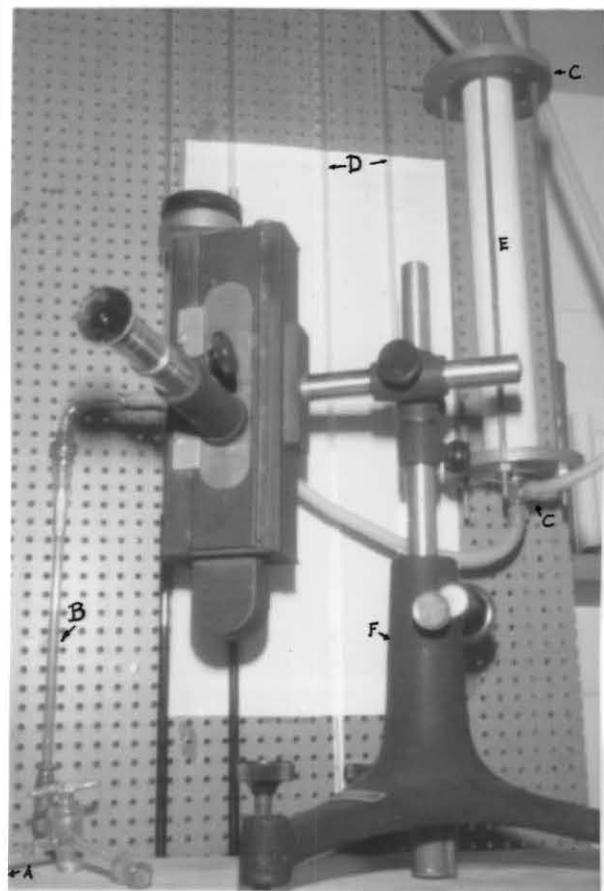


Figura 34.
Permeâmetro a ar.

Figura 35. - Porosímetro

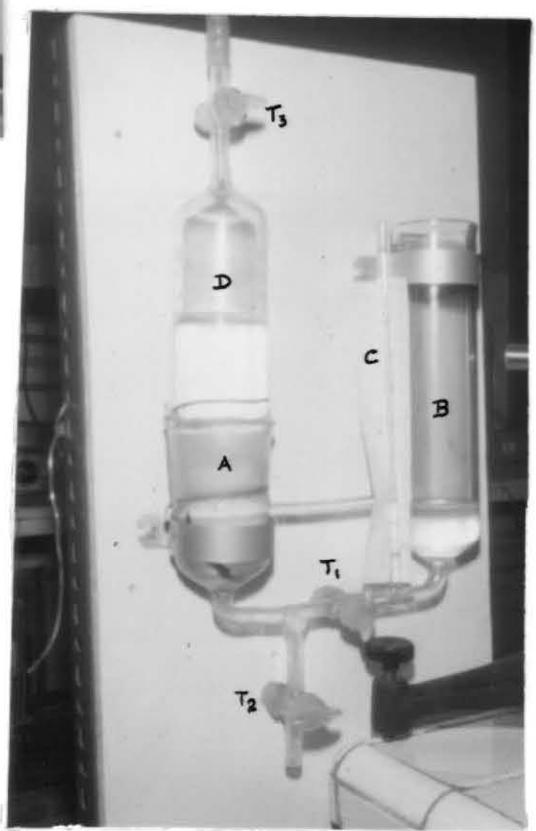




Figura 38. - Material utilizado para fabricação dos meios.

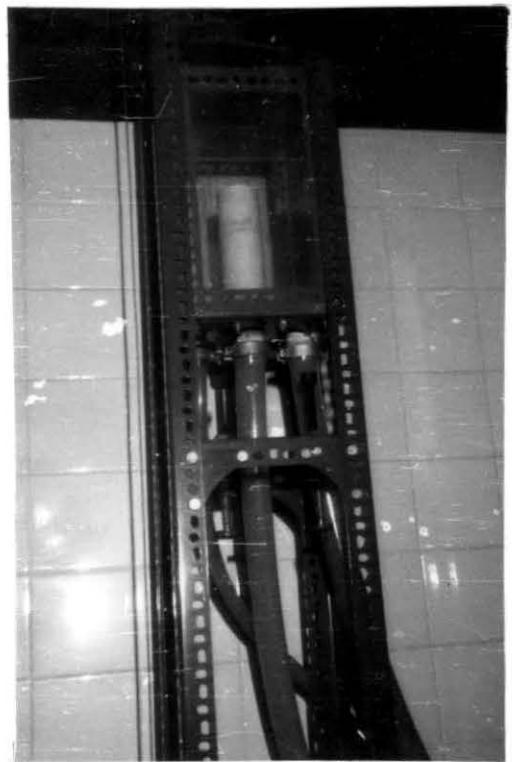


Figura 39. - Parafusos calantes e ligações hidráulicas no reservatório.



Figura 40. - Vertedor

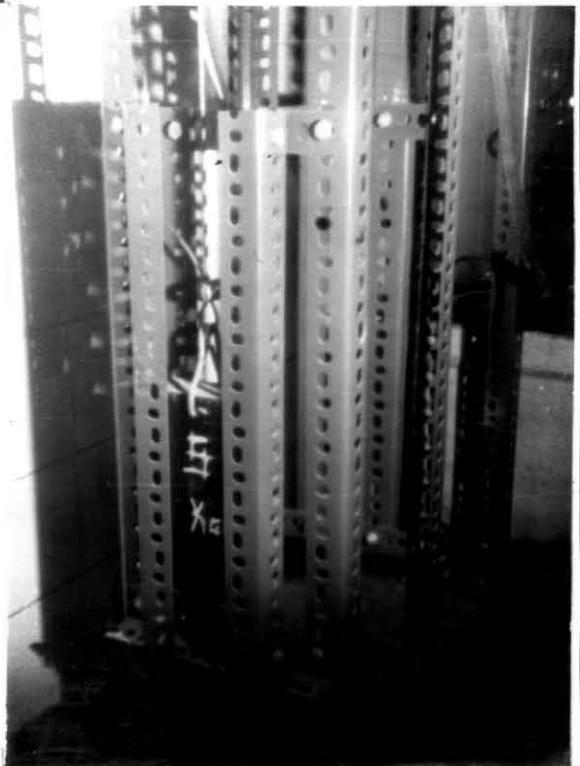


Figura 41. - Pêlos de equilíbrio.

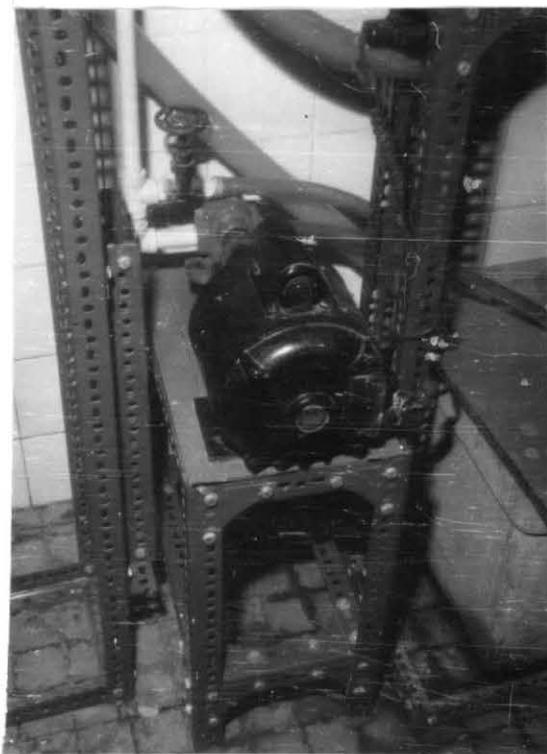


Figura 42. - Bomba A



Figura 43. - Bomba B

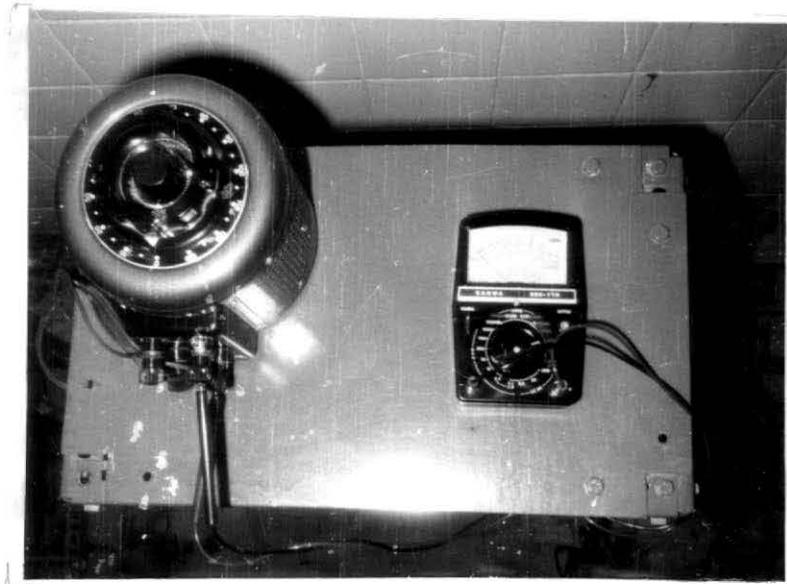


Figura 44. - Transformador e voltímetro auxiliares da bomba B.

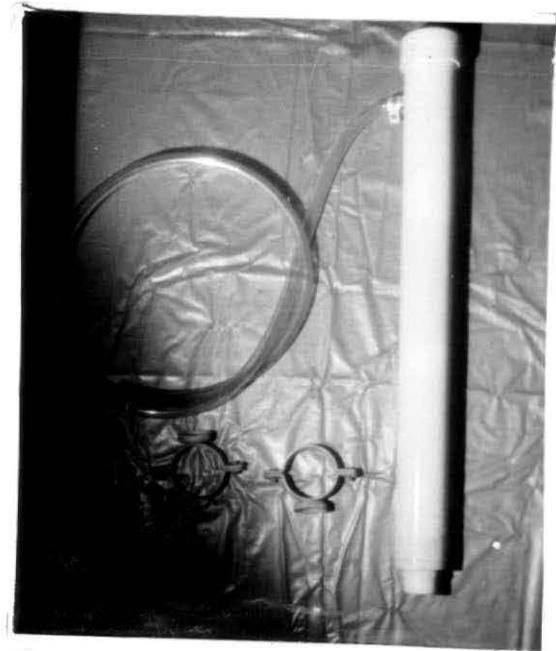


Figura 45. - Sifão

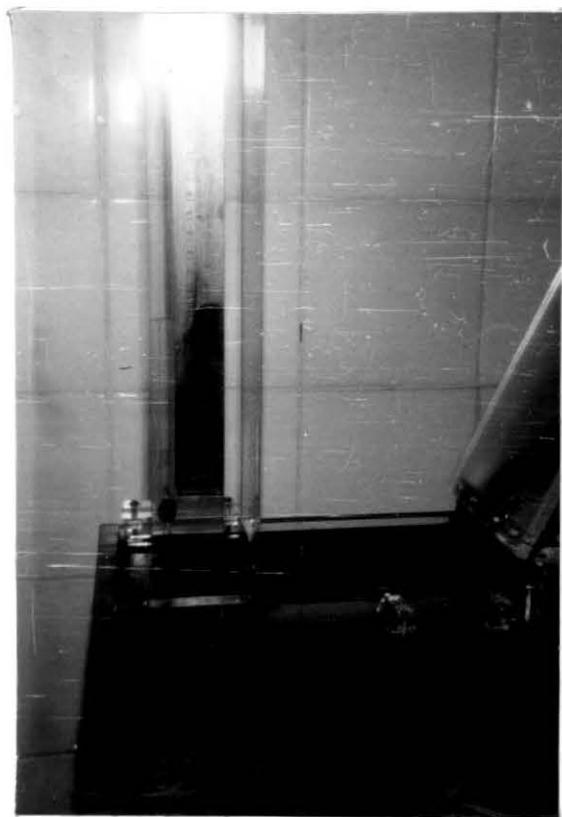


Figura 46. - Detalhe da ponta na água.



Figura 47. - Superfície de surgência.

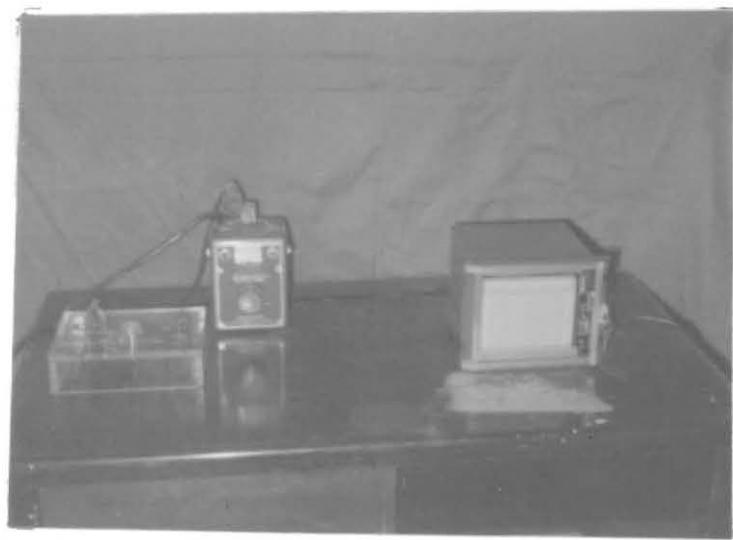


Figura 48. - Mesa de Comando

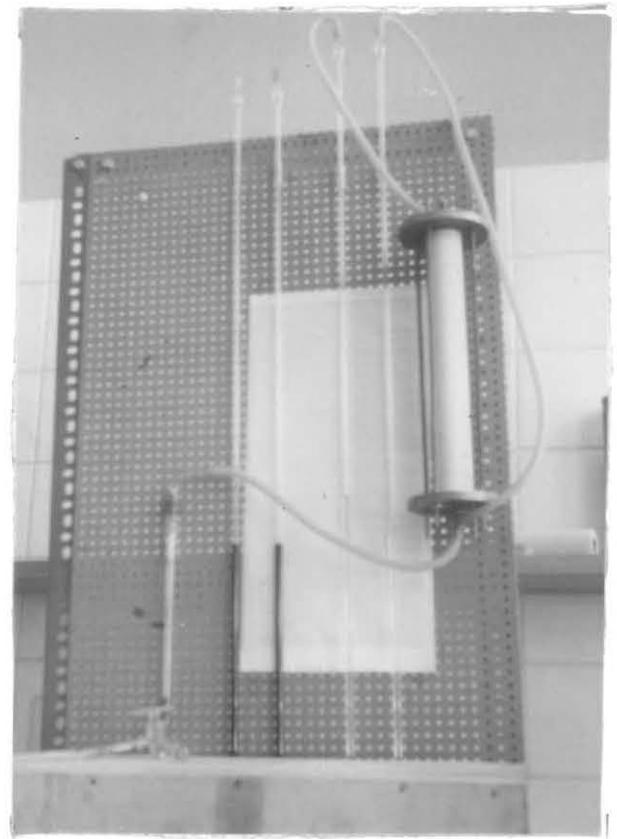


Figura 49. - Permeâmetro
(detalhe)



Figura 50. - Material usado no ensaio de porosidade.

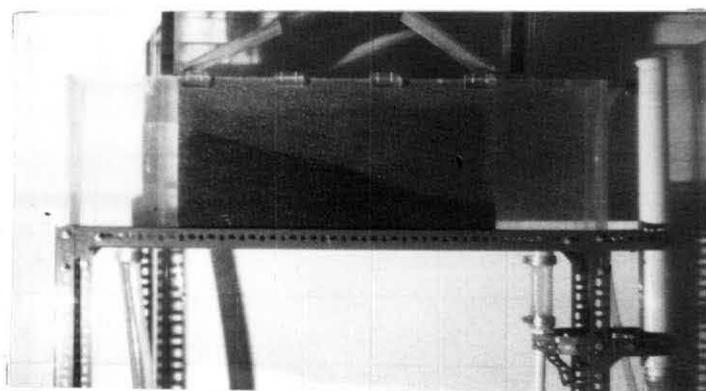


Figura 51. - Escoamento para
 $k_1 > k_2$

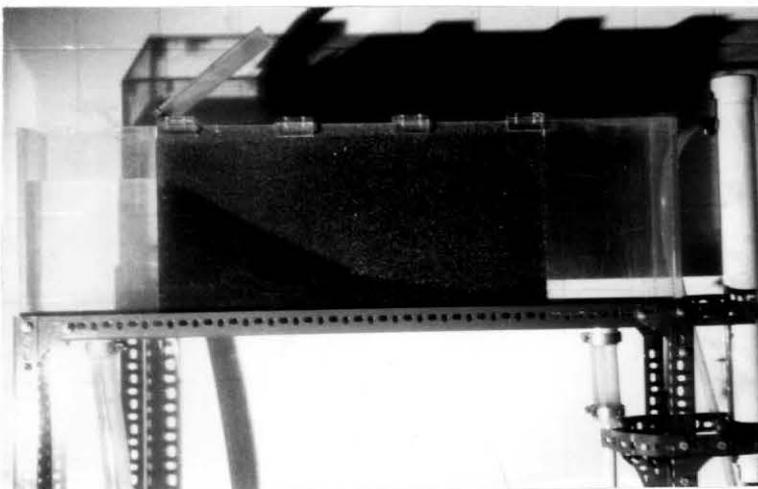


Figura 52. -
Escoamento para
 $K_1 < K_2$

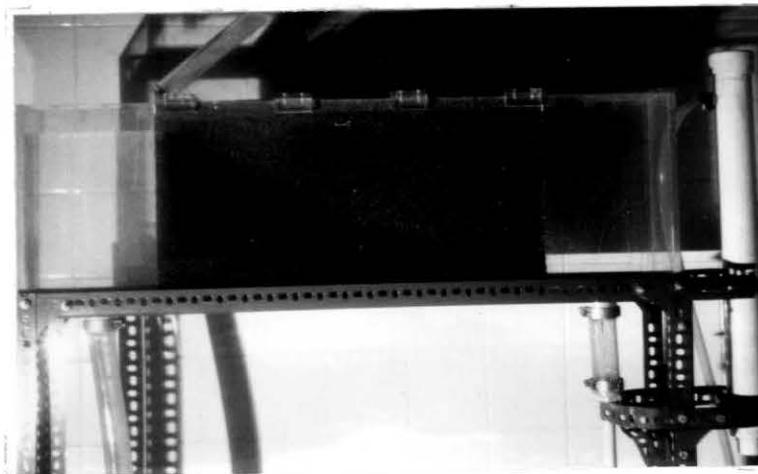


Figura 53. -
Escoamento para
 $K_1 < K_2$

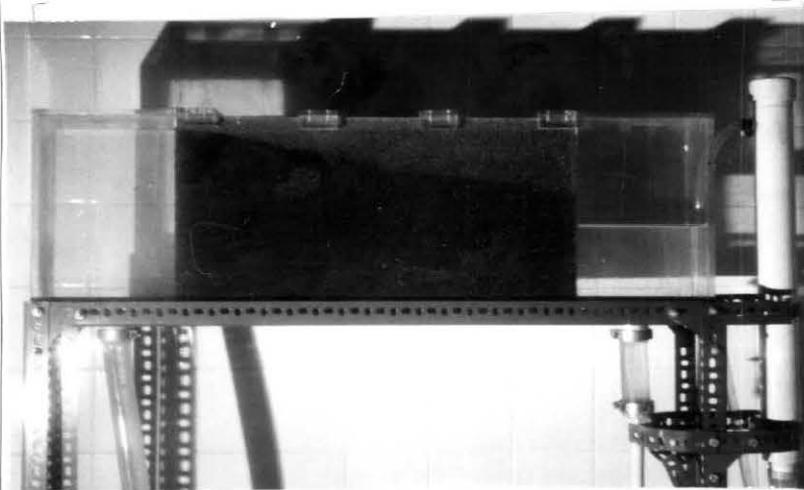


Figura 54. -
Escoamento para
 $K_1 < K_2$

Figura 55. -
Escoamento para
 $K_1 < K_2$

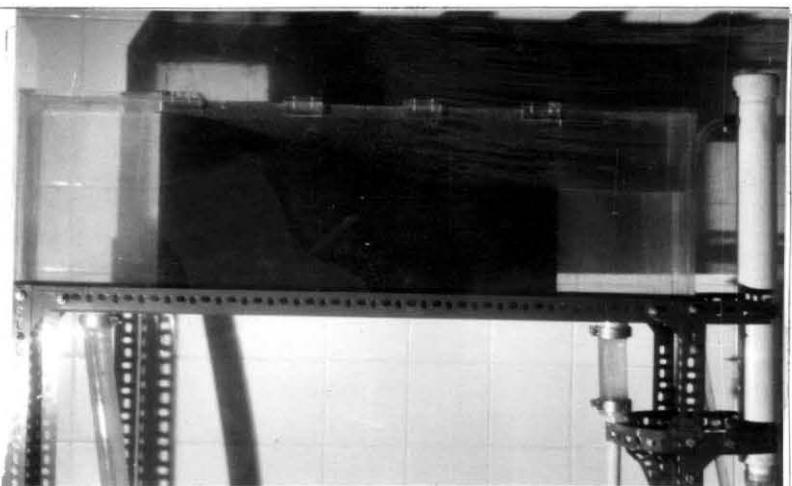


Figura 56. -
Escoamento para
 $K_1 < K_2$

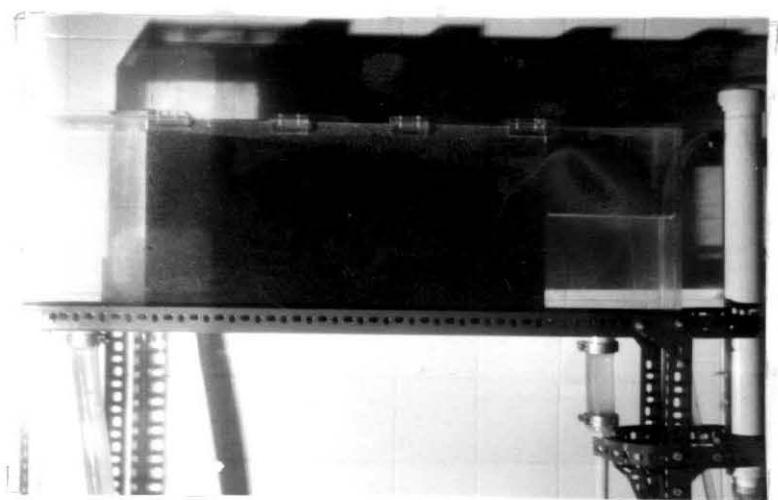
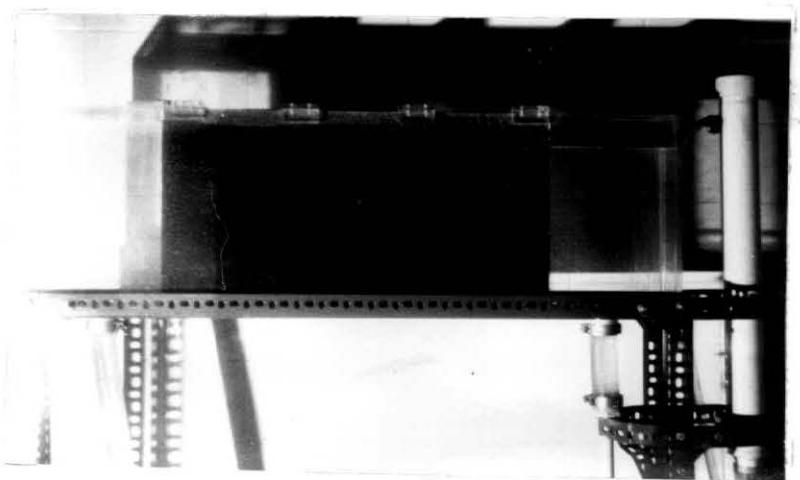
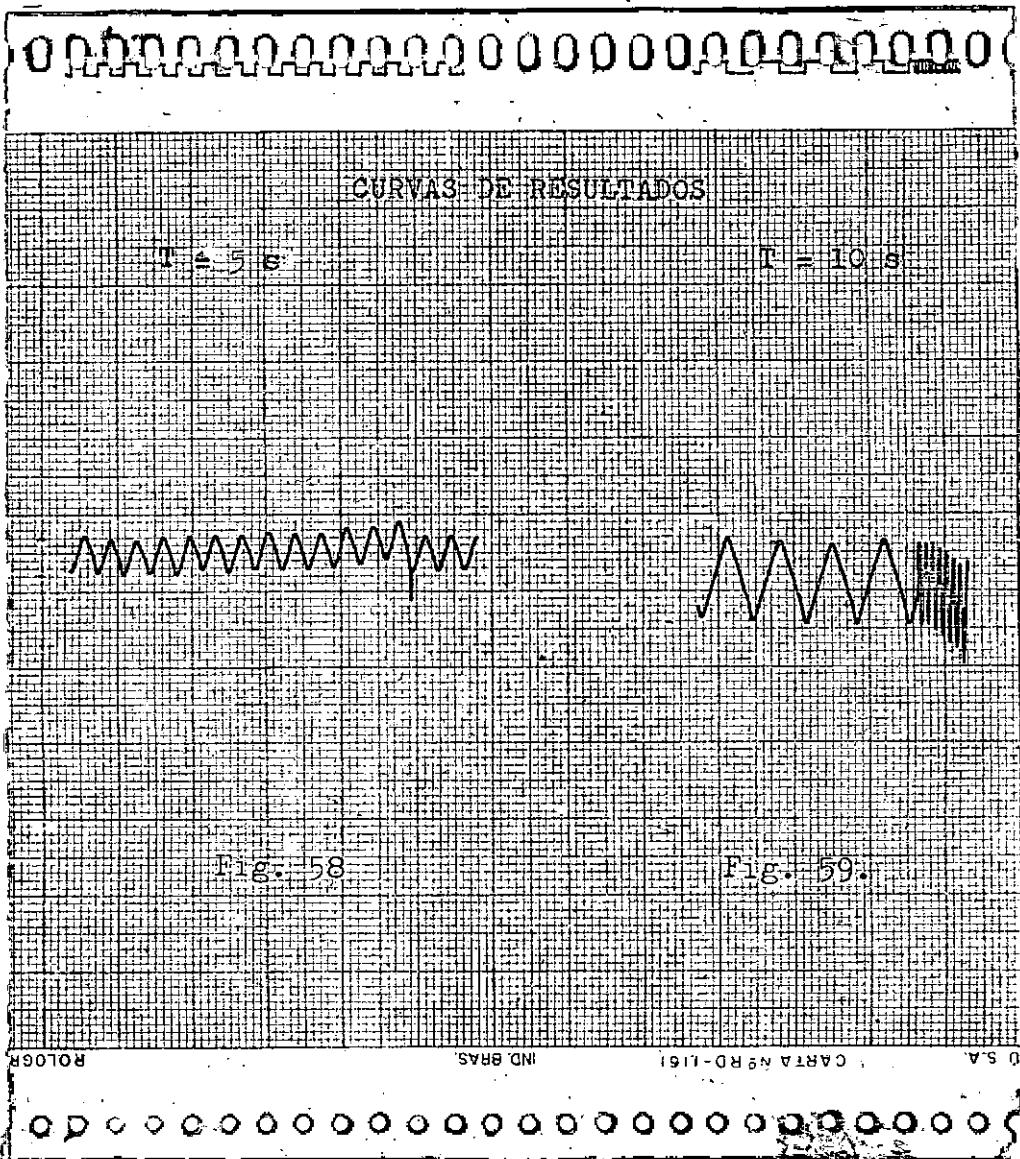


Figura 57. -
Escoamento para
 $K_1 < K_2$





Figuras 58 e 59 - Curvas de resultado

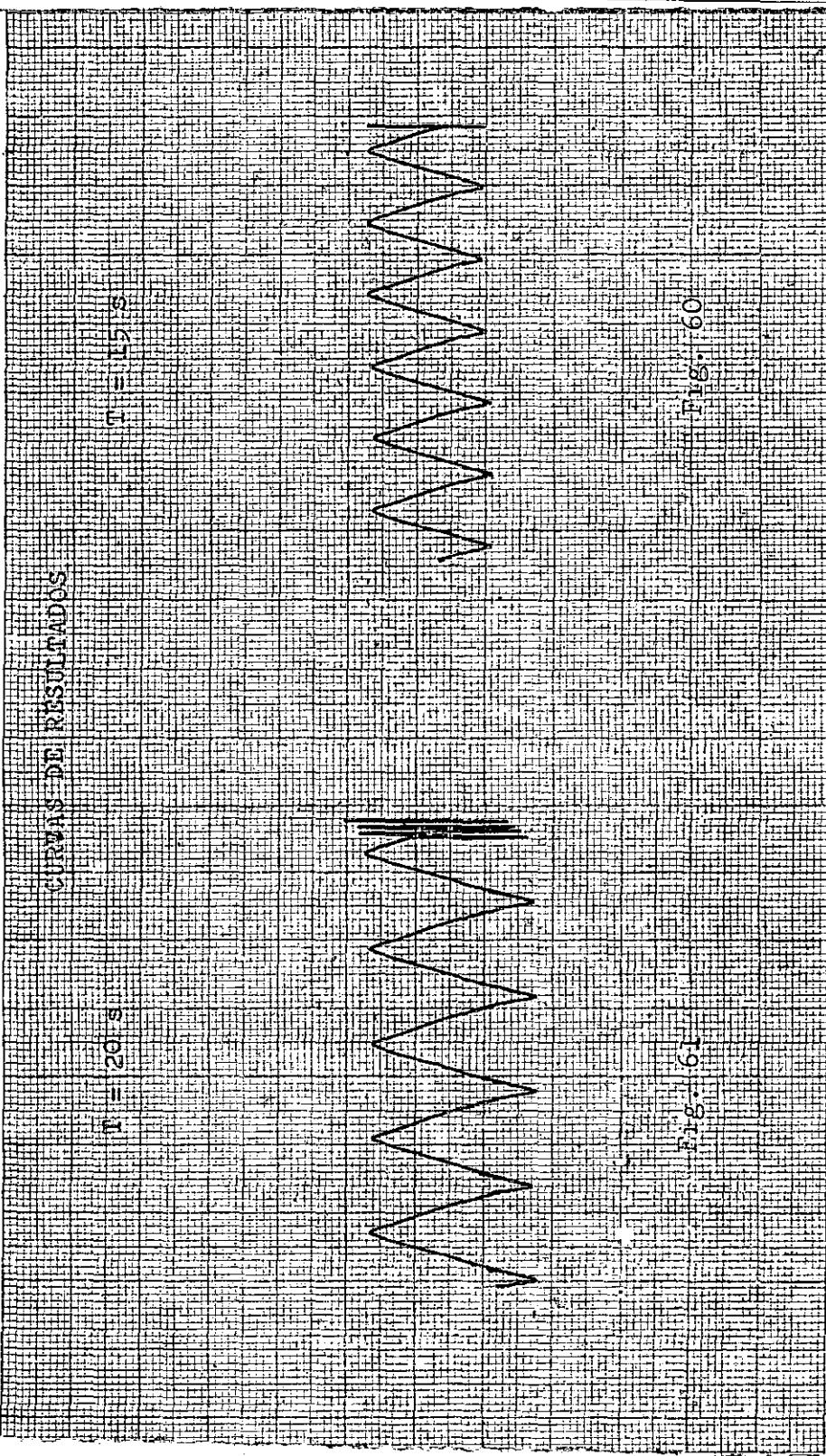
AFICA DURUSA

CARTA N° RD-1161

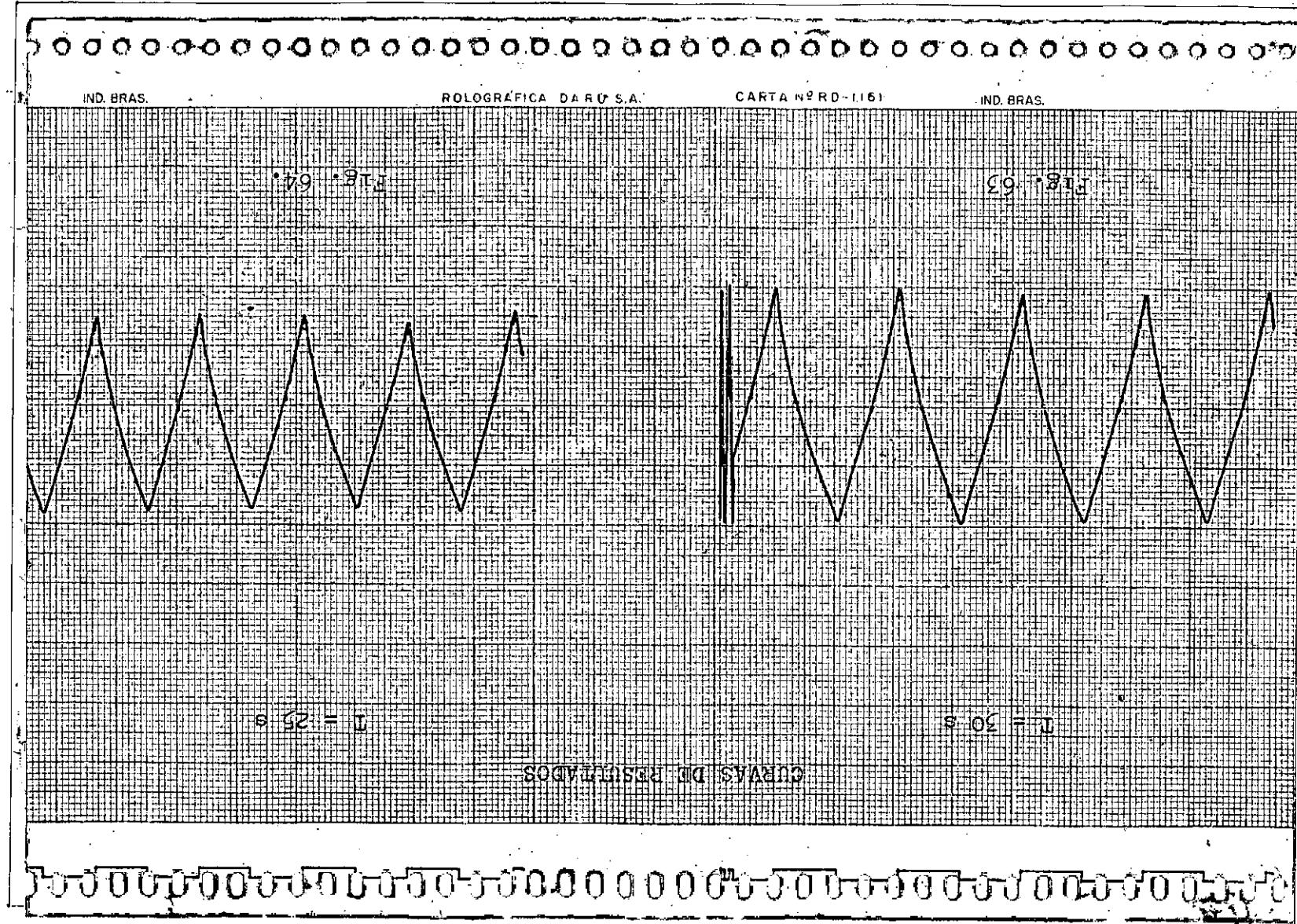
IND. BRAS.

ROLOGRAFICA DURUSA

CARTA N° RD-11



Figuras 60 e 61 - Curvas de resultado.



Figuras 62 e 63 - Curvas resultado.

NOMENCLATURA

<u>Simbolo</u>	<u>Grandeza física</u>	<u>Unidade (MLT)</u>
R	nº de Reynolds	—
V	velocidade	L T ⁻¹
d	diâmetro dos grãos	L
ν	viscosidade cinemática	L ² T ⁻¹
k	permeabilidade absoluta	LT ⁻¹
ψ	potencial hidráulico	L
Q	vasão	L ³ T ⁻¹
q	vasão por unidade de comprimento	L ² T ⁻¹
p	pressão	M L ⁻¹ T ⁻²
γ	pêso específico da água	M L ⁻² T ⁻²
ϵ	porosidade específica	—
S	área	L ²
T	período	T
U	Tensão	—