

PEDRO EITI AOKI

Engenheiro Civil pela Escola Politécnica da USP, 1975

METODOLOGIA DAS DETERMINAÇÕES DA VELOCIDADE,  
DIREÇÃO E SENTIDO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂ-  
NEA, COM UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES RADIOATI-  
VOS.

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da USP para a obten-  
ção do título de Mestre em En-  
genharia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Augusto dos Santos  
Nogueira.

Professor Titular do Departamento de  
Engenharia Hidráulica da EPUSP.

## RESUMO

Apresentou-se um roteiro básico para as determinações da velocidade, direção e sentido do fluxo da água subterrânea, com utilização de traçadores radioativos, procurando-se dar ênfase aos conceitos de hidrologia e de energia nuclear, à construção de alguns equipamentos específicos, à calibração dos detectores de radiação em laboratório e às aplicações práticas, em poço.

Escolheram-se os radioisótopos  $^{82}\text{Br}$  e  $^{51}\text{Cr}$  como traçadores, para as determinações da velocidade, representada pela Lei de Darcy e da direção e sentido do fluxo, respectivamente.

A partir do valor obtido para a velocidade de Darcy, confirmou-se que o regime de escoamento do fluxo é laminar, de acordo com a hipótese admitida.

Fizeram-se comparações entre os valores da velocidade de Darcy, direção e sentido do fluxo e os valores obtidos usando-se ensaios de bombeamento e levantamento de curvas equipotenciais; concluiu-se que são da mesma ordem de grandeza, sendo portanto, aproximados sob o ponto de vista prático.

## ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY FOR DETERMINING VELOCITY AND DIRECTION OF  
GROUND WATER FLOW BY USING RADIOACTIVE TRACERS.

It has been presented a basic route for determining velocity and direction of ground water flow by using radioactive tracers. Emphasis has been given to hydrology and nuclear energy concepts, to the construction of some specific equipments, to the calibration of radiation detectors and to the practical applications in borehole.

$^{82}\text{Br}$  and  $^{51}\text{Cr}$  have been chosen as tracers for the Darcy's velocity and direction determinations, respectively.

From the obtained value of Darcy's velocity, the laminar flow was confirmed according to the admitted hypothesis.

Comparisons of the Darcy's velocity values and flow direction have been made with values obtained using pumping tests and survey of the equipotential curves, where it can be concluded that they are of the same largeness and then, from a practical view, approximate.

## ÍNDICE GERAL

INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 1 - REVISÃO DA LITERATURA .....	3
1.1. Histórico da aplicação da técnica nuclear.	3
1.2. Radioisótopos .....	5
1.2.1. Definição de isótopo .....	5
1.2.2. Isótopos estáveis e radioativos .....	6
1.2.3. Radioatividade natural e artificial .....	6
1.2.4. Lei fundamental da radioatividade .....	7
1.2.4.1. Meia-vida T do isótopo radioativo .....	8
1.2.4.2. Unidades de atividade .....	9
1.2.5. Formas de desintegração .....	10
1.3. Traçadores .....	11
1.3.1. Definição .....	11
1.3.2. O traçador ideal .....	12
1.3.3. Critérios para a escolha do traçador radioativo .....	13
1.3.4. Concentração máxima permissível .....	17
1.3.5. Vantagens da utilização do traçador radioativo .....	17
1.3.6. Desvantagens da utilização do traçador radioativo .....	18
1.3.7. Disponibilidade e custo .....	18
1.4. O ciclo hidrológico .....	19
1.4.1. Infiltração .....	21
1.4.2. A água subterrânea .....	22
1.4.3. Lei de Darcy .....	23
1.4.3.1. Intervalo de validade da Lei de Darcy ....	27
1.4.3.2. Coeficiente de permeabilidade .....	29
1.5. Métodos clássicos de determinação da velocidade de Darcy .....	30
1.6. Método clássico das determinações da direção e do sentido do fluxo .....	33
1.7. Método de determinação da velocidade de Darcy, com utilização de traçadores radioativos .....	34
1.7.1. Princípios do método .....	34

---

1.7.1.1.	Coefficiente de permeabilidade do filtro ..	39
1.7.1.2.	Coefficientes de permeabilidade do pré-fil- tro e do meio poroso .....	40
1.7.2.	Influência do fluxo vertical .....	41
1.7.3.	Influência da agitação para homogeneização do traçador, durante as medições .....	43
1.7.4.	Influências da convecção e da difusão mole- culares do traçador .....	43
1.8.	Método das determinações da direção e do sentido do fluxo com utilização de traça- dores radioativos .....	46
1.8.1.	Princípios do método .....	46
1.8.2.	Parâmetros que limitam a aplicação do mé- todo .....	47
CAPÍTULO 2 - EQUIPAMENTOS E MÉTODOS .....		49
2.1.	Equipamentos .....	49
2.1.1.	Sistema de detecção da radiação gama .....	49
2.1.1.1.	Espectrômetro BASC .....	49
2.1.1.2.	Sonda cintiladora gama .....	52
2.1.2.	Equipamento para uso em determinações da velocidade de Darcy .....	52
2.1.2.1.	Injetor de traçador para marcação da co- luna piezométrica .....	52
2.1.3.	Projeto e construção de equipamentos para uso nas determinações da direção e do sen- tido do fluxo .....	54
2.1.3.1.	Injetor pontual de traçador .....	54
2.1.3.2.	Colimador para a sonda cintiladora gama ..	55
2.1.3.3.	Suporte para hastes de secção quadrada, gi- ratório, com indicação da posição do co- limador .....	57
2.1.4.	Características do poço e informações hi- drogeológicas do local de estudos .....	58
2.2.	Métodos .....	60
2.2.1.	Escolha do radioisótopo utilizado na de- terminação da velocidade de Darcy .....	60
2.2.2.	Escolha do radioisótopo utilizado nas de- terminações da direção e do sentido do flu- xo .....	61

2.2.3.	Calibração das sondas utilizadas na detecção da radiação gama .....	62
2.2.3.1.	Sensibilidade de detecção .....	62
2.2.3.2.	Técnicas de detecção .....	64
2.2.3.2.1.	Técnica utilizada nas experiências .....	65
2.2.3.2.2.	Geometria de calibração das sondas .....	65
2.2.3.3.	Procedimento para calibração em laboratório .....	67
2.2.3.3.1.	Descrição do sistema .....	67
2.2.3.3.2.	Etapas da calibração .....	68
2.2.3.3.3.	Determinações do raio infinito, da sensibilidade de detecção e da atividade a injetar no poço, para o $^{82}\text{Br}$ .....	69
2.2.3.3.4.	Determinações da sensibilidade de detecção e da atividade a injetar no poço, para o $^{51}\text{Cr}$ .....	71
2.2.4.	Procedimentos para a marcação da coluna piezométrica e para a instalação do sistema de detecção no poço .....	73
2.2.4.1.	Marcação da coluna piezométrica com carregador inativo e solução radioativa .....	73
2.2.4.2.	Instalação do sistema de detecção .....	74
2.2.4.3.	Tempo de espera entre injeções sucessivas. ....	74
2.2.5.	Procedimentos para a injeção pontual e para a instalação do sistema de detecção, no poço .....	75
2.2.5.1.	Injeção pontual da solução radioativa ....	75
2.2.5.2.	Instalação do sistema de detecção .....	76
CAPÍTULO 3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....		77
3.1.	Determinação da velocidade de Darcy .....	77
3.2.	Determinação da direção e do sentido do fluxo .....	78
CAPÍTULO 4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....		80
4.1.	Verificação da validade da aplicação da Lei de Darcy .....	80
4.1.1.	Comparação entre os resultados da velocidade de Darcy obtidos pelos métodos de diluição de traçador e clássico .....	81

---

4.2.	Comparação entre os resultados de direção e sentido do fluxo da água subterrânea obtidos pelos métodos radioisotópico e clássico .....	82
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....		83
5.1.	Conclusões .....	83
5.1.1.	Conclusões sobre a determinação da velocidade de Darcy .....	83
5.1.2.	Conclusões sobre as determinações da direção e sentido do fluxo .....	86
5.2.	Sugestões .....	87
APÊNDICE .....		89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		127

## ÍNDICE DAS TABELAS

TABELA 1 - Equivalência, múltiplos e sub-múltiplos da unidade Atividade .....	91
TABELA 2 - Alguns radioisótopos utilizados na hidrologia .....	92
TABELA 3 - Alguns radioisótopos produzidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear de São Paulo, para aplicação na hidrologia .....	93
TABELA 4 - Preço médio em ORTN de alguns radioisótopos, vigentes nos contratos de trabalho ..	93
TABELA 5 - Variação da taxa de contagem, com a posição da sonda cintiladora .....	94
TABELA 6 - Taxas de contagem obtidas com a sonda cintiladora gama, para concentrações crescentes de $^{82}\text{Br}$ .....	95
TABELA 7 - Taxas de contagem obtidas com a sonda cintiladora gama, com o colimador, para concentrações crescentes de $^{51}\text{Cr}$ .....	96
TABELA 8 - Valores obtidos na experiência para determinação da velocidade de Darcy .....	97
TABELA 9 - Valores obtidos na experiência para determinação da direção e sentido do fluxo ....	98

## ÍNDICE DAS FIGURAS

FIGURA 1	- O ciclo hidrológico e o armazenamento da água terrestre .....	99
FIGURA 2a	- Experiência de Darcy .....	100
FIGURA 2b	- Percolação através de um filtro de areia, inclinado .....	100
FIGURA 3	- Curva esquemática relacionando a vazão específica e o gradiente hidráulico .....	101
FIGURA 4	- Curvas equipotenciais da água subterrânea com indicação da direção e sentido do fluxo .....	102
FIGURA 5	- Exemplos de alguns filtros utilizados em poços .....	103
FIGURA 6	- Corte típico da secção transversal de um poço e as linhas de fluxo obtidas com traçadores corantes .....	104
FIGURA 7	- Valores de $\alpha$ , em função de $K/K_2$ e $K_2/K_1$ , com $r_1/r_2 = 0,9$ e $r_2/r_3 = 0,1$ .....	105
FIGURA 8	- Valores de $\alpha$ , em função de $K/K_2$ e $K_2/K_1$ , com $r_1/r_2 = 0,9$ e $r_2/r_3 = 0,9$ .....	105
FIGURA 9	- Valores de $\alpha$ , em função de $K/K_2$ e $K_2/K_1$ , com $r_1/r_3 = 0,9$ e $r_2/r_3 = 0,3$ .....	105
FIGURA 10	- Valores de $\alpha$ , em função de $K_2/K_1$ e $K/K_2$ , com $r_1/r_2 = 0,9$ e $r_2/r_3 = 0,3$ .....	106

FIGURA 11 - Valores de $\alpha$ , em função de $r_2/r_3$ e $K/K_2$ , com $K_2/K_1 = 1,0$ e $r_1/r_2 = 0,9$ .....	106
FIGURA 12 - Dispositivo obturador de fluxos verti- cais .....	107
FIGURA 13 - Coeficiente de difusão em função da con- centração do traçador, para alguns radio- isótopos .....	107
FIGURA 14 - Injetor de traçador, para marcação da co- luna piezométrica .....	108
FIGURA 15 - Injetor pontual de traçador .....	109
FIGURA 16 - Colimador para a sonda cintiladora gama .	110
FIGURA 17 - Suporte para hastes de secção quadrada, giratório, com indicação da posição do colimador .....	111
FIGURA 18 - Localização do poço no campo de provas do IPT .....	112
FIGURA 19 - Perfil litológico nas imediações do poço, entre os piezômetros 2 e 10 .....	113
FIGURA 20 - Distribuição granulométrica representati- va do meio poroso .....	114
FIGURA 21 - Corte longitudinal e secção transversal do poço .....	115
FIGURA 22 - Curvas de calibração do detector, para distintos volumes de influência .....	116

---

FIGURA 23 - Técnicas de detecção com sonda cintiladora gama, de uso mais frequente .....	116
FIGURA 24 - Sistema utilizado na calibração da sonda cintiladora gama .....	117
FIGURA 25 - Determinação do raio infinito para o $^{82}\text{Br}$ .	118
FIGURA 26 - Curva de calibração para a sonda cintiladora gama, e $^{82}\text{Br}$ .....	119
FIGURA 27 - Curva de calibração para a sonda cintiladora gama, colimada, e $^{51}\text{Cr}$ .....	120
FIGURA 28 - Etapas seguidas na marcação da coluna piezométrica do poço .....	121
FIGURA 29 - Etapas seguidas na injeção pontual da solução radioativa .....	122
FIGURA 30 - Sistema de detecção utilizado nas determinações da direção e do sentido do fluxo .....	123
FIGURA 31 - Curva de diluição para a determinação da velocidade aparente .....	124
FIGURA 32 - Representação vetorial das taxas de contagem em função do ângulo de rotação, direção e sentido do fluxo .....	125
FIGURA 33 - Comparação entre as direções e sentidos do fluxo obtidos por métodos clássicos e neste trabalho .....	126

## NOTAÇÃO

SIMBOLO		DIMENSÃO
A	atividade do radioisótopo no instante t	$T^{-1}$
$A_0$	atividade do radioisótopo no instante t = 0	$T^{-1}$
C	concentração do traçador radioativo no instante t	$L^{-3}T^{-1}$
$C_0$	concentração do traçador radioativo no instante t = 0	$L^{-3}T^{-1}$
CMP	concentração máxima permissível	$L^{-3}T^{-1}$
D	coeficiente de difusão molecular	$L^2T^{-1}$
$D_p$	diâmetro do poço	L
$D_t$	diâmetro interno do tubo do injetor	L
d	dimensão representativa dos grãos	L
$d_{10}$	diâmetro efetivo dos grãos	L
$d_m$	diâmetro médio dos grãos	L
E	sensibilidade de detecção	$L^3$
g	aceleração da gravidade	$LT^{-2}$
H	altura da coluna piezométrica do poço	L
$H_c$	altura de água no tubo de calibração de sondas	L
h	carga de pressão	L
I	gradiente hidráulico	
K	coeficiente de permeabilidade do meio poroso	$LT^{-1}$
$K_1$	coeficiente de permeabilidade do filtro	$LT^{-1}$
$K_2$	coeficiente de permeabilidade do pré-filtro	$LT^{-1}$
k	coeficiente intrínseco de permeabilidade	$L^2$
L	comprimento do filtro do piezômetro	L
ℓ	distância entre os detectores	L
M	número de massa de um elemento químico	

## SIMBOLO

## DIMENSÃO

m	número de meias-vidas	
N	número de átomos radioativos de uma amostra, no instante t	
N <sub>0</sub>	número de átomos radioativos de uma amostra, no instante t = 0	
N <sub>e</sub>	número de nêutrons de um elemento químico	
n'	taxa de contagem, levando-se em conta o efeito do decaimento radioativo, no instante t	T <sup>-1</sup>
n	taxa de contagem, no instante t	T <sup>-1</sup>
n <sub>0</sub>	taxa de contagem, no instante t = 0	T <sup>-1</sup>
n <sub>BG</sub>	taxa de contagem de radiação de fundo	T <sup>-1</sup>
P	pressão	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
Q	vazão através do meio poroso	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
q	vazão específica	LT <sup>-1</sup>
R <sub>e</sub>	número de Reynolds	
R <sub>∞</sub>	raio infinito	L
r <sub>1</sub>	raio interno do filtro	L
r <sub>2</sub>	raio externo do filtro	L
r <sub>3</sub>	raio externo do pré-filtro	L
S	área da secção transversal, no meio poroso	L <sup>2</sup>
S <sub>p</sub>	área da secção longitudinal do poço	L <sup>2</sup>
T	meia-vida de um isótopo radioativo	T
t <sub>p</sub>	tempo necessário para que o traçador percorra a distância r <sub>1</sub>	T
V	volume do poço onde ocorre a diluição do traçador	L <sup>3</sup>
V <sub>a</sub>	velocidade aparente	LT <sup>-1</sup>
V <sub>D</sub>	velocidade de Darcy	LT <sup>-1</sup>
V <sub>v</sub>	velocidade relativa aos fluxos verticais na coluna piezométrica	LT <sup>-1</sup>
V <sub>m</sub>	velocidade provocada pela agitação para homogeneização do traçador, durante as medições	LT <sup>-1</sup>

SIMBOLO		DIMENSÃO
$V_c$	velocidade produzida pela convecção	$LT^{-1}$
$V_d$	velocidade que tem por causa a difusão molecular do traçador	$LT^{-1}$
$V_t$	volume ocupado pelo traçador, no injetor	$L^3$
$v$	velocidade média de deslocamento da água no solo	$LT^{-1}$
$y$	cota do cristal da sonda cintiladora, durante a calibração	$L$
$Z$	número atômico de um elemento químico	
$z$	carga de elevação	$L$
$\alpha$	fator de correção decorrente da presença do poço	
$\gamma$	peso específico da água	$ML^{-2}T^{-2}$
$\epsilon$	porosidade média do aquífero	
$\eta$	eficiência do detector de radiações	
$\lambda$	constante de desintegração radioativa	$T^{-1}$
$\mu$	viscosidade dinâmica da água	$ML^{-1}T^{-1}$
$\nu$	viscosidade cinemática da água	$L^2T^{-1}$
$\pi$	3,142	
$\rho$	massa específica da água	$ML^{-3}$
$\phi$	carga piezométrica	$L$
$\psi$	coeficiente exponencial da curva de diluição do traçador	$T^{-1}$

## I N T R O D U Ç Ã O

O uso de radioisótopos como traçadores em estudos hidrológicos, é empregado em larga escala em diversos países, principalmente na Europa.

Entre nós, as aplicações tendem a se expandir em decorrência das facilidades cada vez maiores de obtenção do material radioativo, dos equipamentos de detecção, divulgação de técnicas e especialização do pessoal na área de tecnologia nuclear.

Entre as inúmeras aplicações de radioisótopos na hidrologia, muitas delas referem-se ao escoamento subterrâneo, na determinação das características do escoamento e também do meio poroso.

Com base no panorama apresentado, pensou-se em estudar os parâmetros seguintes: a velocidade de Darcy, representada pela Lei de Darcy, a direção e o sentido do fluxo.

O objetivo deste trabalho é servir de roteiro básico para as pessoas que queiram fazer essas determina-

ções na prática, principalmente as que estão se iniciando nas aplicações de técnicas nucleares.

Para tanto, procurou-se dar ênfase aos conceitos de hidrologia e de energia nuclear, à construção de alguns equipamentos específicos, à calibração dos detectores de radiação em laboratório e às aplicações práticas, em pouco.

## CAPÍTULO 1

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 1.1 - Histórico da aplicação da técnica nuclear

O princípio do método da diluição foi apresentado primeiramente por Kocherin, em 1916 e Kol, em 1948. Eles demonstraram, teoricamente, que a vazão através da secção longitudinal de um poço é o dobro da vazão através de uma secção equivalente no meio poroso, onde o fluxo não está perturbado. Essa relação foi confirmada posteriormente por Ogilvi, em 1958. Esse pesquisador, apresentou solução mais genérica das distorções nas linhas de fluxo do campo hidrodinâmico, provocadas pela presença do poço e pela influência da sua construção<sup>1,10</sup>.

Também em 1958, Matveyev e depois Grinbaum, divulgaram as bases teóricas desse método, bem como exemplos de aplicações em investigações hidrogeológicas<sup>16</sup>.

Em geral, o procedimento experimental consis-

tia na coleta de amostras da solução salina e na determinação das condutividades elétricas em laboratório. Fazia-se a avaliação da diluição e conseqüentemente da vazão, por meio das concentrações obtidas.

Esse método permaneceu desacreditado durante alguns anos, porque na maioria dos casos, não apresentava resultados satisfatórios.

Entretanto, desde 1957, Raymond e Moser, juntamente com suas respectivas equipes de colaboradores, propuseram um método com aplicação de radioisótopos para a determinação do fluxo horizontal da água subterrânea. Segundo esses pesquisadores, a vantagem da aplicação de radioisótopos era que as medições poderiam ser realizadas "in-situ", com o mínimo de interferência no meio<sup>23</sup>.

Até o ano de 1963, outros pesquisadores se juntaram aos que trabalhavam nesse campo. Entre eles, Borowczyk, Drost, Guizerix, Halevy, Klotz, Mairhofer, Neumaier, Payne, Rauert, Smith e Zuber. Deve-se ressaltar que muitas dessas pesquisas básicas e aplicadas foram incentivadas pela Agência Internacional de Energia Atômica.

No ano de 1963, Mairhofer, Kratzschmar e Rauert, apresentaram a metodologia de determinações da direção e do sentido do fluxo da água subterrânea, num único poço, fornecendo inclusive idéias para o desenvolvimento de equipamentos<sup>6,10</sup>.

Os primeiros resultados foram publicados e muito bem aceitos pela comunidade tecnológica. O método, salvo pequenas variações, continua sendo utilizado até os dias de hoje.

O método da diluição também tem sido utilizado no Brasil. A Comissão Nacional de Energia Nuclear de São Paulo, CNEN/SP, com a colaboração de Bedmar, A.P; realizou em 1973, um estudo das características dos aquíferos dos vales dos rios Gurguéia e Fidalgo, no Piauí. Na oportunidade, diversos parâmetros dos aquíferos puderam ser determinados.

Outras instituições de pesquisas trabalham nessa área, podendo-se citar por exemplo, o Laboratório de traçadores da COPPE/UFRJ; Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais; CETEC; e o Laboratório de aplicações de radioisótopos à indústria e hidrologia, DEN/UFPE.

## 1.2 - Radiosótopos

### 1.2.1 - Definição de isótopo

Denominam-se isótopos, todos os elementos que possuem o mesmo número atômico  $Z$ , porém distintos números de massa  $M$ , isto é, possuem o mesmo número de prótons e diferentes números de nêutrons. Por exemplo, todos os átomos de iodo têm em seu núcleo 53 prótons ( $Z = 53$ ), porém o número de nêutrons ( $N_e = M - Z$ ) pode ser distinto. Desse modo, para o  $^{127}\text{I}$ , tem-se  $N_e = 127 - 53 = 74$  nêutrons; para o  $^{128}\text{I}$ ,  $N_e = 75$  nêutrons, para o  $^{129}\text{I}$ ,  $N_e = 76$  nêutrons etc.. Todos esses elementos são isótopos do iodo e ocupam mesmo lugar na tabela periódica<sup>3</sup>.

Assim, como o número de prótons é idêntico,

a configuração eletrônica e as propriedades químicas também o serão, mantendo-se distintas as propriedades do núcleo.

### 1.2.2 - Isótopos estáveis e radioativos

O número de isótopos que se conhece, chega a mais de 1.300. Porém, somente parte deles (274, correspondentes a 81 elementos químicos) permanece na natureza, sem alterar-se, durante longos períodos de tempo. Esses isótopos denominam-se "estáveis", por exemplo:  $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ , etc..

Os isótopos do urânio, rádio, tório, polônio etc., não são estáveis, apesar de se encontrarem na natureza, por se transformarem em isótopos de outros elementos, mediante a emissão de radiações. Pode-se medir a velocidade dessa transformação o mesmo sucedendo para os demais isótopos produzidos artificialmente. Os isótopos que têm esse tipo de comportamento são denominados isótopos radioativos ou radioisótopos.

### 1.2.3 - Radioatividade natural e artificial

Entre os isótopos radioativos, alguns se encontram normalmente na natureza e se denominam isótopos radioativos naturais, como o  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  etc.. Os outros, precisam ser produzidos artificialmente, por irradiação de núcleos estáveis nos reatores nucleares ou nos ace

leradores de partículas (cíclotron, Van der Graaff, etc.).

Com a referida irradiação, é possível modificar a configuração dos núcleos estáveis, produzindo-se isótopos radioativos artificiais, como o  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{24}\text{Na}$ , etc..

Atualmente, conhecem-se cerca de 1.030 radioisótopos, dos quais 60, aproximadamente, são naturais. A maioria desses últimos são radioisótopos de número de massa superior a 209 e número atômico superior a 83.

#### 1.2.4 - Lei fundamental da radioatividade

A desintegração radioativa é fenômeno espontâneo e como tal não é influenciada por nenhuma ação externa. A probabilidade de qualquer átomo radioativo desintegrar-se num dado momento é independente do que possa ocorrer nos átomos vizinhos, assim como do estado químico e das condições físicas a que está submetido (pressão, volume, temperatura, etc.).

As desintegrações radioativas ocorrem aleatoriamente e, portanto, obedecem às leis estatísticas. Nunca será possível prever o momento da desintegração de um átomo isolado. Porém, numa amostra, em que existe número muito elevado de átomos, é possível fazer previsão daqueles que se desintegrarão, por unidade de tempo.

Sabendo-se que a probabilidade de desintegração de todos os átomos de um mesmo radioisótopo é idêntica, a fração que se desintegra, por unidade de tempo é sempre

constante. Essa constante denomina-se constante de desintegração e é representada por  $\lambda$ . Cada radioisótopo possui um valor característico de  $\lambda$ .

Considere-se  $N$  o número de átomos radioativos presentes numa amostra. A velocidade com que eles diminuem, por desintegração, isto é, o valor da expressão diferencial,  $-(dN/dt)$ , será igual ao produto de  $N$  pela fração dos átomos que se desintegram na unidade de tempo  $\lambda$ .

Portanto, tem-se:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N, \text{ ou } \frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \quad (1)$$

Esta é a equação fundamental da radioatividade.

Integrando-se a expressão diferencial anterior, obtém-se:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

#### 1.2.4.1 - Meia-vida $T$ do isótopo radioativo

Meia-vida é o tempo necessário para que o número de átomos radioativos, existentes na amostra, se reduza à metade. Da equação (2):

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad \lambda \cdot T = \ln 2 \quad \text{e} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

$$\lambda = \frac{0,693}{T} \quad (3)$$

A meia-vida tem emprego muito prático, pois ao final do tempo  $m$  vezes a meia-vida, teremos:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda m T} \dots N_0 \cdot e^{-\lambda (m \ln 2 / \lambda)} = N_0 \cdot e^{-m \ln 2}$$

$$N = \frac{N_0}{e^{\ln 2^m}} = \frac{N_0}{2^m} \quad (4)$$

#### 1.2.4.2 - Unidades de atividade

Denominamos atividade  $A$ , de uma fonte radioativa, ao número de desintegrações  $dN$ , por unidade de tempo  $dt$ .

Assim,

$$A = - \frac{dN}{dt} \quad (5)$$

De acordo com a equação (2), obtém-se:

$$A = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad A = \lambda \cdot N \quad \text{e} \quad A_0 = \lambda \cdot N_0$$

Portanto:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (6)$$

Esta é a forma mais utilizada para expressar a lei fundamental da radioatividade.

A unidade de atividade é denominada "Curie".

Quando afirmamos que uma fonte possui atividade de 1 Curie, queremos dizer que ela está decaindo em ritmo de  $3,7 \cdot 10^{10}$  de integrações por segundo. A unidade Curie é representada por Ci, sua equivalência e sub-múltiplos estão mostrados na tabela 1.

A atividade existente numa amostra, referida a unidade de volume ou de peso do material onde se encontra o radioisótopo, denomina-se atividade específica. Tem-se:  $\mu\text{Ci/ml}$ ,  $\mu\text{Ci/g}$ , etc.

#### 1.2.5 - Formas de desintegração

As três diferentes espécies de radiação que um radioisótopo pode emitir, ao se desintegrar são partículas alfa, beta e raios gama.

As partículas alfa são núcleos de hélio, contendo cada uma dois nêutrons. Essas partículas têm pouco poder de penetração, sendo facilmente absorvidas em poucos centímetros de ar.

As partículas beta são constituídas por elétrons que têm carga elétrica negativa. Têm poder de penetração superior ao das partículas alfa, mas seu alcance não é tão elevado.

Os raios gama são radiações de natureza eletromagnética, semelhante aos raios-X e possuem grande poder de penetração. Em função dessa característica, os radioisótopos emissores gama têm sido preferidos, para estudos de hidrologia, principalmente em águas subterrâneas.

### 1.3 - Traçadores

#### 1.3.1 - Definição

Com o nome de traçador, designa-se qualquer produto, que, incorporado à massa de uma substância ou a um meio qualquer, permite investigar o comportamento de processos físico ou químico<sup>3</sup>.

Para os propósitos deste trabalho, interessamos conhecer as características dos radioisótopos utilizados no estudo do movimento da água subterrânea.

O uso de traçadores na hidrologia é muito antigo. Tem-se utilizado muitos tipos de traçadores, algumas vezes adicionados ao meio em estudo e, em outras vezes, aproveitando determinadas substâncias que estão presentes no meio, como consequência de processos naturais.

Os traçadores não isotópicos, mais utilizados consistem em determinados compostos químicos, solúveis na água, e facilmente identificáveis, principalmente compostos iônicos e ccrantes.

Entre os traçadores isotópicos, os que mais nos interessam são os traçadores radioativos artificiais, cuja aplicação é objetivo deste trabalho.

### 1.3.2 - O traçador ideal

O traçador ideal para usos hidrológicos deveria cumprir as condições seguintes<sup>3,9</sup>:

- A - Seu comportamento no meio em que se realiza o estudo deve ser idêntico ao da água, isto é, o traçador deve deslocar-se à mesma velocidade. Essa condição exige, por sua vez:
- a) o traçador não deve reagir quimicamente com a água, pois sua identificação posterior pode ser prejudicada;
  - b) não deve reagir quimicamente com os materiais do meio;
  - c) não deve ser adsorvido pelos materiais sólidos do meio, salvo quando se deseja essa propriedade;
  - d) no caso de traçadores iônicos, não devem ocorrer fenômenos de intercâmbio com os átomos do mesmo tipo existentes no meio;
  - e) a quantidade de traçador a ser utilizada, para uma experiência, não deve modificar, de forma significativa, a densidade, viscosidade ou temperatura da água, para não ocorrer alterações no fluxo natural;
  - f) os fenômenos de dispersão e de difusão do traçador devem ser análogos aos das moléculas de água.
- B - Quando se tratar de traçador adicionado ao meio em estudo, este não deve conter nada do mesmo ou somente uma concentração tão baixa que não interfira nos resultados.
- C - Deve ser facilmente solúvel na água.
- D - Deve permitir fatores de diluição muito elevados, isto é, deve permitir marcar grandes volumes de água com pe-

quena quantidade de traçador.

- E - Em muitos casos, é fundamental que o traçador possa ser detectado "in-situ", isto é, sem necessidade de coleta de amostras.
- F - Não deve contaminar o meio durante longos períodos de tempo, para não interferir em experiências futuras.
- G - Deve ser de baixo custo, de fácil manuseio e inócuo para os seres vivos.

### 1.3.3 - Critérios para a escolha do traçador radioativo

São muitos os traçadores radioativos que podem ser utilizados, com resultados satisfatórios, para marcar fluxos superficiais de água, porém poucos quando se trata de águas subterrâneas.

Apresenta-se na tabela 2, relação contendo a maioria dos radioisótopos utilizados como traçadores em estudos hidrológicos, tanto em águas superficiais quanto em águas subterrâneas<sup>9,17</sup>.

Com exceção de alguns casos isolados, onde é de interesse que o traçador seja fixado pelos materiais sólidos do meio, na maioria das aplicações é condição fundamental que o traçador se desloque com a mesma velocidade das moléculas de água.

A perda de traçador, por absorção, troca iônica, etc. é proporcional ao tempo e a superfície de contacto traçador-sedimentos. Fixando-se a distância que o traçador

deve percorrer, sua velocidade de deslocamento ao longo do aquífero é que determinará o tempo de contacto com os sedimentos. A velocidade é proporcional ao gradiente hidráulico e permeabilidade.

As soluções, sólidas e colóides que conformam os aquíferos ou estratos permeáveis têm capacidade para fixar ou intercambiar os íons presentes na água. Na maioria das vezes, simultaneamente, há dois tipos de interação: a adsorção física e a absorção química.

A primeira, regida pelas leis de Van der Waals, estabelece uma união entre o absorvedor e o absorvido, que em muitos casos, fixa transitoriamente o traçador, retardando seu caminhar e introduzindo erros no cálculo da velocidade. A absorção química é uma união a nível de camada eletrônica mais forte, que ocorre na superfície ou no interior do absorvedor.

A absorção física ou química verifica-se, mais intensamente em estratos que contém argilas, colóides, substâncias orgânicas (humus, por exemplo), minerais de ferro, etc..

As argilas e materiais orgânicos dão origem a colóides eletronegativos, que fixam preferencialmente os cátions. Assim, em primeira seleção de traçadores, excluem-se os cátions, nos casos de percursos longos ou permanência prolongada em águas subterrâneas.

Alguns aluminatos formam colóides eletropositivos e outros minerais dão origem a colóides anfóteros. Em regiões onde esses minerais existem em abundância, não é aconselhável o uso de traçadores aniônicos, ficando a esco-

lha para os traçadores naturais, como o trítio,  $^3\text{H}$ . De acordo com o tipo de argila (caolinita, vermiculita, ilita) varia a capacidade da troca de cátions.

O grau de fixação dos cátions depende, também da sua valência. De modo geral, pode-se dizer que os bivalentes são mais fixados que os monovalentes. Em locais onde existem materiais orgânicos em abundância, tais como estratos que contêm humus, turfa, etc., a capacidade de troca é muito grande. Os colóides eletronegativos que existem nas argilas e compostos húmicos superficiais, ou pouco profundos, têm capacidade de retenção muito elevada.

A fixação de íons marcados nos estratos depende, particularmente, da natureza desses últimos e das condições físicas e químicas reinantes no meio (temperatura, pressão, precipitação, etc.). Outro fator importante é a concentração do traçador na água, pois quanto maior seu valor, menor é o efeito da fixação.

Nos casos em que existe abundância de determinado elemento, e se estabeleceu equilíbrio geoquímico entre este elemento e o solo, pode-se usar como traçador um radioisótopo do elemento considerado (exemplo, o  $^{24}\text{Na}$  em água saturada de sódio e cálcio).

Outro fator que pode influir consideravelmente na retenção do traçador é a porosidade. Fixando-se a distância a ser percorrida pelo traçador, quanto maior for a porosidade, menor será o tempo de contacto ou possibilidade de intercâmbio. Independentemente do tempo de contacto, comprovou-se, que em argilas de iguais composição química, mas de distintas granulometrias, a retenção do traçador praticamente não varia.

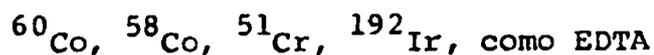
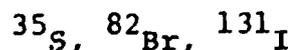
A troca iônica depende, também, da concentração dos íons na água. A absorção relativa é maior quando a solução se apresenta muito diluída. Por esta razão, é conveniente adicionar à solução marcada, considerável quantidade de traçador.

Em alguns casos, a escolha do traçador radioativo é complexa e necessita-se de estudos prévios de laboratório, de campo ou de ambos, para comprovar o comportamento do soluto (traçador em determinada forma química) em relação ao absorvedor e solvente (água).

Pode-se afirmar, entretanto, que o trítio  $^3\text{H}$ , é o único traçador que dispensa comprovação prévia, por ser parte constituinte da água.

De modo geral, pode-se dizer que o trítio é utilizado em qualquer aquífero e com qualquer tipo de água (desmineralizada, subterrânea, superficial, marítima, etc.).

Os radioisótopos:



têm, em geral, elevado rendimento e se fixam pouco em qualquer tipo de estrato.

Em resumo, as propriedades descritas podem ser obtidas na coluna (6) da tabela 2, cujos dados foram comprovados por diversas aplicações práticas<sup>9</sup>.

#### 1.3.4 - Concentração máxima permissível

Os níveis máximos permissíveis, que constam na coluna (4) da tabela 2, correspondem à dose máxima de irradiação que os operadores podem receber, trabalhando quarenta horas por semana, nas imediações do local.

Esses valores, devem ser reduzidos, por motivo de precaução, quando o trabalho é realizado em locais cuja água é utilizada para consumo humano.

#### 1.3.5 - Vantagens da utilização do traçador radioativo

Entre as vantagens, destacam-se:

a) a extraordinária sensibilidade de medida, que permite diluições extremas. Sabe-se que 1 Ci de  $^{131}\text{I}$ , permite marcar  $10.000 \text{ m}^3$  de água, aproximadamente. Para efetuar marcação semelhante com traçador não isotópico, como fluoresceína ou dicromato de potássio, seriam necessários 500 Kg, aproximadamente, desses produtos<sup>3</sup>;

b) a possibilidade de medida "in-situ";

c) a vida limitada do traçador, podendo ser escolhido de acordo com a duração prevista para a experiência. Esta vantagem tem valor decisivo quando se trata de águas subterrâneas pois elas são de renovação lenta, e ficariam contaminadas muito tempo se fossem usados traçadores de vida longa. Um critério razoável para a escolha do radioisótopo é basear-se na meia-vida que deve ser compatível

com a duração da experiência;

d) a medida é seletiva, isto é, não há possibilidade de interferências de outros materiais contidos na água, radioativos ou não. Mediante o emprêgo da espectrometria de raios gama, pode-se identificar um traçador de forma inequívoca, o que permite utilizar dois ou mais traçadores simultaneamente;

e) um mesmo traçador pode ser utilizado em diferentes formas químicas, sem que haja modificação na sensibilidade de medida.

#### 1.3.6 - Desvantagens da utilização do traçador radioativo

Entre as desvantagens, destacam-se:

a) a necessidade de autorização legal para a aquisição e aplicação;

b) no caso de traçadores de meia-vida curta, é necessário que o intervalo de tempo entre a aquisição e a utilização seja bem curto;

c) o custo do equipamento de detecção é maior do que o utilizado para os traçadores não radioativos.

#### 1.3.7 - Disponibilidade e custo

No planejamento de campanhas de aplicação de

traçadores radioativos, é muito importante levar-se em conta dois fatores que são a disponibilidade e o custo.

Mostra-se na tabela 3, alguns radioisótopos produzidos rotineiramente no reator de pesquisas da Comissão Nacional de Energia Nuclear de São Paulo, CNEN/SP, com as respectivas formas químicas mais usuais em hidrologia.

Os custos desses radioisótopos podem ser considerados baixos, relativamente à qualidade dos dados que eles permitem obter. Os preços médios aproximados, vigentes atualmente nos contratos de prestação de serviços estão relacionados na tabela 4.

Para quantidades superiores a 5 mCi, deve-se acrescentar ao preço de 5 mCi, a importância de 0,11 ORTN por mCi adicional<sup>4</sup>.

Entretanto, caso a atividade desejada seja muito superior às disponíveis, ou ainda, o radioisótopo não pertença à lista de produção rotineira, deve-se fazer solicitação especial à CNEN/SP, indicando a natureza do radioisótopo, a forma química, a atividade e a data da utilização como traçador.

#### 1.4 - O ciclo hidrológico

A hidrologia é a ciência que trata da ocorrência e do movimento das águas, sobre e sob a superfície da terra. Ela se preocupa em melhorar as várias formas de medir essas ocorrências e com as transformações entre os estados líquido, sólido e gasoso da água, na atmosfera e na

---

superfície<sup>26</sup>.

O modelo conceitual básico em hidrologia é o do ciclo da água, em suas formas gasosa, líquida e sólida. A figura 1, mostra os principais componentes desse ciclo. As águas superficiais se evaporam, permanecem armazenadas como umidade atmosférica e se depositam novamente como precipitações na forma de neve, granizo, chuva ou orvalho. Se os recursos hídricos da Terra fossem considerados em termos de orçamento, a chuva se constituiria no maior valor do lado da receita. No entanto, a maior parte da chuva que cai não alcança imediatamente o curso dos rios, mas se perde por evaporação, transpiração e infiltração nas reservas de umidade do solo ou por infiltração mais profunda, no subsolo, através das rochas permeáveis. A água excedente flui diretamente para os cursos d'água, lagos e rios.

Um dos problemas principais da hidrologia é definir a relação entre o "input" da chuva e o "output" representada pelo escoamento direto. Em decorrência de numerosos fatores intervenientes, da complexidade do inter-relacionamento entre eles e dos problemas envolvidos nas suas medições, a natureza desta relação é ainda pouco compreendida.

A falta de dados hidrometeorológicos representativos impedem maior compreensão dos processos hidrológicos. Grandes áreas do globo, principalmente sobre os oceanos, não possuem postos de registro e muitos deles operam apenas instrumental limitado. Procurou-se suprir esta deficiência, pelo trabalho realizado durante o Decênio Hidrológico Internacional (1965-1975) e, cada vez mais, por informações censoreadas indiretamente pelos satélites e naves

espaciais. O volume crescente de dados recebidos por essas novas fontes, está criando problemas, tanto de processamento como de análise e, por isso, métodos convencionais de computação manual vem sendo suplementados por técnicas de computação eletrônica. Estas técnicas tornaram os cálculos de rotina menos trabalhosos, e permitiram a evolução de novas técnicas que parecem contribuir para melhor compreensão dos princípios hidrológicos fundamentais<sup>19</sup>.

#### 1.4.1 - Infiltração

Denomina-se infiltração o fenômeno de penetração da água pelas camadas de solo próximas à superfície do terreno movendo-se para baixo, através dos vazios, sob a ação da gravidade, até atingir uma camada impermeável que a retém, formando então a água do subsolo<sup>24</sup>.

Na infiltração destacam-se três fases:

- a) fase de intercâmbio;
- b) fase de descida;
- c) fase de circulação.

Na fase de intercâmbio, a água encontra-se próxima à superfície do terreno, sujeita a retornar à atmosfera por aspiração capilar, provocada pela ação da evaporação ou absorvida pelas raízes das plantas e, em seguida, transpirada pelos vegetais.

Na fase de descida, ocorre deslocamento vertical da água quando a ação de seu peso próprio supera a ade

são e a capilaridade. Esse movimento se efetua até ela atingir uma camada suporte de solo impermeável.

Na fase de circulação, o acúmulo da água constitui lençóis subterrâneos, aquífero subterrâneo ou simplesmente água subterrânea, cujo movimento se deve também à ação da gravidade, obedecendo às leis do escoamento subterrâneo.

#### 1.4.2 - A água subterrânea

A maior parte da água subterrânea é consequência da infiltração proveniente diretamente da precipitação ou dos cursos d'água e lagos, após o escoamento superficial, como parte do ciclo hidrológico. A limitação da quantidade de água subterrânea é, consequência da geologia local (capacidade de infiltração e armazenamento) e do regime de precipitação (recarga do lençol).

As águas subterrâneas, em menor proporção podem ter outra origem, porém dadas as suas características não servem como água potável (frequentemente são mineralizadas em excesso) e podem, poluir as águas subterrâneas de origem meteórica. São as águas conatas (presentes por ocasião da formação das rochas) e as águas juvenis (formadas quimicamente no interior da Terra).

Os lençóis subterrâneos podem ser de dois tipos:

a) freático, quando a sua superfície é livre e está sujeita à pressão atmosférica;

b) artesiano, quando está confinado entre duas camadas impermeáveis, sendo a pressão, na superfície superior, diferente da atmosférica.

Nos lençóis de água freáticas podem ser distinguidas duas zonas. A primeira é constituída pela parte superior, ocupada pela água de capilaridade, que forma uma franja, cuja altura depende do material do solo, atingindo valores variáveis entre 300 e 600 mm para areias finas até 3.000 mm para argilas. A segunda zona é ocupada pela água do lençol situada entre a franja e a superfície da camada superior impermeável<sup>2</sup>.

Uma das principais características do movimento da água subterrânea é a baixa velocidade de escoamento. Entretanto, como as secções transversais por onde ela se escoam são muito grandes, verifica-se que há ocorrência de significativo transporte de água.

#### 1.4.3 - Lei de Darcy

Em 1856, Henry Darcy investigou o fluxo de água em filtros verticais de areia, em conexão com as fontes de cidade de Dijon, França, sendo o primeiro pesquisador a estabelecer uma equação para quantificar o movimento da água, em meios porosos saturados.

Dessas experiências, Darcy concluiu que a vazão  $Q$ , isto é, o volume d'água que flui através do filtro, por unidade de tempo é: proporcional à área da secção transversal  $S$  e a perda de carga  $(h_1 - h_2)$  e inversamente pro-

porcional ao comprimento  $L$ . O significado dos símbolos referidos atrás, encontra-se representado na figura 2a.

Quando combinados, esses parâmetros permitem definir a equação ou Lei de Darcy<sup>2,25,26</sup>:

$$Q = K.S. \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (7)$$

Pode-se reconhecer que  $h$ , é a carga piezométrica e  $(h_1 - h_2)$  a diferença da carga piezométrica que atua na secção transversal do meio filtrante, de comprimento  $L$ .

Como a carga piezométrica representa em termos de carga de água, a soma da energia de pressão e o potencial do fluido, por unidade de peso,  $(h_1 - h_2)/L$ , é interpretado como sendo gradiente hidráulico.

Assim, denominando  $I$  o gradiente hidráulico e definindo a descarga específica  $q$ , como o volume de água que passa por unidade de tempo, através da área transversal de secção unitária, normal à direção do fluxo, tem-se:

$$q = KI \quad (8)$$

onde:

$$q = \frac{Q}{S}; \quad I = \frac{(h_1 - h_2)}{L}$$

A expressão (8), é uma outra forma da equação de Darcy.

A figura 2b, representa a Lei de Darcy estendida ao fluxo através de um meio poroso, homogêneo e incli-

nado. Tem-se neste caso:

$$q = K \frac{(\phi_1 - \phi_2)}{L} = K.I \quad (9)$$

onde:

$$\psi = z + \frac{p}{\gamma}$$

A perda de carga  $\Delta\psi = \psi_1 - \psi_2$ , é provocada pelo atrito do fluxo d'água através dos caminhos estreitos e sinuosos do meio poroso.

Observa-se também, que na Lei de Darcy, despreza-se a energia cinética da água. Isto é possível sempre porque em geral, as mudanças na carga piezométrica, ao longo do fluxo, são bem maiores do que as mudanças na energia cinética<sup>2</sup>.

O quociente  $p/\gamma$ , que aparece na equação (9), é denominado carga de pressão. Ele representa a energia de pressão por unidade de peso do fluido que circula na secção transversal, por unidade de tempo.

A altura  $z$ , representada na figura 2b ( $z_1$  para o ponto 1 e  $z_2$  para o ponto 2) refere-se a carga de elevação que é a energia potencial por unidade de peso da água.

A soma da carga de pressão com a carga de elevação representa a carga piezométrica.

Os valores da vazão específica  $q$ , indicados nas equações (8) e (9), mesmo tendo dimensões de velocidade, não representam, na realidade, a velocidade com que a água se move dentro do solo.

A velocidade média  $v$ , de deslocamento da água no solo, é representada pela relação entre o volume  $Q$ , de água que passa por unidade de tempo e a área  $\epsilon S$ , disponível ao fluxo, sendo  $\epsilon$ , a porosidade média, considerada igual a porosidade volumétrica. Assim, tem-se:

$$v = \frac{Q}{\epsilon \cdot S} = \frac{q}{\epsilon} \quad (10)$$

A equação experimental do movimento da água, no meio poroso sob forma da Lei de Darcy é limitada ao fluxo uni-dimensional de um fluido homogêneo e incompressível. Quando o fluxo é tri-dimensional, a generalização das equações (9) e (10) é:

$$\vec{q} = K \cdot \vec{I} = - \text{grad } \phi; \vec{v} = \frac{\vec{q}}{\epsilon} \quad (11)$$

onde  $v$ , é o vetor velocidade com componentes  $v_x$ ,  $v_y$  e  $v_z$ ;  $\vec{q}$ , é o vetor descarga específica com componentes  $q_x$ ,  $q_y$  e  $q_z$ , na direção das coordenadas cartesianas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , e  $\vec{I} = \text{grad } \phi = - \nabla \phi$  é o gradiente hidráulico com componentes  $I_x = \partial \phi / \partial x$ ,  $I_y = \partial \phi / \partial y$  e  $I_z = \partial \phi / \partial z$  nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente.

Quando o fluxo ocorre em meio homogêneo isotrópico, o coeficiente  $K$ , é uma escalar constante e a equação (11) pode ser escrita do modo seguinte:

$$\begin{aligned} q_x &= K \cdot I_x = - K \frac{\partial \phi}{\partial x} = \epsilon \cdot v_x; \\ q_y &= K \cdot I_y = - K \frac{\partial \phi}{\partial y} = \epsilon \cdot v_y; \\ q_z &= K \cdot I_z = - K \frac{\partial \phi}{\partial z} = \epsilon \cdot v_z \end{aligned} \quad (12)$$

As equações (11) e (12) também são válidas para fluxo tri-dimensional através de meios heterogêneos, onde  $K = K(x,y,z)$ , análogo ao caso do meio isotrópico.

Embora a equação (12) seja apresentada como generalização formal da equação do movimento uni-dimensional para o fluxo tri-dimensional, existe grande número de teorias que apoiam essa extensão<sup>2,25</sup>.

#### 1.4.3.1 - Intervalo de validade da Lei de Darcy

Quando a descarga específica  $q$ , aumenta, a relação entre esta variável e o gradiente hidráulico  $I$ , se desvia da relação linear expressa pela Lei de Darcy, na forma das equações (8) ou (12). A figura 3 mostra esse desvio. Portanto, parece razoável definir o intervalo de validade para a lei linear de Darcy.

Em fluxos que se escoam em condutos, usa-se o número de Reynolds  $R_e$  (adimensional que expressa a relação entre as forças inerciais e as viscosas que atuam no fluido), como critério para se distinguir entre o fluxo laminar que ocorre às baixas velocidades e o fluxo turbulento provocado pelas altas velocidades.

O valor crítico de  $R_e$ , entre os fluxos laminar e turbulento, em condutos forçados circulares, é 2.000 aproximadamente. Por analogia, define-se um número de Reynolds para fluxos através de meios porosos:

$$R_e = \frac{q \cdot d}{\nu} \quad (13)$$

onde:

$d$  = dimensão representativa do meio poroso.

Por analogia ao número de Reynolds em tubulações,  $d$ , deveria ser dimensão representativa da secção transversal de um canal elementar do meio poroso. É costume empregar para  $d$ , dimensão representativa dos grãos, provavelmente pela relativa facilidade de determiná-lo.

Frequentemente, usa-se o diâmetro médio do grão  $d_m$ , na equação (13). Algumas vezes,  $d_{10}$ , considerado o diâmetro tal que 10% em peso dos grãos são menores do que esse diâmetro, é mencionado na literatura como sendo o parâmetro representativo do grão.

Com respeito às várias definições para  $d$ , praticamente todas as evidências indicam que a Lei de Darcy é válida na região em que o número de Reynolds não excede valores entre 1 e  $10^{2,15,25}$ .

No intervalo de validade da Lei de Darcy, as forças viscosas são predominantes. Quando a velocidade do fluxo aumenta, é observada uma região de transição gradual, a partir do fluxo laminar, onde as forças viscosas são predominantes, mas sofrem influências das forças inerciais.

Frequentemente, menciona-se o valor  $R_e = 100$  como limite superior para essa região de transição, na qual a Lei de Darcy já não é mais válida. Para valores elevados de  $R_e$ , por exemplo  $R_e > 150 - 300$ , o fluxo torna-se fracamente turbulento.

A maioria dos fluxos da água subterrânea pertencem ao regime laminar, onde se aplica a Lei de Darcy. Po-

dem ocorrer fluxos com elevados  $R_e$ , principalmente em formações cársticas.

#### 1.4.3.2 - Coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de proporcionalidade  $K$ , que aparece nas várias formas da Lei de Darcy, é conhecido por coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica. Em meio isotrópico, êle pode ser definido a partir da equação (8), como sendo a descarga específica por unidade de gradiente hidráulico. Sua dimensão escalar (L/T), expressa a facilidade com que o fluido se desloca através do meio poroso. Portanto,  $K$  é coeficiente que além do meio poroso, depende também das propriedades do fluido.

As propriedades mais relevantes do fluido são a massa específica  $\rho$ , e a viscosidade dinâmica  $\mu$ , ou na forma combinada, a viscosidade cinemática  $\nu$ .

As propriedades mais notáveis do meio poroso, são a distribuição granulométrica dos grãos ou poros, sinuosidades, área específica e porosidade.

O coeficiente de permeabilidade  $K$ , pode ser expresso como<sup>18,25</sup>:

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} = \frac{k \cdot g}{\nu} \quad (14)$$

Com a equação (14), a Lei de Darcy, representada pela equação (11), pode ser escrita como:

$$q = -\left(\frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu}\right) \text{ grad } \phi \quad (15)$$

Na prática, utilizam-se várias unidades para o coeficiente de permeabilidade K. Os hidrologistas preferem a unidade m/dia. Os engenheiros de solos frequentemente utilizam cm/s.

### 1.5 - Métodos clássicos de determinação da velocidade de Darcy

Em geral, os métodos clássicos não permitem determinar diretamente a velocidade de Darcy, mas sim, indiretamente, pelos conhecimentos do coeficiente de permeabilidade K, e do gradiente hidráulico I, cujo produto de acordo com a equação (8), representa a velocidade.

O coeficiente de permeabilidade K, depende, como vimos, das características do fluido e do meio poroso. Na equação (14), as características do meio poroso são representadas pelo coeficiente k, denominado permeabilidade intrínseca.

Diversas fórmulas, relacionando a permeabilidade intrínseca com as propriedades do meio poroso, estão presentes na literatura. Algumas são empíricas, como por exemplo<sup>18,25</sup>;

$$k = c \cdot d^2 \text{ (cm}^2\text{)} \quad (16)$$

onde:

C = coeficiente cujo valor está compreendido entre 45, para areias argilosas e 140, para areias puras;

d = diâmetro efetivo dos grãos  $d_{10}$ , (cm).

Outro exemplo é a fórmula de Fair e Hatch, desenvolvida a partir de considerações dimensionais e verificada experimentalmente<sup>18,25</sup>:

$$k = \frac{1}{\beta} \left| \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \left| \frac{\epsilon}{100} \sum \frac{P_m}{d_m} \right|^2 \right|^{-1} \quad (17)$$

onde:

$\beta$  = coeficiente que depende do arranjo das partículas, cujo valor obtido experimentalmente é igual a 5;

$\theta$  = coeficiente que depende da forma das partículas, variando entre 6,0 para grãos esféricos a 7,7 para grãos angulares;

$P_m$  = percentagem de areia, em peso, retida entre cada par de peneiras adjacentes;

$d_m$  = média geométrica  $(d_1 d_2)^{0,5}$ , entre as aberturas do par de peneiras adjacentes;

$\epsilon$  = porosidade.

Obtiveram-se também algumas fórmulas puramente teóricas, a partir de deduções da Lei de Darcy. Frequentemente, tais fórmulas incluem coeficientes numéricos, que precisam ser determinados empiricamente. Um exemplo é a

equação de Kozeny-Carman:

$$k = C_o \cdot \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2 \cdot M_s^2} \quad (18)$$

onde:

M = área específica do meio poroso;

C<sub>o</sub> = coeficiente cujo valor sugerido por Carman é de 0,2;

ε = porosidade.

Em laboratório, determina-se o coeficiente de permeabilidade por meio de permeâmetros. Diversos tipos de permeâmetros têm sido usados, porém, todos se assemelham ao da figura 2a<sup>15</sup>.

O princípio de funcionamento basea-se na colocação de amostra de solo em um recipiente e a subsequente medição da vazão de água Q, que escoar através dela, sob pressão de carga conhecida. Calcula-se K, por meio da equação (7).

Na determinação do coeficiente de permeabilidade, por esse método, deve-se levar em conta, que o resultado obtido pode não representar as características médias do aquífero, em decorrência do pequeno tamanho da amostra.

As medidas de permeabilidade no campo são, em geral, feitas por meio de ensaios de bombeamento, ou de permeâmetros "in-situ".

Nos ensaios de bombeamento, calcula-se o coe-

ficiente de permeabilidade a partir do conhecimento da vazão de bombeamento, das características construtivas do poço e do rebaixamento do nível d'água, medido em piezômetros.

Os permeâmetros "in-situ", são furos de sondagem com características construtivas especiais. Obtém-se o coeficiente de permeabilidade por meio de fórmulas práticas que dependem, além dos parâmetros construtivos do piezômetro, da variação da carga piezométrica com o tempo. Determina-se a carga piezométrica enchendo-se o furo, com água, e medindo-se a velocidade com que ela se infiltra no solo.

Todos os métodos apresentados, exceções feitas ao bombeamento e do permeâmetro de laboratório, também requerem o conhecimento do gradiente hidráulico  $I$ , para a determinação da velocidade de Darcy.

#### 1.6 - Método clássico das determinações da direção e do sentido do fluxo

Para se usar este método, torna-se necessário dispor de curvas de nível do lençol subterrâneo, em vários pontos da área onde se quer determinar a direção e o sentido do fluxo.

Faz-se o levantamento dos níveis do lençol subterrâneo mediante perfurações de piezômetros e medições da cota de cada nível, em relação a certo referencial.

Unindo-se os pontos que representam mesmo valor, obtém-se as curvas de nível do lençol subterrâneo, como

se mostra na figura 4, também conhecidas por curvas equipotenciais<sup>5,25</sup>.

Determina-se a direção do fluxo, num ponto qualquer, traçando-se uma normal à equipotencial que passa por esse ponto. O conjunto de normais, assim obtidas, constituem as linhas de fluxo da água subterrânea.

O sentido do fluxo evidentemente é na direção das cotas de menores níveis.

### 1.7 - Método de determinação da velocidade de Darcy, com utilização de traçadores radioativos

#### 1.7.1 - Princípios do método

Determina-se a velocidade de Darcy por meio de técnicas de diluição, como segue-se: Introduce-se um radioisótopo no poço, provido ou não de filtro, providenciando-se a homogeneização dele para que toda coluna piezométrica fique marcada.

O fluxo existente, leva o traçador para o meio poroso, nas vizinhanças da parede do poço, ocasionando diminuição da sua concentração ao longo da coluna piezométrica.

O decréscimo da concentração do traçador, medido convenientemente, é função da velocidade de Darcy, e de vários outros parâmetros, incluindo-se os detalhes construtivos do poço.

A equação que expressa a interdependência desses valores basea-se nas hipóteses seguintes<sup>3,7,16,20</sup>:

a) o decréscimo da concentração do traçador é proporcional à velocidade de Darcy, no meio poroso;

b) o fluxo é estacionário, isto é, a vazão  $Q$ , é constante;

c) o volume onde ocorre o decréscimo da concentração é limitado à coluna piezométrica do poço;

d) o poço é idealmente permeável e atravessa o aquífero até alcançar uma camada suporte, impermeável.

Denominado-se  $H$ , a altura da coluna piezométrica, onde ocorre a diluição e  $D_p$  o seu diâmetro, tem-se por volume  $V = \pi(D_p^2/4)H$  e por secção longitudinal,  $S_p = D_p H$ .

Considera-se também que a concentração  $C$ , do traçador, contida no volume  $V$ , num certo instante  $t$ , seja representada pela relação:

$$C = \frac{A}{V} \quad (19)$$

Derivando-se a equação (19), em relação ao tempo e considerando-se  $Q = dV/dt$ , e que o radioisótopo tenha meia-vida  $T$ , infinita, tem-se<sup>3</sup>:

$$\frac{dC}{dt} = - A \cdot V^{-2} \cdot \frac{dV}{dt} = - \frac{A \cdot Q}{V \cdot V} \quad (20)$$

Introduzindo-se a equação (19) na equação (20), obtém-se:

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{C \cdot Q}{V} \text{ ou } \frac{dC}{C} = - \frac{Q}{V} \cdot dt \quad (21)$$

Integrando-se ambos os membros e sabendo-se que  $Q = v_a S_p$  e  $V = \pi(D_p^2/4)H$ , chega-se a:

$$\frac{C}{C_o} = \exp\left(-\frac{4v_a}{\pi D_p} \cdot t\right) \quad (22)$$

O coeficiente exponencial pode ser representado por:

$$\psi = -\frac{4v_a}{\pi D_p} \quad (23)$$

Define-se a velocidade aparente  $v_a$ , por:

$$v_a = -\frac{\pi \cdot D_p \cdot \psi}{4} \quad (24)$$

A velocidade aparente  $v_a$ , representada pela equação (24) somente caracteriza o fluxo na secção longitudinal  $S_p$ , do poço. Essa velocidade pode diferir consideravelmente da velocidade de Darcy, no meio poroso.

A diferença entre as velocidades aparente  $v_a$ , e a velocidade de Darcy, é causada pela presença do poço, que por ser constituído de filtro e pré-filtro (geralmente de coeficientes de permeabilidade muito diferentes do meio poroso), perturba as linhas de fluxo.

O decréscimo da concentração do traçador na coluna piezométrica do poço não é causado somente pelo fluxo horizontal da água subterrânea, mas também pelo fluxo vertical, pela agitação provocada para a homogeneização duran-

te as medições, pela convecção decorrente de diferenças de temperatura e densidade, e pela difusão molecular do traçador.

A interação entre esses parâmetros não é bem conhecida, mas admite-se que não há interação entre ele e que o efeito ocorre na mesma direção. Assim sendo vale, em primeira aproximação, a equação seguinte<sup>3,7,10</sup>:

$$V_a = \alpha V_D + V_v + V_m + V_c + V_d \quad (25)$$

Diversos pesquisadores, estudaram em laboratório, as distorções das linhas de fluxo que interceptam um poço e mostraram que ao se aproximarem do poço, elas sofrem contração, provocando aumento na velocidade do fluxo.

Deste modo, demonstrou-se que o fator de correção  $\alpha$ , representa a relação entre a largura da nuvem de um traçador e o diâmetro interno da perfuração. Para essa conclusão, considerou-se nulo os valores de  $V_v$ ,  $V_m$ ,  $V_c$  e  $V_d$ , da equação (25).

Para os poços mais simples, constituídos por furos que interceptam as linhas de fluxo, obtiveram-se para  $\alpha$ , o valor  $\alpha = 2$ .

Porém, na prática, tais poços são impraticáveis, visto que os materiais finos do meio poroso são carregados para o interior do poço, aumentando a turbidez da água e assoreando o poço.

Para eliminar esses inconvenientes, em geral provém-se os poços de dois filtros de transição. O primeiro é denominado filtro e o segundo pré-filtro.

O filtro é constituído por tubo perfurado ou ranhurado e alguns modelos estão mostrados na figura 5. O material é bem variado, indo do PVC até ao aço inoxidável.

O pré-filtro, definido a partir das características do filtro e do meio poroso, é geralmente feito com areia tendo por função principal não permitir a passagem de materiais finos provenientes do meio poroso.

A distorção das linhas de fluxo, em poço revestido somente com filtro, foi apresentada teoricamente por Ogilvi, em 1958. O valor de  $\alpha$ , é calculado pela expressão seguinte<sup>3,7,10</sup>:

$$\alpha = \frac{4}{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{K}{K_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]} \quad (26)$$

Se, além do filtro, existir o pré-filtro, o valor de  $\alpha$ , pode ser obtido pela expressão desenvolvida com base na teoria potencial:

$$\alpha = \frac{8}{\left(1 + \frac{K}{K_2}\right) \left\{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{K_2}{K_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]\right\} + \left(1 - \frac{K}{K_2}\right) \left\{\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 + \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \frac{K_2}{K_1} \left[\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]\right\}} \quad (27)$$

A figura 6, ilustra um corte típico da secção transversal de poço, com filtro e pré-filtro, bem como as linhas de fluxo no meio poroso e nos filtros, obtidas com uso de traçadores corantes. Indica-se também, a largura do aquífero  $2\alpha r_1$ , cujas linhas de fluxo estão distorcidas pela

presença do poço.

#### 1.7.1.1 - Coeficiente de permeabilidade do filtro

Determina-se o coeficiente de permeabilidade do filtro  $K_1$ , experimentalmente em laboratório, ou teoricamente, a partir de fórmulas matemáticas expressas em função dos parâmetros construtivos e das características do escoamento.

Em laboratório, obtém-se  $K_1$ , a partir do conhecimento de todos os outros parâmetros da equação (27). Neste caso, obtém-se  $\alpha$ , com uso de traçadores corantes, que permitem verificar a posição das linhas de fluxo, semelhantes às da figura 6.

Entre as fórmulas teóricas, para o cálculo de  $K_1$ , uma das mais conhecidas é a de Koch<sup>7,10</sup>:

$$K_1 = \frac{f \cdot \rho \cdot g \cdot r_H^2}{S \cdot T \cdot \mu} \quad (28)$$

onde:

$f$  = relação entre a área perfurada e a área total do filtro;

$\rho$  = massa específica da água;

$g$  = aceleração da gravidade;

$r_H$  = raio hidráulico das perfurações ou ranhuras;

$S$  = coeficiente de resistência das perfurações ou ranhuras;

$\mu$  = viscosidade dinâmica da água;

$T$  = coeficiente de resistência do filtro.

Em muitos casos, o índice de 10% de perfurações no tubo do filtro, em área, são suficientes quando se utilizam areias permeáveis no pré-filtro. Para areias altamente permeáveis, recomenda-se aumentar esse índice para 20% ou 30%.

#### 1.7.1.2 - Coeficiente de permeabilidade do pré-filtro e do meio poroso

De acordo com a equação (27), os coeficientes de permeabilidade do aquífero  $K$ , do pré-filtro  $K_2$  e do filtro  $K_1$ , precisam ser conhecidos, para se calcular  $\alpha$ . Por outro lado, frequentemente se determina  $K$ , pela equação (7), de Darcy, desde que se conheça a velocidade  $V_D$ .

Para examinar essa questão básica de aplicabilidade do método, calculou-se  $\alpha$  a partir da equação (27), como função dos parâmetros  $K_2/K_1$  e  $K/K_2$ . Os resultados dessas análises estão mostrados nas figuras (7) a (11)<sup>7</sup>.

As figuras (7), (8) e (9), mostram como varia  $\alpha$ , em função das dimensões relativas  $r_2/r_3$ , do pré-filtro. Observa-se que  $\alpha$ , aumenta quando  $r_2/r_3$  diminui. Este fato também pode ser constatado na ilustração das linhas de fluxo da figura 6, obtidas com uso de traçadores corantes. Quanto maior a espessura do pré-filtro, maior a perturbação sofrida pelo fluxo.

Quando a relação  $K_2/K_1$  tende para valores menores do que 1, e  $K/K_2$  para 0,1,  $\alpha$  pode ser considerado independente dos coeficientes de permeabilidade, desde que se

aceite erro máximo da ordem de 10%. Significa que se:

$$K_1 \geq K_2 \geq 10K \quad (29)$$

A equação (27), pode ser simplificada para:

$$\alpha = \frac{4}{1.1 + 0,9 \left( \frac{r_1}{r_3} \right)^3} \quad (30)$$

A condição estabelecida em (29) pode ser facilmente conseguida na prática, principalmente  $K_2 \geq 10K$ , pois em geral, conhecem-se as granulometrias dos materiais do pré filtro e do meio poroso. Então, é possível relacionar os coeficientes de permeabilidade, em primeira aproximação, pelas equações apresentadas no capítulo 1.5.

Se a condição  $K_1 \geq K_2$  não for satisfeita,  $\alpha$  deverá ser calculado pela equação (27).

A vantagem da utilização da equação (30), no cálculo de  $\alpha$ , é que os valores absolutos dos coeficientes de permeabilidade não precisam ser conhecidos.

### 1.7.2 - Influência do fluxo vertical

Quando um poço intercepta dois ou mais aquíferos e há diferença de carga piezométrica entre eles, poderão ocorrer fluxos verticais cuja consequência é o aumento da velocidade aparente  $V_a$ , provocada pelo aumento da di-

lução do traçador.

A velocidade vertical  $V_v$ , da equação (25), é de difícil determinação e por isso, procura-se minimizar sua influência por meio de técnicas especiais.

A técnica mais utilizada, consiste em dispositivo obturador que impõe grande perda de carga ao fluxo, provocando obstrução da passagem do fluxo vertical. Os obturadores, um em cima e outro em baixo do volume de diluição, conforme sugestão de diversos pesquisadores, estão representados esquematicamente na figura 12<sup>6</sup>.

Ensaio em laboratório e experiências de campo mostraram que não se elimina totalmente o fluxo vertical porque o fluxo pode ser desviado para o pré-filtro e penetrar no volume de diluição do traçador.

A velocidade vertical  $V_v$ , pode ser estimada pela fórmula abaixo, desde que se utilize o equipamento mostrado na figura 12:

$$V_v = \frac{l}{t} \quad (31)$$

Os parâmetros da equação (31) são obtidos com uso de equipamentos associados ao dispositivo obturador, sendo possível também determinar o sentido do fluxo vertical, ascendente ou descendente, porque o dispositivo possui dois detectores, cada um deles associado a um registrador gráfico.

### 1.7.3 - Influência da agitação para a homogeneização do traçador, durante as medições

O uso do método da diluição, pressupõe que a concentração do traçador no volume de medições seja uniforme durante todo o tempo de duração do trabalho. Porém, a obtenção da concentração uniforme somente é possível com a ajuda de dispositivos mecânicos de agitação.

O obturador mostrado na figura 12, possui um desses dispositivos, constituído por espiral, concêntrica ao eixo do obturador, acoplada a uma haste ligada a cabo flexível, para o acionamento a partir da superfície.

A frequência da agitação se determina em laboratório. Porém, na prática, quando ela ultrapassa o limite pré-fixado, ocorre aumento na diluição do traçador, porque a agitação expelle o traçador para fora do volume de medição<sup>6</sup>.

A parcela  $V_m$ , na equação (25), representa essa influência.

### 1.7.4 - Influências da convecção e da difusão moleculares do traçador

A diluição da solução traçadora, na coluna piezométrica não é causada somente pelo fluxo da água subterrânea, mas também pela convecção decorrente das diferenças de densidade e pela difusão molecular.

A convecção provocada pelas diferenças de temperatura pode ser facilmente eliminada, desde que a temperatura da solução radioativa seja a mesma da água do poço onde se realizam as medições.

A convecção provocada pelas diferenças de densidade, à mesma temperatura, pode ser eliminada se a concentração da solução traçadora for suficientemente baixa.

Como exemplo, um dos radioisótopos mais utilizados, o  $^{82}\text{Br}$  na forma de  $\text{NH}_4\text{Br}$ , deverá ter concentração inferior a  $4 \cdot 10^{-4}$  moles/litro, ou seja, 0,04 g/litro de  $\text{NH}_4\text{Br}$ . Portanto, esta é a concentração de  $\text{NH}_4\text{Br}$  necessária, uma vez que a concentração de  $\text{NH}_4\text{Br}$  radioativo é bem menor<sup>6</sup>.

O decréscimo da concentração do traçador no volume de medição por difusão molecular, depende das características do revestimento do poço e da concentração inicial, após a injeção.

Porém, a influência da difusão molecular do traçador, pode ser estimada pela fórmula seguinte<sup>6,7,10</sup>:

$$v_d = \frac{3 \cdot \pi \cdot D}{r_1} \quad (32)$$

O coeficiente de difusão molecular  $D$ , representado na equação (32), pode ser obtido a partir dos gráficos da figura 13, para soluções de  $\text{NH}_4\text{Br}$ ,  $\text{NaI}$  e  $\text{NaIO}_3$ . Inference-se desses gráficos, que o coeficiente de difusão molecular aumenta quando diminui a concentração do traçador. Considerando-se que os efeitos da convecção e da difusão molecular ocorrem em sentidos opostos (uma diminui quando a outra aumenta), que a convecção provocada pelas diferenças de

densidade, a temperatura constante, seja desprezível e que o efeito da difusão seja mínimo, a concentração do traçador a ser utilizada deve ser igual a  $4.10^{-4}$  moles/litro.

Com esse valor de concentração, resulta, por exemplo,  $D = 0,55 \text{ cm}^2/\text{dia}$ , para o  $\text{NH}_4\text{Br}$  e a partir da equação (32), obtém-se:

$$V_d = 0,26 \text{ cm/dia}$$

Na ausência de fluxos verticais, isto é, quando ocorre apenas fluxo horizontal, as parcelas  $V_v$  e  $V_m$ , podem ser consideradas nulas, bem como a parcela  $V_c$  da convecção, desde que seja obedecido um valor específico para a concentração do traçador.

Assim, a equação (25), pode ser apresentada do modo seguinte:

$$V_a = \alpha V_D + V_d \quad \text{ou,}$$

$$V_D = \frac{V_a - V_d}{\alpha} \quad (33)$$

O efeito da difusão molecular é o único que não pode ser anulado, mas pode ser desprezado quando a velocidade de Darcy, estimada por outros métodos, for superior a 30 cm/dia.

## 1.8 - Método das determinações da direção e do sentido do fluxo com utilização de traçadores radioativos

### 1.8.1 - Princípios do método

Têm sido propostas diversas técnicas experimentais para as determinações da direção e do sentido do fluxo da água subterrânea, porém todas elas se baseiam no mesmo princípio. No centro de uma secção transversal de um poço, injeta-se pontualmente uma solução radioativa que é transportada de acordo com a direção correspondente ao fluxo<sup>3,6,10,11</sup>

Decorrido certo intervalo de tempo, a maior parte do traçador terá saído da coluna piezométrica e se encontrará distribuída nas paredes do filtro e nas suas vizinhanças.

Esse intervalo de tempo  $t_p$ , pode ser calculado pela fórmula clássica da cinemática, considerando-se que o traçador tenha que percorrer a distância  $r_1$ . Assim:

$$t_p = \frac{r_1}{\alpha \cdot V_D} \quad (34)$$

Ao produto  $\alpha V_D$ , corresponde a velocidade aparente  $V_a$ , no poço, podendo ser determinado diretamente pelo método da diluição.

A distribuição do traçador, poderá ser determinada por um detector provido de colimador, tal como se

mostra na figura 16. Inicialmente, orienta-se o colimador em relação a um referencial e faz-se as medições da radioatividade girando-se o dispositivo em intervalos regulares, resultando um gráfico radial.

Considerando-se que cada medição permite um vetor com intensidade, direção e sentido bem determinados, a resultante desses vetores representará a direção e o sentido do fluxo.

O uso de detector com colimador, mostrado na figura 16, presta-se a casos de poços de pequeno diâmetro, tal como ocorreu nesse trabalho. Para poços de diâmetro maior, aumenta-se a eficiência da detecção utilizando o mesmo equipamento, com dispositivo adicional, que pressiona o colimador contra as paredes do filtro.

#### 1.8.2 - Parâmetros que limitam a aplicação do método

Alguns parâmetros que aumentam a velocidade aparente  $V_a$  representada na equação (25), também aumentam a dispersão da nuvem radioativa, diminuindo a resolução da medição da direção do fluxo, porque o traçador fica distribuído uniformemente nas paredes do filtro e nas imediações.

O uso de detectores que giram, centralizados no eixo do poço, apresentam inconvenientes quando utilizados em poços de grande diâmetro, pois neste caso, diminui a relação entre as taxas de contagem máxima e mínima, provocadas pelo aumento da distância entre a nuvem radioativa e o detector.

A injeção da solução radioativa também pode afetar as medições, porque provoca pequenos turbilhões, que levam o traçador para qualquer direção. Este efeito também é observado quando ocorrem perturbações acidentais no fluxo, após a injeção da solução radioativa.

Os fluxos verticais, talvez se constituam no parâmetro mais importante que precisa ser observado, porque levam o traçador para direções não compatíveis com a direção do fluxo no local em estudo. Além disso, o traçador pode ser diluído na coluna piezométrica, antes de ser adsorvido pelas paredes do filtro e adjacências.

## CAPÍTULO 2

### EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

#### 2.1 - Equipamentos

##### 2.1.1 - Sistema de detecção da radiação gama

O sistema de detecção é composto por dois equipamentos: sonda cintiladora gama, com função de detectar a radiação emitida pelo traçador e o espectrômetro BASC, com função de processar os sinais provenientes da sonda.

##### 2.1.1.1 - Espectrômetro BASC

O BASC é um equipamento de medida de radioatividade, leve, portátil e de alta estabilidade, com escalímetro de contagem pré-selecionada, indicador de taxa de

contagem, linear e logarítmica e analisador de altura de pulso, monocanal. É alimentado por acumulador interno completamente selado de 12 volts, constituído por baterias de níquel-cádmio<sup>22</sup>.

O acumulador pode ser carregado por meio de uma unidade de carga, e também funciona alimentado pela rede de 110 VCA. Caso falte energia elétrica durante o funcionamento do BASC, a alimentação será comutada automaticamente para o acumulador, sem afetar as contagens.

O BASC é totalmente transistorizado, com montagem feita a partir de placas de circuito impresso, removíveis para facilidade de manutenção, alojadas numa caixa rígida de alumínio e protegidas contra a intempérie por meio de vedação de borracha.

O BASC é totalmente estabilizado contra variações de voltagem do acumulador ou da rede da energia elétrica. Todas as unidades funcionais incluem circuitos de compensação de temperatura ou são intrínsecamente insensíveis à ela. Conseqüentemente, o BASC funciona de forma extremamente estável na faixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ .

O BASC possui contadoras eletrônicas decimais de três décadas e um registrador mecânico de seis dígitos, com parada automática para cada múltiplo de 100 contagens. O contador de tempo é um cronômetro à corda, de alta precisão.

O indicador de taxa de contagem dispõe de sete faixas em escalas lineares: 0 a  $10^3$  cpm, até  $10^6$  cpm e duas faixas em escala logarítmica: 30 a  $1,2 \cdot 10^6$  cpm e 300 a  $1,2 \cdot 10^6$  cpm. Há uma saída para registrador, de 1 mA. O in-

dicador de taxa de contagem, em escala logarítmica é particularmente útil quando ocorrem grandes variações da taxa de contagem, sendo possível o registro sem necessidade de mudança da faixa de medida.

O sistema de contagem de pulsos, dispõe de quatro constantes de tempo: 0,2; 1; 5 e 25 segundos. Possui uma fonte de alta tensão, estabilizada, para detectores de cintilação, tubos Geiger-Muller e contadores proporcionais. Seu analisador de pulsos, monocanal, possui potenciômetro de dez voltas, para seleção do limiar da sensibilidade de entrada, com quatro larguras de janela, para operações diferenciais e com possibilidades para uso em integração.

O limiar da sensibilidade de entrada pode ser variado continuamente por um potenciômetro externo, controlado pelo registrador gráfico. Essa característica permite a análise automática da altura dos pulsos de entrada.

Uma característica especial, é o circuito conformador de pulso, que fornece um pulso padronizado para cada pulso, décimo pulso, centésimo pulso ou milésimo pulso de entrada. Esses pulsos de saída podem acionar uma pena que marca os eventos em um registrador. Desse modo, consegue-se uma integração contínua da taxa de contagem. Esse método de integração é bem mais preciso que a medida da área sob a curva da taxa de contagem.

O espectrômetro possui também um dispositivo de verificação para controlar o funcionamento apropriado de todas as partes do equipamento.

---

### 2.1.1.2 - Sonda cintiladora gama

A sonda cintiladora gama consiste de cristal de cintilação a base de NaI(Tl), (iodeto de sódio ativado com tâlio), com formato cilíndrico de dimensões 1" x 1", de tubo fotomultiplicador e de pré-amplificador transistorizado, devidamente acondicionados em envelope de aço inoxidável à prova d'água e de pressão<sup>21</sup>.

Transmite-se as tensões de alimentação, para o tubo fotomultiplicador e o pré-amplificador, por meio de cabo especial com quatro condutores. A conexão com o espectrômetro se faz por meio de conector de quatro pinos, de aço inoxidável.

Todas as vedações são de anéis de borracha do tipo "o-ring". O conjunto cristal de cintilação - fotomultiplicador recebe proteção adicional, pois estão contidos em tubo de latão niquelado, adaptado ao envelope de aço inoxidável.

### 2.1.2 - Equipamento para uso em determinações da velocidade de Darcy

#### 2.1.2.1 - Injetor de traçador para marcação da coluna piezométrica

Projetou-se e construiu-se este equipameno

to, especificamente para este trabalho, a partir de idéias e modelos contidos em diversos trabalhos publicados sobre o tema.

Basicamente, o injetor consiste de tubo plástico com diâmetro de 6,4 mm, e comprimento superior em 500 mm a profundidade do poço.

Numa das extremidades coloca-se um lastro de chumbo e na outra, um funil para facilitar a introdução da solução a ser injetada, conforme se mostra na figura 14.

O lastro de chumbo, tem função de manter o tubo plástico na posição vertical, no centro do poço, durante a injeção do traçador.

O injetor é suportado por haste rígida, fixada a uma base, com duas braçadeiras que comprimem o tubo plástico a outras duas que fixam o funil.

As soluções, do carregador e do traçador, a serem injetadas, são introduzidas pelo funil e passam a ocupar o volume  $V_t$ , no interior do tubo plástico. Quando o injetor for retirado, a coluna piezométrica ficará marcada.

O volume  $V_t$ , é representado por:

$$V_t = \frac{\pi \cdot D_t^2}{4} \cdot H \quad (35)$$

### 2.1.3 - Projeto e construção de equipamentos para uso nas de terminações da direção e do sentido do fluxo

De acordo com as considerações anteriores, após a injeção pontual da solução radioativa, no centro da secção transversal do local onde se quer determinar a direção e o sentido do fluxo, a nuvem radioativa desloca-se sob a ação do fluxo, para determinada direção, até ficar retida nas paredes do filtro, pré-filtro e vizinhanças.

Foram projetados e construídos especificamente para este trabalho, três equipamentos: o injetor pontual de traçadores, o colimador para a sonda cintiladora gamma e o suporte para hastes de secção quadrada, giratório, com indicação da posição do colimador.

#### 2.1.3.1 - Injetor pontual de traçador

O injetor pontual de traçador foi construído especialmente para uso em poços de 4" (101,6 mm) de diâmetro, e encontra-se representado na figura 15. É constituído por tubo de alumínio de 25 mm de diâmetro, com três guias de fita de aço, com 20 mm de largura, dispostas a  $120^{\circ}$ , com flexibilidade suficiente para ajustarem-se às paredes do poço.

A função das guias é fazer o injetor ser facilmente introduzido e retirado do poço, mantendo-o sempre

centralizado.

Na extremidade inferior, há um tubo de 150 mm de comprimento e 6,4 mm de diâmetro, cuja finalidade é fazer o bico injetor ficar em região onde o fluxo não está perturbado.

Internamente à esses tubos, passa outro tubo plástico, de 3,2 mm de diâmetro interno. Sua extremidade ou bico injetor propriamente dito, encontra-se a 10 mm, aproximadamente abaixo das outras. Este tubo plástico é acoplado a micro-bomba, tipo peristáltica, localizada na superfície do terreno e que se constitui no dispositivo de injeção mais satisfatório para a maioria das aplicações práticas, pois a injeção do traçador ocorre com vazão de 0,1 ml/s, aproximadamente.

Fixa-se o injetor, na profundidade desejada com um cabo de "nylon" graduado de 100 mm em 100 mm, enrolado em carretel provido de dispositivo de trava. O transporte, a instalação e a operação são bem simples, pois o equipamento completo, tem peso inferior a 5 Kg.

#### 2.1.3.2 - Colimador para a sonda cintiladora gama

O colimador para a sonda cintiladora gama, conforme representado na figura 16, consiste, essencialmente, de blindagem de chumbo, com janela específica para a entrada e detecção da radiação emitida pelo traçador adsorvido pelas paredes do filtro, pré-filtro e adjacências.

Para se aumentar a eficiência de detecção,

dispõe-se a sonda cintiladora gama excêntrica ao eixo de rotação do colimador. A janela, tem a mesma altura do cristal de NaI(Tl) da sonda cintiladora gama, ou seja 1" (25,4 mm), e angulo de detecção de  $15^{\circ}$ , aproximadamente, em relação ao eixo de rotação. Ela foi aberta na parede mais fina da blindagem.

Essa configuração é mais utilizada e resulta numa relação, entre as taxas de contagem de "frente/costa", da ordem de 2,5 a 3,5, na melhor das hipóteses. Estes valores foram obtidos em laboratório, com fonte radioativa de  $^{51}\text{Cr}$ , de baixa atividade, suficiente apenas para realizar a medição.

O valor da taxa de contagem de "frente", corresponde a fonte colocada diante da janela do colimador e o valor da taxa de contagem de "costa", corresponde à fonte colocada em posição diametralmente oposta à janela.

As demais características do colimador são:

- a) diâmetro externo de 86 mm, possibilitando a utilização em poços com diâmetro superior a 100 mm;
- b) altura total de 600 mm;
- c) encaixe para hastes de secção quadrada de 1" (25,4 mm) de lado;
- d) encaixe para detectores de radiação com diâmetro de até 38 mm;
- e) peso aproximado: 3 Kg;
- f) materiais utilizados: tubos de alumínio de 2 mm de espessura e chumbo para a blindagem.

### 2.1.3.3 - Suporte para hastes de secção quadrada, giratório, com indicação da posição do colimador

Este equipamento, conforme se mostra na figura 17, consiste de disco fixo, com três pés de apoio e de um dispositivo para encaixe e fixação de hastes de secção quadrada.

Um rolamento de esferas, com o anel externo solidário ao dispositivo de fixação de hastes, permite-lhe girar livremente em qualquer sentido, mesmo quando estiver suportando os pesos da haste e da sonda cintiladora gama, com o colimador.

A fixação da haste é por atrito, por meio de duas peças de alumínio. A força de contacto é conseguida por intermédio de dois parafusos, um para cada peça.

A posição da janela do colimador, é indicada por uma seta, cuja direcção é a diagonal do orifício quadrangular do dispositivo de fixação. Portanto, durante a montagem do sistema de detecção, deve-se assegurar que a aresta da haste, indicada pela seta, corresponde à janela do colimador.

Havendo necessidade de se trocar o rolamento, esta operação poderá ser feita com facilidade, pois na montagem do equipamento, utilizaram-se parafusos.

Se a boca do poço estiver acima de 100 mm do nível do terreno, pode-se remover os pés do equipamento e instalar, nos seus lugares, um suporte qualquer, sem prejudicar o funcionamento.

As demais características do equipamento são:

- a) diâmetro do disco fixo: 500 mm, com chapa de 6,4 mm de espessura;
- b) graduação do disco fixo:  $0^{\circ}$  a  $360^{\circ}$ , de  $10^{\circ}$  em  $10^{\circ}$ ;
- c) diâmetro do disco móvel, solidário ao dispositivo de fixação: 300 mm;
- d) encaixe para hastes de secção quadrada de até 25,4 mm de lado;
- e) parafuso de fixação da haste: 3/8" x 1" (9,5 mm x 25,4 mm);
- f) altura dos pés: 150 mm;
- g) peso aproximado: 3 Kg;
- h) materiais utilizados: chapas e perfis de alumínio.

#### 2.1.4 - Características do poço e informações hidrogeológicas do local de estudos

As aplicações práticas deste trabalho se realizaram no campo de provas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT, em São Paulo.

Nesse campo de provas há um poço e vários piezômetros construídos com a finalidade de se fazer ensaios de bombeamento, com acompanhamento do nível do lençol. A figura 18, ilustra a posição do poço em relação aos piezômetros.

Considerou-se o piezômetro PZ-12, localizado a 1 m do poço, aproximadamente, com referência para a medição da direção e do sentido do fluxo.

O perfil litológico da área, nas imediações do poço, encontra-se representado na figura 19, obtido durante a instalação dos piezômetros. A camada suporte, impermeável, encontra-se a 12,0 m, aproximadamente<sup>12</sup>.

Considerou-se também, pela análise da litologia, que o lençol da água subterrânea é do tipo freático, inexistindo fluxos verticais, e assim,  $V_v = 0$ , na equação (25). A profundidade média do nível d'água é de 3,25 m, em relação ao nível do terreno.

A distribuição granulométrica representativa do meio poroso, está mostrada na figura 20<sup>14</sup>. Obteve-se os valores abaixo indicados para  $d_m$  e  $d_{10}$ , que podem ser utilizados como parâmetros da equação (13), de Reynolds<sup>8</sup>:

$$d_m = 0,75 \text{ mm}$$

$$d_{10} = 0,15 \text{ mm}$$

O poço foi revestido com um tubo de aço, com 101,6 mm de diâmetro interno, tendo  $r_1 = 51,0$  mm, diâmetro externo de 116,0 mm e  $r_2 = 58,0$  mm. A secção filtrante, estende-se da profundidade de 5,5 m até 11,5 m, correspondendo a 6,0 m de filtro. Esta secção, também encontra-se indicada na figura 21.

O pré-filtro, foi construído com areia graduada. Tem diâmetro externo de 178,0 mm,  $r_3 = 89,0$  mm, diâmetro interno de 116,0 mm e  $r_2 = 58,0$  mm. Um corte longitudinal

nal, bem como a secção transversal do poço, encontram-se representados na figura 21.

Para o cálculo do fator de correção  $\alpha$ , constante na equação (27), utilizaram-se os valores médios abaixo indicados, para os coeficientes de permeabilidade do filtro, pré-filtro e meio poroso<sup>13</sup>:

$$K_1 = 0,5 \text{ cm/s}$$

$$K_2 = 0,5 \text{ cm/s}$$

$$K = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

Calculou-se o valor  $\alpha = 3,01$  a partir da equação (27), conhecidos os valores de  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K$ . Porém, pelas incertezas que envolvem os valores absolutos de  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K$ , um valor mais conservador pode ser obtido com a equação (30), considerando-se que a relação  $K_1 \geq K_2 \geq 10K$ , é obedecida. Assim, chega-se a:

$$\alpha = 2,87$$

## 2.2 - Métodos

### 2.2.1 - Escolha do radioisótopo utilizado na determinação da velocidade de Darcy

Em princípio, a maioria dos radioisótopos emissores de radiação gama, que constam da tabela 2, poderiam

ser utilizados para essas medições, porque a grande sensibilidade de detecção desses raios permite marcar grandes volumes de água.

Tendo por base, trabalhos e resultados obtidos anteriormente, inclusive em outras áreas, escolheu-se o  $^{82}\text{Br}$ , na forma química de  $\text{NH}_4\text{Br}$ , como traçador para esta experiência. O  $^{82}\text{Br}$ , é um radioisótopo obtido facilmente no reator da CNEN/SP e sua meia-vida curta, de 36 horas, aproximadamente, torna-o altamente conveniente para os propósitos da experiência.

Além disso, por seu caráter aniônico, tem menor probabilidade de ser adsorvido pelo material argiloso que compõem os estratos do aquífero.

#### 2.2.2 - Escolha do radioisótopo utilizado nas determinações da direção e do sentido do fluxo

Para boa resolução do diagrama de direção, é essencial que a solução radioativa deixe o volume de diluição e se fixe, por adsorção, nas paredes do filtro, pré-filtro ou nas suas adjacências, durante o período de medições.

Segundo recomendações feitas por Klotz, em 1971, além das características de adsorção, o radioisótopo deve emitir radiações gama com energia compreendida entre 0,3 MeV e 0,7 MeV. Essas características são encontradas nos radioisótopos seguintes:

$^{198}\text{Au}$ , na forma de  $\text{AuCl}_3$ ;

$^{51}\text{Cr}$ , na forma de  $\text{CrCl}_3$ , e

$^{131}\text{I}$ , na forma de  $\text{NaI}$

Entre eles, escolheu-se o  $^{51}\text{Cr}$ , por ser obtido mais facilmente no reator ca CNEN/SP e também por ser o mais tradicional.

### 2.2.3 - Calibração das sondas utilizadas na detecção da radiação gama

#### 2.2.3.1 - Sensibilidade de detecção

Os raios gama emitidos pelo radioisótopo e detectados pela sonda cintiladora gama, são registrados no espectrômetro BASC, na forma de pulsos por intervalo de tempo (por exemplo, cpm, contagens por minuto, que é denominada taxa de contagem).

Os resultados das medições de radioatividade é representado pela diferença entre a taxa de contagem total  $n$ , e a taxa de contagem relativa a radiação de fundo  $n_{\text{BG}}$ , ou "background". A taxa de contagem de radiação de fundo é proveniente da radiação cósmica e da radiatividade natural do ambiente. A influência de ambas pode ser minimizada, de acordo com as conveniências, por blindagens, de chumbo, aço, etc.. Evidentemente, a taxa de contagem de radiação de fundo não precisa ser considerada, se  $n \gg n_{\text{BG}}$ .

A taxa líquida de contagem  $n - n_{BG}$ , é proporcional a concentração da atividade ou a concentração do traçador  $C$ . Esse fator de proporcionalidade  $E$ , representa a sensibilidade de detecção para uma determinada técnica de medida e para um radioisótopo específico, sendo expressa do modo seguinte<sup>6</sup>:

$$E = \frac{n - n_{BG}}{C} = 2,22 \cdot 10^6 \cdot \eta \cdot V \quad (36)$$

A equação (36), é denominada curva de calibração do detector e depende, fundamentalmente, do volume de influência, isto é, do volume marcado pelo radioisótopo.

O conhecimento da relação entre a taxa líquida de contagem e a concentração do traçador, por meio da curva de calibração, torna possível determinar a atividade do radioisótopo a ser utilizada.

Para nossas aplicações, de determinação da velocidade de Darcy, admitiu-se 80.000 cpm, como valor da taxa líquida de contagem, considerado ideal para o tipo de sonda utilizada.

Quando a sensibilidade de detecção for baixa, como geralmente ocorre nos casos em que o volume de influência é pequeno ou que a sonda possua um colimador, uma taxa líquida de contagem inicial alta, poderá se tornar prejudicial aos operadores dos equipamentos, pela necessidade de se dispor de concentração inicial mais elevada. A figura 22, ilustra esse tipo de caso: como  $E_B < E_A$ ,  $C_B > CMP$ , sendo  $CMP$  a concentração máxima permissível. Pode-se, então, escolher um valor menor para a taxa líquida de contagem, por

exemplo, 40.000 cpm, sem que se prejudique as medições.

Em ambos os casos, deve-se assegurar sempre, que as concentrações resultantes sejam da mesma ordem de grandeza das máximas permissíveis, que constam da tabela 2. Caso isto não ocorra, o pessoal envolvido no trabalho deve ficar o mais distante possível do poço, principalmente o operador do equipamento de detecção.

As medições das concentrações relativas  $C/C_0$ , equação (23), podem, de acordo com a equação (36), serem substituídas pela relação  $n/n_0$ , mais prática, porque os sistemas de detecção de radiações fornecem como resposta, taxas de contagem.

#### 2.2.3.2 - Técnicas de detecção

As técnicas de detecção com sonda cintiladora gama, de uso mais frequente, estão mostradas na figura 23<sup>3</sup>.

Nas técnicas A e B, o detector encontra-se submerso na água. Se o volume de água que circunda o detector é suficientemente grande e a concentração do traçador uniforme, pode-se definir o volume infinito, ou volume de saturação, como o volume que contribui com 95%, ou mais, da resposta do detector. O seu raio é denominado raio infinito  $R_\infty$ .

Esse volume, tem a forma esférica, nos casos A e B, sendo que em A, parte da esfera é imaginária (curva pontilhada).

Nos casos C e D, o detector encontra-se envolto por volume fixo de água, de acordo com as dimensões do recipiente de medição. Em C, a água é levada ao recipiente, por sistema de bombeamento, obtendo-se desse modo, controle contínuo ou periódico da concentração do traçador. A técnica D, é utilizada para a medida descontínua de amostras.

Em ambos os casos, C e D, a sensibilidade de detecção E, aumenta com a capacidade de armazenamento do recipiente, até atingir o máximo, correspondente à técnica B.

#### 2.2.3.2.1 - Técnica utilizada nas experiências

Utilizou-se a técnica mais aceita para os propósitos deste trabalho, que é o detector ficar submerso no poço, fixo, durante as medições. Não se utilizaram as técnicas B e C, mostradas na figura 2C, porque ambas produzem perturbações no volume de diluição, durante a coleta de amostras, ou no bombeamento.

Essas perturbações podem induzir velocidades não previstas nos cálculos teóricos, acarretando erros no valor da velocidade de Darcy.

#### 2.2.3.2.2 - Geometria de calibração das sondas

A sensibilidade de detecção das sondas cintiladora gama, utilizadas nas determinações da velocidade de

---

Darcy e direção do fluxo da água subterrânea, deveria ser obtida em recipientes cujas formas geométricas e volumes de influência fossem semelhantes às condições reais de trabalho, no caso, o poço do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT.

Vimos que a escolha de uma geometria contendo volume infinito, proporciona detecção equivalente a 95%, ou mais, daquela obtida se a geometria fosse equivalente à real.

Esse procedimento, além de facilitar a calibração satisfaz às exigências da maioria das aplicações práticas, sendo o mais utilizado.

Neste trabalho, usou-se duas geometrias distintas. Uma, com 101,6 mm de diâmetro, 1.000 mm de altura e 8.107 ml de volume e outra com o mesmo diâmetro, porém com 400 mm de altura e 3.243 ml de volume. Ambas foram definidas a partir de resultados de trabalhos práticos.

À altura de 1.000 ml de água, deve corresponder a duas vezes o raio infinito para o radioisótopo  $^{82}\text{Br}$ , aproximadamente.

Quanto à altura para a calibração da sonda cintiladora gama colimada, deve-se ressaltar que o volume de influência, nessas condições, não corresponde ao volume real, mas a um volume cuja curva de calibração aproxima-se muito da real. Também, não se determinou o raio infinito para o  $^{51}\text{Cr}$ , pois admitiu-se que o traçador sempre fica adsorvido nas paredes do filtro, do pré filtro e adjacências, e a região abrangida corresponde a altura sempre inferior a 400 mm.

### 2.2.3.3 - Procedimento para calibração em laboratório

#### 2.2.3.3.1 - Descrição do sistema

Definidas as características das geometrias de calibração para as sondas usadas nas medições, instalou-se o sistema de acordo com o esquema mostrado na figura 24.

Utilizou-se um tubo de PVC, de 101,6 mm de diâmetro e 1.200 mm de altura, para que as duas geometrias pudessem ser obtidas, ou seja,  $H_c = 1.000$  mm de água para o radioisótopo  $^{82}\text{Br}$ , utilizado na determinação da velocidade de Darcy e  $H_c = 400$  mm de água nas determinações da direção e do sentido do fluxo.

A haste tem função de suportar o peso da sonda cintiladora, principalmente quando ela estiver provida do colimador, que contém uma blindagem de chumbo. Além da rigidez suficiente para manter a sonda na vertical, ela também possui duas garras para facilitar o ajuste da posição do detector.

O cabo elétrico da sonda foi graduado em unidades de centímetro, a partir da posição do cristal do detector, possibilitando conhecer a profundidade da sonda. Conhecidos os valores do nível d'água e da profundidade da sonda, obtém-se a cota  $y$ , em relação ao referencial.

O espectrômetro BASC, foi colocado a cerca de cinco metros de distância, das geometrias de calibração, para garantir a segurança dos operadores durante as medições.

### 2.2.3.3.2 - Etapas da calibração

a) solicitar o fornecimento do material radioativo, indicando a forma química desejada, a concentração e a atividade. Esse material é denominado padrão primário;

b) preparar o padrão secundário, a partir do padrão primário, por diluições, de modo que a concentração resultante, prevista para o recipiente de calibração, seja de dez a cem vezes inferior a máxima permissível. O volume do padrão secundário deverá ser de 100 ml, aproximadamente, suficiente para obtenção de 15 a 20 pontos na curva de calibração. Em geral, alíquota do padrão secundário tem volume de 1 ml, ou mais, e deve provocar incremento da taxa de contagem entre 1.000 e 2.000 cpm;

c) injetar o carregador no volume de diluição, para evitar que o radioisótopo seja adsorvido pelas paredes do tubo, conforme discutido nos capítulos anteriores;

d) determinar o raio infinito,  $R_{\infty}$ :

- injetar uma primeira alíquota do padrão secundário, por exemplo 1 ml, e após a homogeneização, posicionar a sonda cintiladora em diferentes profundidades, variando-se de 100 mm em 100 mm, a partir do fundo ( $y = 0$ ) registrando-se as respectivas taxas de contagem;

- traçar o gráfico das taxas de contagem em função da posição  $y$ , e definir o raio infinito, como sendo o ponto correspondente à máxima contagem;

e) determinar a sensibilidade de detecção:

---

- anotar o primeiro ponto da curva de calibração, correspondente à concentração e a taxa de contagem, obtidas com a sonda cintiladora posicionada em  $y = R_{,,i}$ ;

- anotar os demais pontos que são obtidos a partir de injeções de alíquotas do padrão secundário, homogeneizando-se a solução e fazendo-se as medições. Considera-se que os pontos obtidos são suficientes para obter boa curva de calibração, quando a taxa de contagem for de 40.000 cpm, aproximadamente, com exceção para a sonda cintiladora colimada, onde taxas de contagem de 20.000 cpm, aproximadamente, são consideradas excelentes, pela baixa sensibilidade de detecção, provocado pelo colimador.

- marcar os pontos em gráfico, ajustar uma curva linear à esses pontos e calcular a inclinação da curva, que representará a sensibilidade de detecção E.

#### 2.2.3.3.3 - Determinações do raio infinito, da sensibilidade de detecção e da atividade a injetar no poço, para o $^{82}\text{Br}$

Foi de 0,367 mCi/ml a concentração de padrão primário  $^{82}\text{Br}$ , na forma de  $\text{NH}_4\text{Br}$ .

Obteve-se o padrão secundário, diluindo-se uma alíquota do padrão primário, em 100 ml, e que correspondeu a concentração 0,0367  $\mu\text{Ci/ml}$ , aproximadamente. A quantidade de carregador injetado foi 0,3 g de  $\text{NH}_4\text{Br}$  inativo, correspondente a 0,04 g/l. Na determinação do raio infinito, injetou-se 1 ml, do padrão secundário no volume de diluição e

mediu-se a concentração na posição  $y = 0$ .

A tabela 5, e a figura 25, mostram os resultados obtidos. Observa-se que no intervalo  $400 < y < 500$  encontram-se os pontos cuja taxa de contagem é máxima. Estimou-se o valor  $y = 450$  mm, como sendo o raio infinito.

Do mesmo modo, concluiu-se que a altura  $H_c = 1.000$  mm de água é suficiente para a calibração. Estabeleceu-se também a cota  $y = 500$  mm, para a posição da sonda, durante as medições.

Feito o registro do primeiro ponto da curva, obtiveram-se outros, todos representados na tabela 6.

A curva de calibração, linear, ajustada aos pontos pelo método dos mínimos quadrados, está representada na figura 26. A correlação entre a taxa de contagem e a concentração é a seguinte:

$$n - 3.121,3 = 267.372.602,5 C \quad (37)$$

A parcela  $n - 3.121,3$  (cpm), é a taxa líquida de contagem e o coeficiente angular é a sensibilidade de detecção E:

$$E = 267.372.602,5 \left( \frac{\text{cpm}}{\mu\text{Ci/ml}} \right)$$

Admitindo-se  $80.000$  cpm, para a taxa líquida de contagem, após a homogeneização do traçador na coluna piezométrica do poço, a concentração C, requerida, pode ser obtida pela equação (37). Portanto:

$$C = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ } (\mu\text{Ci/ml})$$

Sabendo-se que o volume a ser marcado é 70.939 ml, aproximadamente, a atividade necessária será de:

$$A = 21,3 \mu\text{Ci}$$

A solução radioativa, bem como o carregador inativo, ocuparão, de acordo com a equação (35), o volume de 277 ml.

2.2.3.3.4 - Determinações da sensibilidade de detecção e da atividade a injetar no poço, para o  $^{51}\text{Cr}$

A concentração do padrão primário  $^{51}\text{Cr}$ , na forma química de  $\text{CrCl}_3$ , foi de 0,5 mCi/ml.

Obteve-se o padrão secundário, diluindo-se uma alíquota do padrão primário em 100 ml de água, proporcionando concentração de 5  $\mu\text{Ci/ml}$ , aproximadamente.

Posicionou-se a sonda, de modo que o cristal de  $\text{NaI(Tl)}$  ficasse na posição  $y = 200$  mm, e efetuaram-se medições da taxa de contagem para cada alíquota do padrão secundário. Os resultados estão mostrados na tabela 7.

A curva de calibração, linear, ajustada aos pontos, pelo método dos mínimos quadrados, está representada na figura 27. A correlação entre a taxa de contagem e a concentração do traçador é a seguinte:

$$n - 829,9 = 626.322,0 C \quad (38)$$

A parcela  $n - 829,9$  (cpm), é a taxa líquida de contagem e o coeficiente angular é a sensibilidade de detecção E:

$$E = 626.322,0 \left( \frac{\text{cpm}}{\mu\text{Ci/ml}} \right)$$

Admitindo-se 40.000 cpm, para a taxa líquida de contagem, após a injeção pontual do traçador no poço, a concentração C, requerida, pode ser obtida a partir da equação (38):

$$C = 6,4 \cdot 10^{-2} \quad (\mu\text{Ci/ml})$$

A atividade de  $^{51}\text{Cr}$  necessária, na forma química de  $\text{CrCl}_3$ , é igual ao produto da concentração C, pelo volume a ser marcado, correspondente à coluna de 400 mm de água, ou seja:

$$A = 207 \mu\text{Ci}$$

Admitindo-se que a injeção possa ser feita com a micro-bomba, durante cinco segundos, sem provocar perturbações no escoamento, o volume necessário de solução radioativa, em cada injeção, será igual a 0,5 ml, proporcionando concentração de 414  $\mu\text{Ci/ml}$ .

---

#### 2.2.4 - Procedimentos para a marcação da coluna piezométrica e para a instalação do sistema de detecção no poço

##### 2.2.4.1 - Marcação da coluna piezométrica com carregador inativo e solução radioativa

Conhecidos a massa de carregador inativo (2,8 g), a atividade do radioisótopo a ser injetada (21,3  $\mu$ Ci) e o volume da solução (277 ml), procedeu-se a marcação da coluna piezométrica.

Inicialmente, posicionou-se o injetor, certificando-se que o lastro estava no fundo do poço, conforme se mostra na figura 28, etapa A. Em seguida, introduziu-se a solução pelo funil, até ela ocupar o volume  $V_t$ , no interior do tubo plástico, etapas B e C.

Na etapa D, retirou-se o injetor do poço, lentamente, para que a coluna piezométrica ficasse marcada com a solução.

Para melhorar a homogeneização da solução radioativa, no poço, utilizou-se como agitador o próprio injetor, introduzindo-o e retirando-o, por duas ou três vezes.

---

#### 2.2.4.2 - Instalação do sistema de detecção

Para a medição da taxa de contagem de fundo  $n_{BG}$ , introduziu-se inicialmente a sonda cintiladora gama no poço, no intervalo entre a injeção do carregador inativo e o traçador radioativo.

A instalação definitiva da sonda após injeção e marcação da coluna piezométrica com o traçador radioativo, foi na profundidade de 8,50 m, correspondente a posição do cristal de NaI(Tl).

Assegurou-se que a sonda encontrava-se bem fixa e centralizada, para evitar movimentos prejudiciais às medições.

Manteve-se o espectrômetro BASC a distância conveniente do poço, limitada pelo comprimento do cabo elétrico da sonda.

A primeira medição da taxa de contagem, deu-se quando eram decorridos cinco minutos, aproximadamente, da injeção e considerou-se este instante como o instante inicial  $t = 0$ . As demais medições foram feitas durante um minuto, em intervalos de dez minutos. O trabalho durou duas horas, aproximadamente.

#### 2.2.4.3 - Tempo de espera entre injeções sucessivas

O intervalo de tempo necessário entre duas injeções sucessivas, pode ser calculado pela equação da lei

---

do decaimento, equação (6), admitindo-se que somente esse efeito esteja presente.

Quando foram utilizados dois ou mais traçadores para um mesmo trabalho, é prática usual injetar primeiro o de meia-vida mais curta. Por exemplo, se a taxa de contagem final for da mesma ordem de grandeza da contagem de fundo, digamos 2.000 cpm, o tempo de espera entre as injeções de  $^{82}\text{Br}$  e  $^{52}\text{Cr}$ , deverá ser de 8,0 dias, aproximadamente.

2.2.5 - Procedimentos para a injeção pontual e para a instalação do sistema de detecção, no poço

2.2.5.1 - Injeção pontual da solução radiativa

Conhecidos a atividade do radioisótopo  $^{51}\text{Cr}$ , a ser injetada, o volume da solução radioativa e a duração da injeção, o procedimento usado é o seguinte:

Inicialmente, na superfície, preenche-se com água o tubo plástico do injetor de modo a ocupar os primeiros seis centímetros, a partir do bico, correspondente ao volume de 0,5 ml.

Em seguida, introduziu-se o injetor no poço, na profundidade definida para a injeção (8,50 m), como mostrado na figura 29, etapa A.

No instante da injeção, ligou-se a micro-bomba, durante cinco segundos, aproximadamente, suficientes para injetar o volume previsto (etapas B e C).

---

Após a injeção, imobilizou-se o injetor durante o tempo  $t_p$ , (equação 34). Após o tempo  $t_p$ , a nuvem radioativa alcança as paredes do poço, podendo-se então retirar o injetor do poço sem causar grandes perturbações.

#### 2.2.5.2 - Instalação do sistema de detecção

A figura 30, mostra como se processa a montagem dos dispositivos que compõe o sistema de detecção, isto é, a sonda cintiladora gama, o colimador, a haste de secção quadrada e o suporte giratório.

Introduziu-se a sonda colimada até a profundidade de injeção do traçador e orientou-se o disco, fixo na direção de uma referência escolhida no local, ou seja, a posição de  $0^\circ$ , do disco fixo; foi orientada na direção do piezômetro PZ-12 do campo de provas do IPT.

Iniciaram-se as medições das taxas de contagem, a partir da posição  $0^\circ$ , girando-se a sonda colimada em intervalos de  $15^\circ$ , em sentido anti-horário.

---

### CAPÍTULO 3

#### RESULTADOS EXPERIMENTAIS

##### 3.1 - Determinação da velocidade de Darcy

Os valores obtidos em campo, encontram-se dispostos na tabela 8. As taxas de contagem  $n'$ , foram corrigidas para se eliminar o efeito do decaimento radioativo, pela equação 8, resultando deste modo, os valores de  $n$ .

O efeito da diluição do traçador, na coluna piezométrica do poço é representado pela taxa líquida de contagem  $n - n_{BG}$ .

A relação  $C/C_0$  (equação 22), é obtida, relacionando-se os valores da taxa líquida de contagem, de acordo com a equação (36).

Os valores da relação  $C/C_0$ , em função do tempo, foram desenhados na figura 31. A esses pontos, ajustou-se uma curva exponencial, pelo método dos mínimos quadrados, sendo que o coeficiente exponencial  $\psi$ , (equação 23),

---

assumiu o valor seguinte:

$$\psi = - 9,48 \cdot 10^{-4} \text{ min}^{-1} = - 1,36 \text{ dia}^{-1}$$

A velocidade aparente  $V_a$ , foi calculada pela equação (24), chegando-se a:

$$V_a = 10,89 \text{ cm/dia}$$

Finalmente, a velocidade de Darcy  $V_D$ , foi obtida pela equação (33), com  $\alpha = 2,87$  e  $V_d = 0,26 \text{ cm/dia}$ . Portanto:

$$V_D = 3,70 \text{ cm/dia}$$

ou

$$V_D = 4,28 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

### 3.2 - Determinações da direção e do sentido do fluxo

Feita a injeção pontual da solução radioativa, iniciaram-se as medições após transcorrer o tempo de trânsito  $t_p$ , (equação 34), com a magnitude seguinte:

$$t_p = 11,5 \text{ h.}$$

Os valores das taxas de contagem  $n$ , em função dos ângulos de rotação da sonda colimada, estão mostrados na tabela 9 e no gráfico radial, da figura 32.

---

Calculando-se a resultante desses vetores, determinou-se a direção do fluxo da água subterrânea, como  $53^{\circ}$  em sentido anti-horário a partir da referência PZ-12 ou  $13^{\circ}$  noroeste.

A direção e o sentido do fluxo, também estão indicados na figura 32.

---

## CAPÍTULO 4

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Pode-se, a partir dos resultados obtidos e dos parâmetros do local em estudo, fazer as discussões seguintes:

#### 4.1 - Verificação da validade da aplicação da Lei de Darcy

A velocidade de Darcy  $V_D$ , obtida pelo método de diluição de traçador radioativo, possibilita determinar o regime de escoamento do fluxo da água subterrânea, calculando-se o número de Reynolds e comparando-o com o valor  $R_e = 1,0$ , considerado limite para ocorrência de fluxos laminares.

Calcula-se o número de Reynolds  $R_e$ , de acordo com a equação (13), substituindo-se a vazão específica  $q$ , pela velocidade de Darcy  $V_D = 4,28 \cdot 10^{-5}$  cm/s, a dimensão ca-

---

racterística d pelo diâmetro médio  $d_m = 0,075$  cm e a viscosidade cinemática da água, por  $\nu = 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/s.

Obtêm-se então:

$$R_e = \frac{V_D \cdot d_m}{\nu} = 3,2 \cdot 10^{-4} \quad (39)$$

Visto que  $R_e \ll 1,0$ , conclui-se que o regime de escoamento é francamente laminar, sendo portanto, correta a hipótese admitida.

#### 4.1.1 - Comparação entre os resultados da velocidade de Darcy obtidos pelos métodos de diluição de traçador e clássico

Sabendo-se que o coeficiente de permeabilidade do meio poroso, obtido por ensaios de bombeamento<sup>13</sup> é  $K = 8,5 \cdot 10^{-4}$  cm/s e que o gradiente hidráulico do fluxo nas imediações do local em estudo é  $I = 0,028$ , obtêm-se a velocidade de Darcy, com o uso da equação (8):

$$V_D = K \cdot I = 2,38 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

ou

$$V_D = 2,06 \text{ cm/dia}$$

Comparando-se este valor com o valor obtido neste trabalho, ou seja  $V_D = 3,70$  cm/dia, podemos considerá-los da mesma ordem de grandeza, sendo portanto, aproximados sob o ponto de vista prático, objetivo deste trabalho.

---

#### 4.2 - Comparação entre os resultados de direção e sentido do fluxo da água subterrânea obtidos pelos métodos radioisotópico e clássico

As linhas de fluxo, determinadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT<sup>12</sup>, por levantamento das cotas piezométricas do local em estudo, estão representadas na figura 33.

Representam-se também, a direção e o sentido do fluxo, determinados neste trabalho, para fins de comparação.

A partir desses resultados, conclui-se que há concordância entre eles, pois o vetor (direção e sentido) obtido neste trabalho é praticamente a tangente da linha de fluxo que passa pelo poço.

---

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 - Conclusões

Nas condições experimentais em que se realizou este trabalho, podem-se tecer sobre as metodologias apresentadas, as considerações seguintes:

##### 5.1.1 - Conclusões sobre a determinação da velocidade de Darcy

1. O radioisótopo utilizado,  $^{82}\text{Br}$ , na forma química de  $\text{NH}_4\text{Br}$ , teve excelente desempenho, de acordo com as características desejáveis para um traçador;

2. A técnica de detecção da radiação gama emitida pelo traçador, que consistiu no detector imerso na co-

---

luna da água do poço foi bem escolhida, pela facilidade com que foi aplicada na prática e pelos resultados obtidos;

3. A geometria de calibração para a sonda cintiladora gama, em laboratório, representou as condições reais, visto que, a partir da curva de calibração e admitindo-se a taxa de contagem inicial de 80.000 cpm, determinou-se a concentração inicial no poço e a atividade a injetar;

4. As dimensões da geometria de calibração, com 1.000 mm de altura, 101,6 mm de diâmetro e 8.107 ml de volume, demonstram a facilidade com que a calibração pôde ser realizada. Pequenas dimensões são essenciais quando se trabalha com materiais radioativos, porque consequentemente menores são as atividades envolvidas;

5. A concentração inicial do traçador,  $^{82}\text{Br}$ , na coluna piezométrica do poço, foi de  $3,0 \cdot 10^{-4}$   $\mu\text{Ci/ml}$ . Portanto, inferior ao máximo permissível aos operadores, que é de  $8,0 \cdot 10^{-3}$   $\mu\text{Ci/ml}$ , de acordo com a tabela 2;

6. A atividade injetada no poço, foi de 21,3  $\mu\text{Ci}$  de  $^{82}\text{Br}$ . Conclui-se que o custo do radioisótopo foi muito baixo, da ordem de 0,08 ORTN.

7. Instalou-se facilmente o injetor de traçador e obteve-se bom desempenho durante a injeção, porque constatou-se a homogeneidade do traçador na coluna piezométrica do poço após a medição da taxa de contagem inicial. Determinou-se a taxa de contagem de 76.270 cpm, tendo sido prevista 80.000 cpm.

8. A condição:  $K_1 \geq K_2 \geq 10 \cdot K$ , para que o valor de  $\alpha$  independa dos valores absolutos dos coeficientes de permeabilidade, deve ser utilizada sempre que possu

---

ser admitido o valor de  $\alpha$  com erro máximo de 10%, aproximadamente, como neste trabalho, de finalidades práticas;

9. As simplificações na equação (25):  $V_v = V_m = V_c = 0$ , devem ser feitas quando se tratar de aplicações práticas, porque são parâmetros que têm pouca influência na diluição do traçador e além disso são de difícil determinação. Em muitos casos, pode-se também considerar nula a parcela  $V_d$ , principalmente quando prevêem-se valores elevados de  $V_D$ ;

10. Deve-se sempre utilizar carregador inativo, porque os resultados demonstraram que não houve adsorção do traçador pelas paredes do filtro e vizinhanças;

11. A metodologia apresentada, mostrou ter aplicação prática simples, pelas facilidades de transporte e manuseio do material radioativo em decorrência da baixa atividade; calibrar o equipamento de detecção em laboratório; transportar os equipamentos para o local de aplicação; injeção no poço; detecção e tratamento dos dados;

12. Supondo-se que todos os aquíferos tenham valores de  $d_m$  e  $v$  da mesma ordem de grandeza deste trabalho, pode-se estimar o limite superior de aplicabilidade do método, pela equação (13), com  $R_e = 1,0$ . Obtém-se deste modo,  $V_d = 11.520$  cm/dia ou  $V_D = 0,13$  cm/s. O limite inferior, situa-se próximo à velocidade decorrente dos efeitos da difusão molecular do traçador, ou seja:  $V_D = 0,26$  cm/dia ou  $V_D = 3,0 \cdot 10^{-6}$  cm/s.

### 5.1.2 - Conclusões sobre as determinações da direção e sentido do fluxo

1. O radioisótopo utilizado,  $^{51}\text{Cr}$  na forma química de  $\text{CrCl}_3$ , teve bom desempenho em todas as fases, da calibração à aplicação prática, porque decorridos 11,5 horas da injeção, aproximadamente, a maior parte do traçador estava adsorvido nas paredes do filtro e adjacências;

2. A geometria de calibração da sonda cintiladora gama colimada, com a sonda imersa no volume de 3.243 ml de água, diâmetro de 101,6 mm e altura de 400 mm, apesar de não reproduzir as condições reais, mostrou-se válida, talvez em decorrência da pequena diferença entre os diâmetros do filtro e do colimador. Neste caso, o traçador teve a mesma função de um traçador adsorvido nas paredes da geometria de calibração;

3. A concentração inicial do traçador  $^{51}\text{Cr}$ , foi de  $6,4 \cdot 10^{-2}$   $\mu\text{Ci/ml}$ , ligeiramente superior ao máximo permissível aos operadores, que é de  $5,0 \cdot 10^{-2}$   $\mu\text{Ci/ml}$ , de acordo com a tabela 2. Pode-se tolerar pequenas diferenças, porque trata-se de aplicação em água subterrânea, em geral, distante dos operadores;

4. A atividade injetada no poço, foi de 207  $\mu\text{Ci}$ . Conclui-se que o custo do radioisótopo foi muito baixo, da ordem de 0,86 ORTN;

5. O injetor pontual de traçador, mostrou ser de fácil operação e bem preciso. O volume injetado: 0,5 ml, não perturbou o fluxo da água no poço, porque o resultado obtido foi semelhante ao do método clássico;

6. O sistema de detecção, instalado após decorrido o tempo  $t_p = 11,5$  h da injeção, também foi de fácil instalação e operação, desde a orientação do colimador em relação ao piezômetro PZ-12, até às medições. Conclui-se por análise do gráfico radial, que a detecção do traçador, foi feita preferencialmente pela janela do colimador;

7. A detecção da radiação emitida pelo traçador, na mesma profundidade de injeção, 8,50 m, evidencia a inexistência de fluxos verticais, conforme a hipótese admitida;

8. A metodologia apresentada, tem condições de ser utilizada rotineiramente na prática, em decorrência da facilidade de se obter o traçador, injetá-lo e detectá-lo nas paredes do poço, como ocorreu neste trabalho.

## 5.2 - Sugestões

Partindo-se da experiência adquirida pode-se sugerir, para trabalhos futuros:

1. Estudar as influências do fluxo vertical  $V_v$ , da agitação para homogeneização do traçador  $V_m$  e da convecção provocada pela diferença de densidade  $V_c$ , na velocidade aparente  $V_a$ ;

2. Determinar o coeficiente  $\alpha$ , em função dos valores absolutos dos coeficientes de permeabilidade e comparar com o valor obtido após a simplificação feita neste trabalho;

3. Determinar a velocidade de Darcy, a direção e o sentido do fluxo em estratos, com a utilização de obturadores. Este método, permite traçar o perfil de permeabilidade do aquífero, de acordo com as velocidades de Darcy obtidas;

4. Desenvolver e construir injetor de traçador com controle eletrônico, tanto para injeções pontuais quanto para marcação da coluna piezométrica;

5. Desenvolver e construir colimador provido com dispositivo mecânico para manter a janela junto às paredes do filtro, aumentando deste modo, a resolução das medições.

---

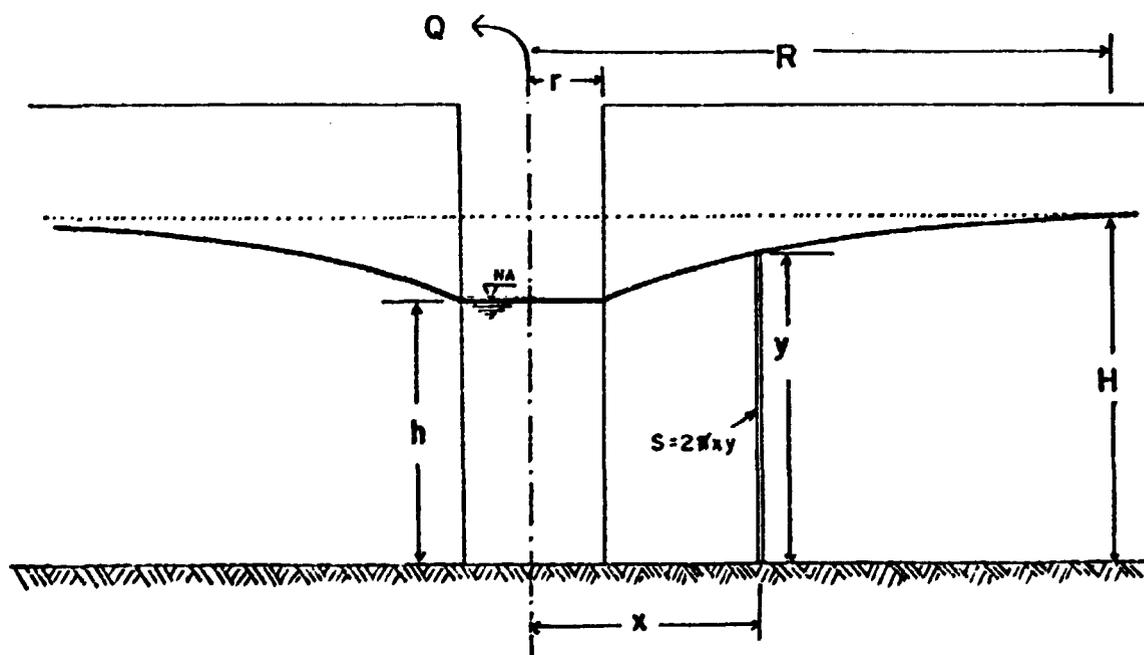
## APÊNDICE

Determinação do coeficiente de permeabilidade  $K$  do aquífero, pelo método do bombeamento

Hipóteses admitidas:

- a) poço cilíndrico de paredes permeáveis;
- b) estrato de permeabilidade uniforme que repousa sobre uma camada impermeável;
- c) fundo do poço assente sobre a camada impermeável.

Esquema típico de um poço submetido ao bombeamento durante os ensaios:



De acordo com a equação da continuidade, temos:

$$Q = v_D \cdot S$$

Pela Lei de Darcy,

$$v_D = K \cdot \frac{dy}{dx}$$

$S = 2\pi x.y$ ;  $S = \text{área da superfície cilíndrica de raio } r$

Portanto:

$$Q = K \cdot \frac{dy}{dx} \cdot 2\pi x.y = 2\pi K \cdot x.y \cdot \frac{dy}{dx}$$

e

$$y \cdot dy = \frac{Q}{2K\pi} \cdot \frac{dx}{x}$$

Integrando-se a equação acima, obtém-se:

$$\frac{y^2}{2} = \frac{Q}{2K\pi} \cdot \ln x \pm C$$

A constante de integração da equação é determinada pelas condições de contorno seguintes:

Para  $y = H$ ,  $x = R$

Para  $y = h$ ,  $x = r$

Resulta:

$$H^2 - h^2 = \frac{Q}{K\pi} (\ln R - \ln r)$$

ou

$$K = \frac{Q}{(H^2 - h^2)\pi} \cdot \ln \frac{R}{r}$$

onde:

$K = \text{coeficiente de permeabilidade;}$

$Q = \text{taxa de bombeamento;}$

$H = \text{espessura do aquífero;}$

$h = \text{altura da água no poço, durante o bombeamento;}$

$R = \text{distância limite na qual é perceptível a influência do poço;}$

$r = \text{raio interno do poço.}$

**TABELA 1****Equivalência , múltiplos e sub-múltiplos da unidade Atividade**

---

$$1 \text{ curie} = 1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ desintegrações/s (dps)}$$

$$1 \text{ milicurie} = 1 \text{ mCi} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ desintegrações/s (dps)}$$

$$1 \text{ microcurie} = 1 \mu\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ desintegrações/s (dps)}$$

---

TABELA 2

Alguns radioisótopos utilizados na hidrologia. [Segundo: Gómez, H.R (9)]

1 Radio- isótopo	2 Forma química mais usada	3 Meio-vida	4 Concentração máxima permisível no ar (μ)		5 Tipo de radiação Principais componentes		6 Algumas referências em relação ao seu comportamento (usual)
			μCi/cm <sup>3</sup>		Beta	Gamma	
			(m)	(xxx)	MeV	MeV	
<sup>3</sup> H	H <sub>2</sub> O	12,3 a	0,1	3.10 <sup>-3</sup>	0,010		I II
<sup>14</sup> C		5700 a	0,2	0.10 <sup>-6</sup>	0,100		
<sup>24</sup> Na		15 h	0.10 <sup>-3</sup>	2.10 <sup>-6</sup>	1,40	2,70 1,57	III IV
<sup>32</sup> P		14,2 d	0.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-8</sup>	1,71		IV
<sup>35</sup> S		89 d	2.10 <sup>-3</sup>	0.10 <sup>-5</sup>	0,167		II
<sup>36</sup> Cl		3.10 <sup>6</sup> a	2.10 <sup>-3</sup>	0.10 <sup>-5</sup>	0,71		II
<sup>48</sup> Co	Co EDTA	105 d	3.10 <sup>-4</sup>	0.10 <sup>-8</sup>	0,20		III IV V
<sup>48</sup> Sc		84 d	10 <sup>-3</sup>	0.10 <sup>-8</sup>	0,30	1,12 0,89	IV V
<sup>51</sup> Cr	Cr EDTA	27,8 d	0,05	2.10 <sup>-3</sup>		0,32	II IV V
<sup>58</sup> Co	Co EDTA K <sub>2</sub> Co(CN) <sub>6</sub>	72 d	4.10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	0,47	0,81	V
<sup>59</sup> Fe	Fe EDTA	45 d	2.10 <sup>-3</sup>	0.10 <sup>-5</sup>	0,27 0,40	1,10 1,09	IV V
<sup>60</sup> Co	Co EDTA K <sub>2</sub> Co(CN) <sub>6</sub>	5,2 a	10 <sup>-3</sup>	0.10 <sup>-5</sup>	0,31	1,17 1,33	II IV V
<sup>65</sup> Zn	Zn EDTA	245 d	3.10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>		1,12	IV V
<sup>82</sup> Br	NH <sub>4</sub> Br K <sub>2</sub> Br	36 h	0.10 <sup>-3</sup>	3.10 <sup>-4</sup>	0,45	0,50 1,47	II
<sup>86</sup> Rb		18 d	2.10 <sup>-3</sup>	7.10 <sup>-5</sup>	0,60 1,70	1,00	IV
<sup>89</sup> Sr		51 d	3.10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	1,40		IV
<sup>90</sup> Sr - <sup>90</sup> Y		89 a 64 h			0,54 2,26		IV
<sup>106</sup> Ru - <sup>106</sup> Rh							II IV V
<sup>110</sup> Ag		263 d	0.10 <sup>-4</sup>	3.10 <sup>-5</sup>	0,60 0,60		
<sup>114</sup> In			0.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-5</sup>			II IV V
<sup>124</sup> Sb		60 d	7.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-5</sup>	0,61 0,22	1,70 0,72	IV V
<sup>131</sup> I	NaI	8 d	0.10 <sup>-5</sup>	2.10 <sup>-5</sup>	0,61	0,30 0,64	II
<sup>140</sup> Ba - <sup>140</sup> La		12,8 d 40 h	0.10 <sup>-4</sup>	3.10 <sup>-5</sup>	1,30 0,90	1,50 0,60	IV
<sup>143</sup> Pr			10 <sup>-3</sup>	0.10 <sup>-5</sup>			IV
<sup>147</sup> Pm		2,5 a	0.10 <sup>-3</sup>	2.10 <sup>-4</sup>	0,22		IV
<sup>170</sup> Tm		127 d	10 <sup>-3</sup>	0.10 <sup>-5</sup>	0,97	0,094	IV
<sup>192</sup> Ir	Ir EDTA	74 d	10 <sup>-3</sup>	0.10 <sup>-5</sup>	0,67 0,54	0,32 0,40	IV
<sup>198</sup> Au	coloidal	66 h	2.10 <sup>-3</sup>	0.10 <sup>-5</sup>	0,96	0,41	

(x) De: "Basic Safety Standards for Rad Protection" IAEA, Safety Serie n:9

(xx) Operadores

(xxx) Público em geral

(xxxx) I - Excelente

II - Existem numerosos trabalhos confirmando seu bom comportamento em águas superficiais e subterrâneas

III - Se as águas estão saturadas com esse elemento, os resultados podem ser satisfatórios

IV - Como cátions, geralmente não são bons traçadores

V - Utilizados geralmente na forma de complexos

TABELA 3

Alguns radioisótopos produzidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear de S. Paulo, para aplicação em hidrologia .  
[Segundo : CNEN/SP (4)]

Radioisótopo	Forma química
$^{131}\text{I}$	NaI
$^{82}\text{Br}$	$\text{NH}_4\text{Br}$ ou $\text{KBr}$
$^{51}\text{Cr}$	$\text{CrCl}_3$ ou $\text{Na}_2\text{CrO}_4$
$^{32}\text{P}$	$\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ou $\text{H}_3\text{PO}_4$
$^{35}\text{S}$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$ ou $\text{H}_2\text{SO}_4$
$^{42}\text{K}$	KCl

TABELA 4

Preço médio em ORTN\* de alguns radioisótopos, vigentes nos contratos de trabalho. [Segundo: CNEN/SP, (4)]

Atividade (mCi)	Preço médio em ORTN		
	$^{82}\text{Br}$	$^{51}\text{Cr}$	$^{131}\text{I}$
1	3,42	3,83	1,62
2	4,53	5,95	2,04
3	4,94	7,84	2,36
4	5,32	8,71	2,70
5	5,70	9,41	2,97

\*ORTN de dezembro de 1983 : Cr\$ 7.012,99

TABELA 5

Variação da taxa de contagem, com a  
posição da sonda cintiladora

Atividade : 0,0367 uCi de Br  
Volume : 8.107 ml

Posição da sonda y (mm)	Taxa de contagem n (cpm)
0	2.810
100	3.240
200	3.643
300	3.796
400	4.101
500	4.095
600	3.052

TABELA 6

Taxas de contagem obtidas com a sonda cintiladora gama, para concentrações crescentes de  $^{82}\text{Br}$ .

Concentração do padrão :  $0,0367 \mu\text{Ci/ml}$

Volume acumulado ( ml )	Atividade acumulada ( $\mu\text{Ci}$ )	Concentração $C \cdot 10^6$ ( $\mu\text{Ci/ml}$ )	Taxa de contagem $n$ ( cpm )
0,0	--	0,0	2.325=BG
1,0	0,0367	4,5	4.106
2,0	0,0734	9,1	5.590
3,0	0,1101	13,6	6.346
4,0	0,1468	18,1	7.621
6,0	0,2202	27,1	10.259
8,0	0,2936	36,2	12.474
11,0	0,4037	49,7	16.533
14,0	0,5138	63,3	20.680
20,0	0,7340	90,3	28.155
26,0	0,9542	117,3	34.941
35,0	1,2845	157,8	46.272
45,0	1,6515	202,6	58.463
55,0	2,0185	258,3	70.063

TABELA 7

Taxas de contagem obtidas com a sonda cintiladora gama, com o colimador, para concentrações crescentes de  $^{51}\text{Cr}$ .

Concentração do padrão : 5,0  $\mu\text{Ci} / \text{ml}$

Volume acumulado ( ml )	Atividade acumulada ( $\mu\text{Ci}$ )	Concentração $C \cdot 10^3$ ( $\mu\text{Ci} / \text{ml}$ )	Taxa de contagem n ( cpm )
0,0	--	0,0	516 = BG
1,0	5,0	1,5	1.781
2,0	10,0	3,1	2.703
3,0	15,0	4,6	3.815
4,0	20,0	6,2	4.753
5,0	25,0	7,7	5.616
7,0	35,0	10,8	7.742
9,0	45,0	13,8	9.793
11,0	55,0	16,9	11.387
13,0	65,0	20,0	13.515
15,0	75,0	23,0	15.146
17,0	85,0	26,1	17.094
19,0	95,0	29,1	18.904
20,0	100,0	30,6	19.985

TABELA 8

Valores obtidos na experiência para determinação da velocidade de Darcy.

$$n = n_0 \cdot \exp(0,693 \cdot t / 35,660)$$

$$n = 2.412 \text{ cpm}$$

t (min.)	n' (cpm)	n (cpm)	n - n <sub>BG</sub> (cpm)	$\frac{C_t}{C_0}$
0	76.270	76.270	73.858	1,00
10	75.510	75.755	73.343	0,99
20	74.180	74.663	72.251	0,98
30	73.560	74.279	71.867	0,97
40	73.010	73.964	71.552	0,97
50	72.040	73.218	70.806	0,96
60	70.820	72.212	69.800	0,95
70	69.360	70.953	68.541	0,93
80	68.600	70.404	67.992	0,92
90	68.020	70.035	67.623	0,92
100	67.670	69.901	67.489	0,91
110	66.140	68.543	66.131	0,90
120	65.690	68.298	65.886	0,89
130	65.114	67.919	65.507	0,89

TABELA 9

Valores obtidos na experiência para determinação da direção e sentido do fluxo.

$$n_{86} = 2.215 \text{ cpm}$$

Ângulo ( ° )	n ( cpm )
0	30.771
15	34.789
30	38.204
45	39.432
60	38.222
75	35.664
90	33.104
105	30.994
120	28.050
135	25.601
150	22.804
165	20.008
180	17.992
195	16.878
210	15.230
225	15.420
240	15.843
255	15.669
270	16.490
285	17.992
300	19.715
315	21.992
330	24.173
345	27.840

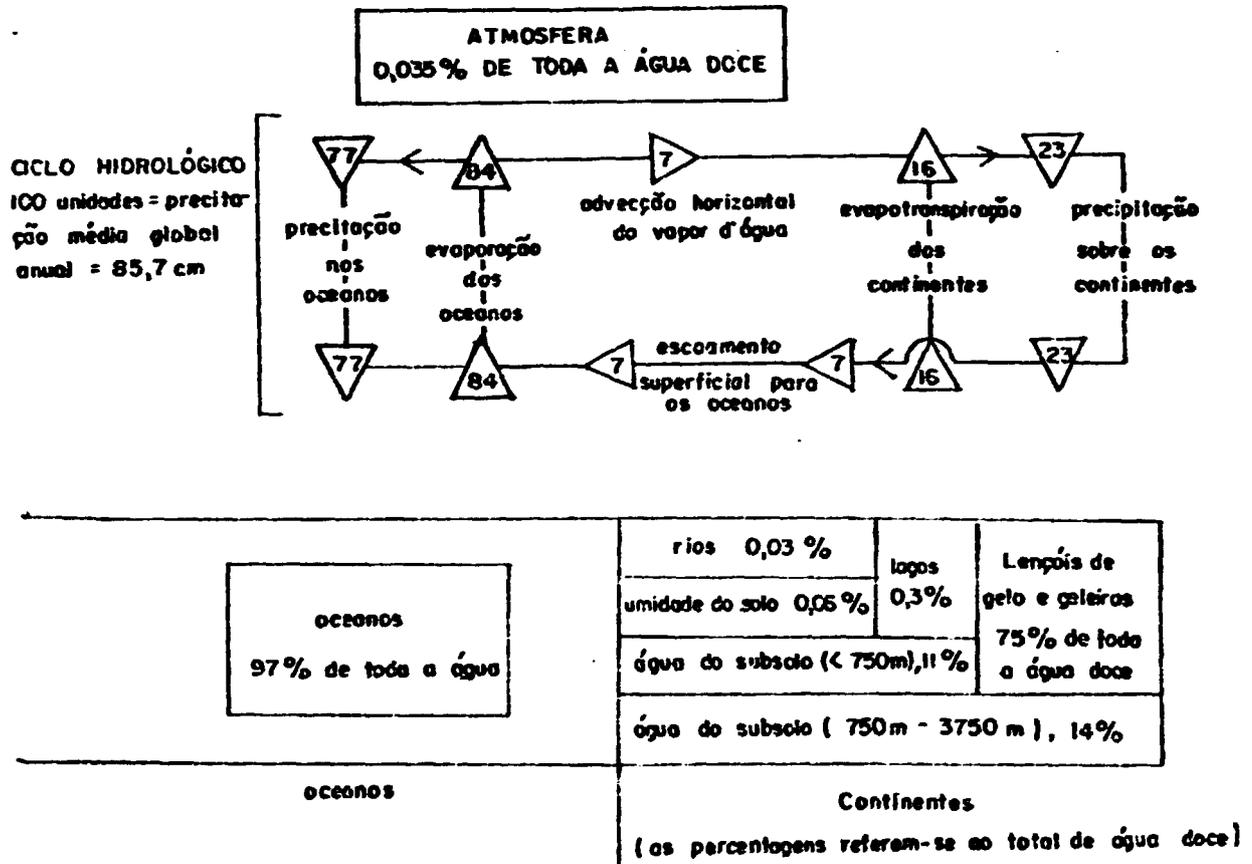


FIGURA 1 - O ciclo hidrológico e o armazenamento da água terrestre. A percentagem oceânica está relacionada com toda a água terrestre; as percentagens da água continental e atmosférica referem-se a toda a água doce. As unidades do ciclo hidrológico estão distribuídas pressupondo-se média global de 100 unidades para a precipitação (77 oceânicas e 23 continentais). [Segundo: Mbre, R.J. (19)]

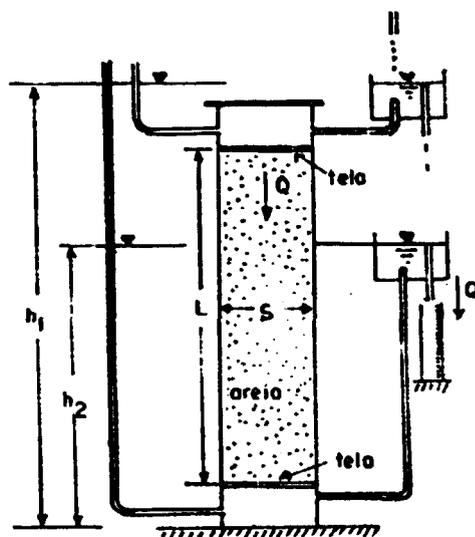


FIGURA 2a - Experiência de Darcy. [ Segundo: Bear, J. (2) ]

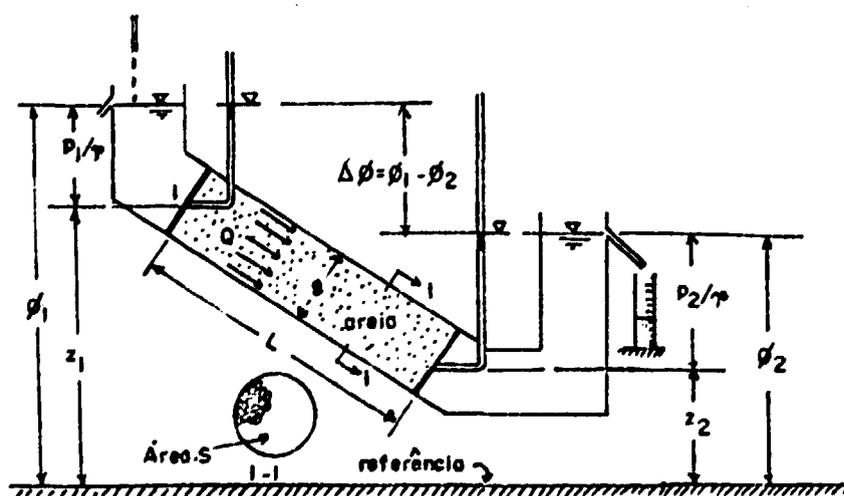


FIGURA 2b - Percolação através de um filtro de areia, inclinado  
[ Segundo: Bear, J. (2) ]

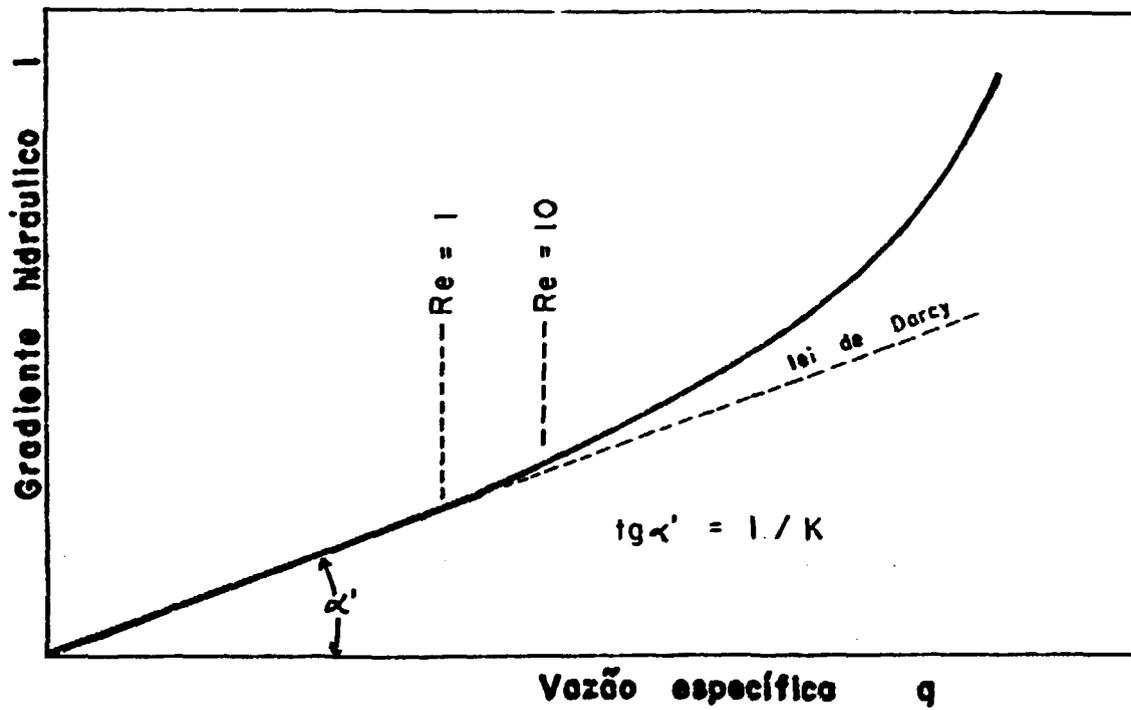


FIGURA 3 - Curva esquemática relacionando a vazão específica e o gradiente hidráulico. [ Segundo: Bear, J. (2) ]

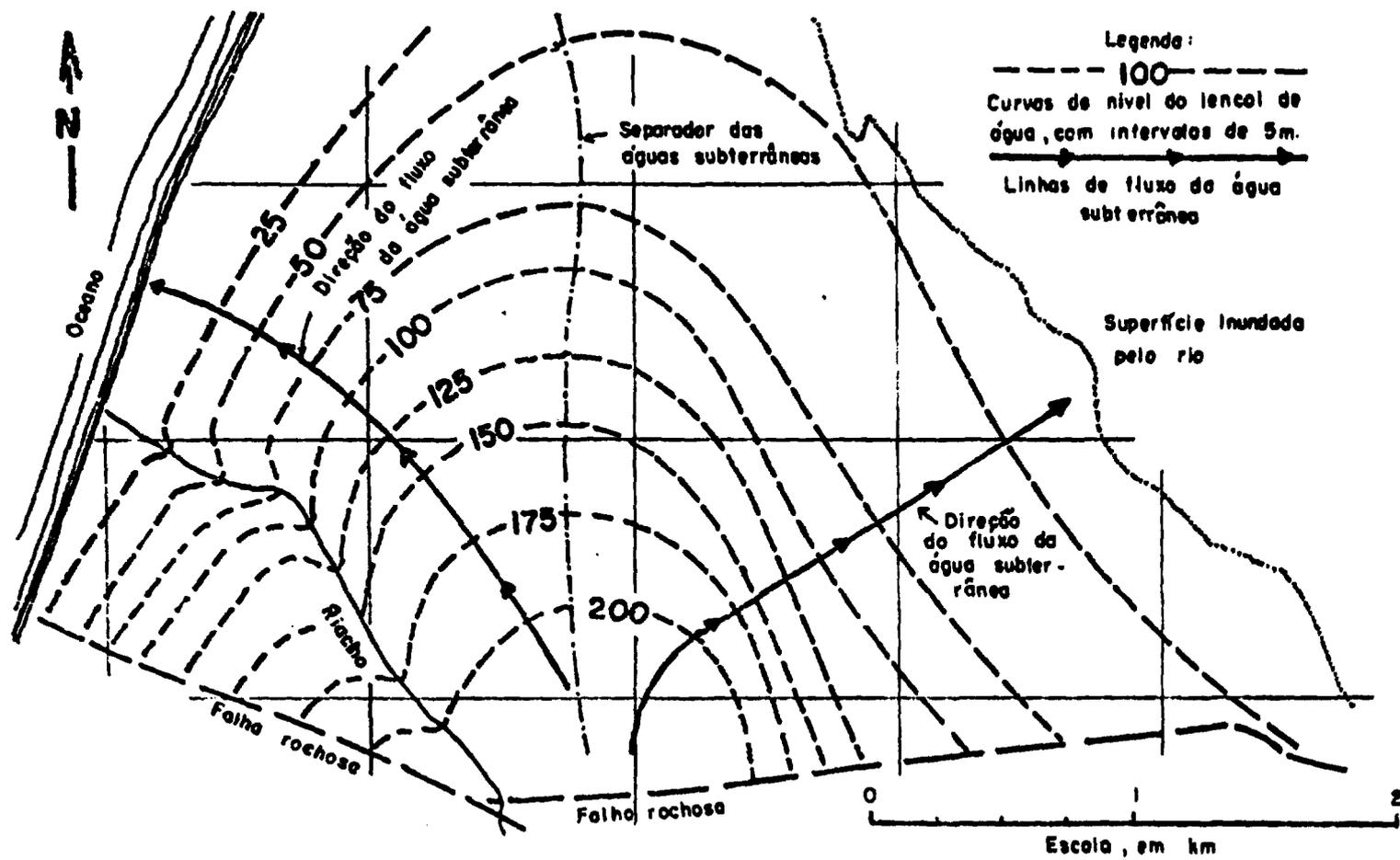
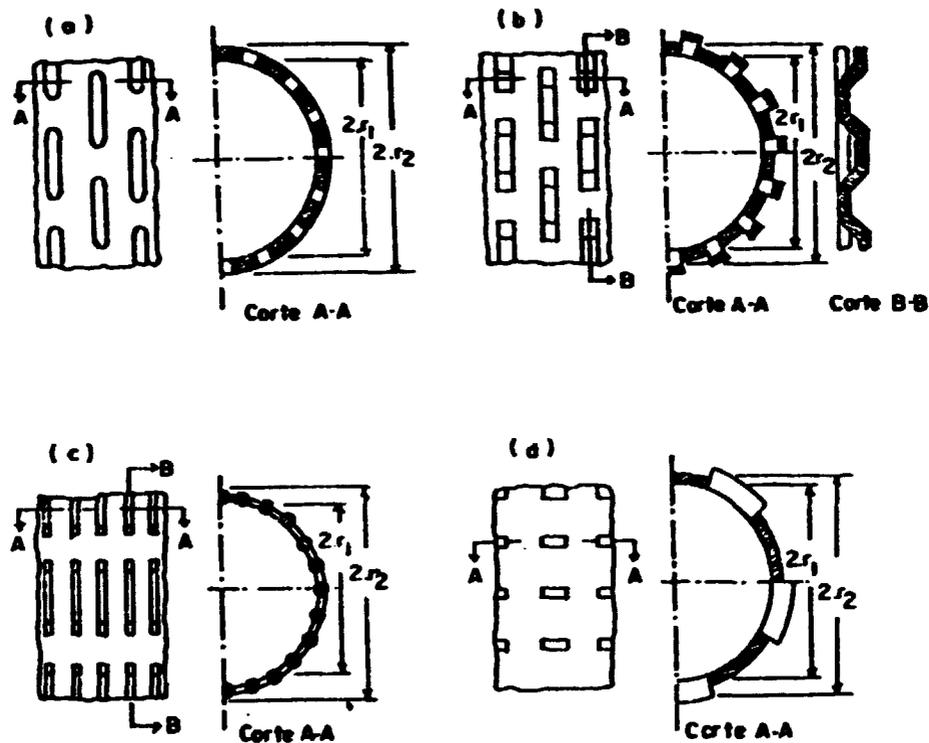
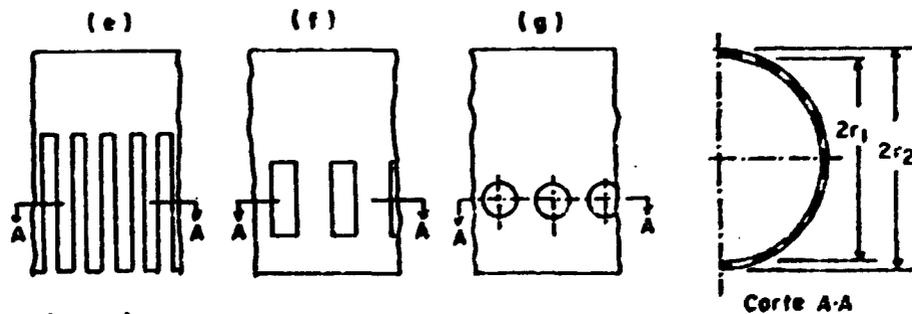


FIGURA 4 - Curvas equipotenciais da água subterrânea com indicação da direção e sentido do fluxo. [ Segundo: Cetesb (5) ]



Legenda:  
 a, b, c e d : Filtros metálicos



Legenda:  
 e, f e g : Filtros de PVC

FIGURA 5- Exemplos de alguns filtros utilizados em poços.  
 [ Segundo : Drost, W. (7) ]

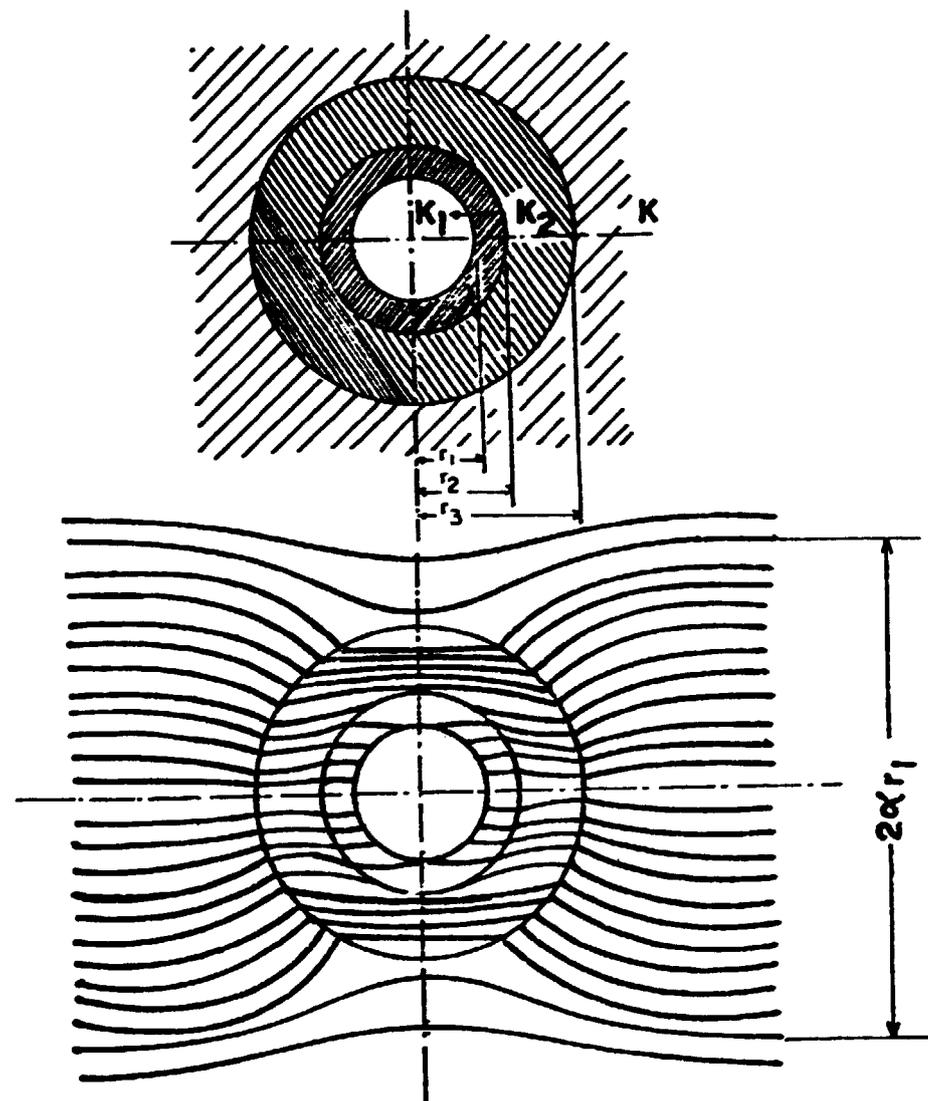


FIGURA 6 - Corte típico da secção transversal de um poço e as linhas de fluxo obtidas com traçadores corantes.  
 [ Segundo : Drost, W. (7) ]

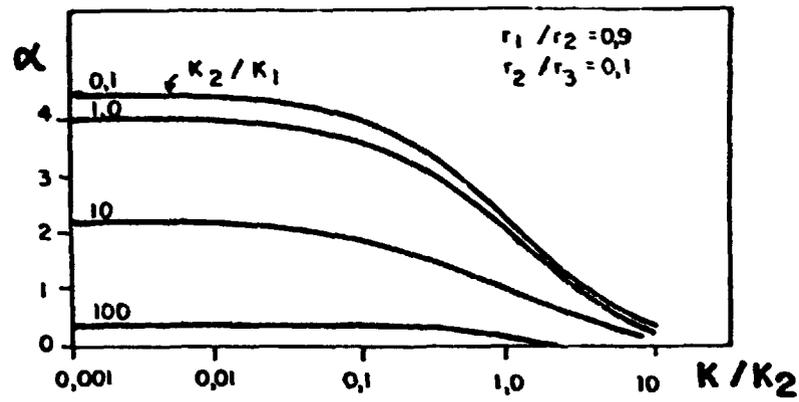


FIGURA 7 - Valores de  $\alpha$ , em função de  $K/K_2$  e  $K_2/K_1$ , com  $r_1/r_2 = 0.9$  e  $r_2/r_3 = 0.1$ . [Segundo: Drost, W. (7)]

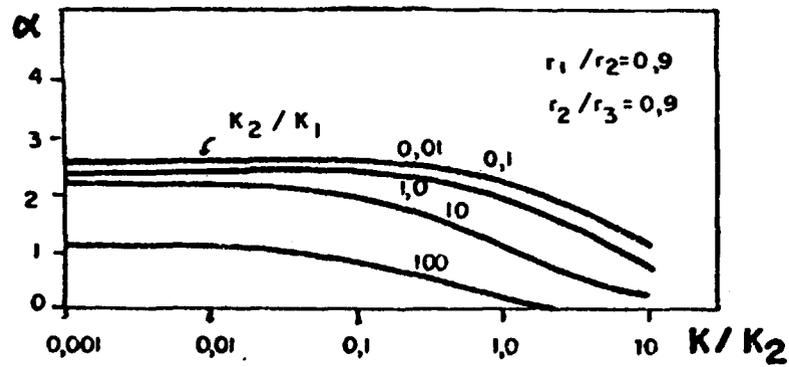


FIGURA 8 - Valores de  $\alpha$ , em função de  $K/K_2$  e  $K_2/K_1$ , com  $r_1/r_2 = 0.9$  e  $r_2/r_3 = 0.9$ . [Segundo: Drost, W. (7)]

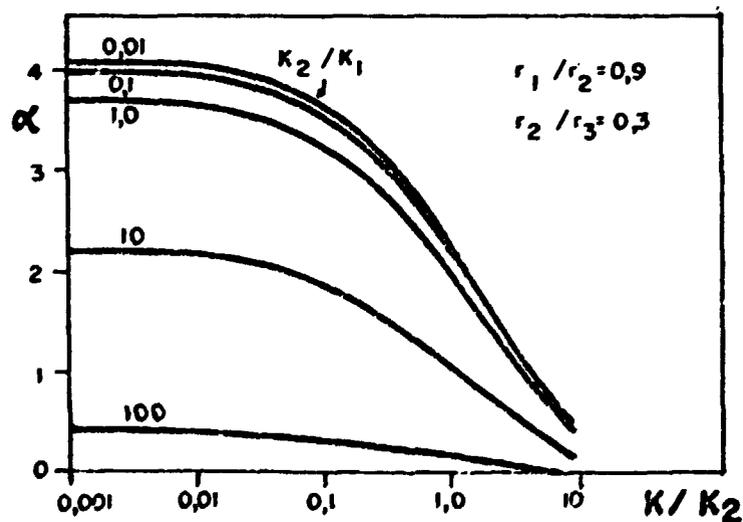


FIGURA 9 - Valores de  $\alpha$ , em função de  $K/K_2$  e  $K_2/K_1$ , com  $r_1/r_2 = 0.9$  e  $r_2/r_3 = 0.3$ . [Segundo: Drost, W. (7)]

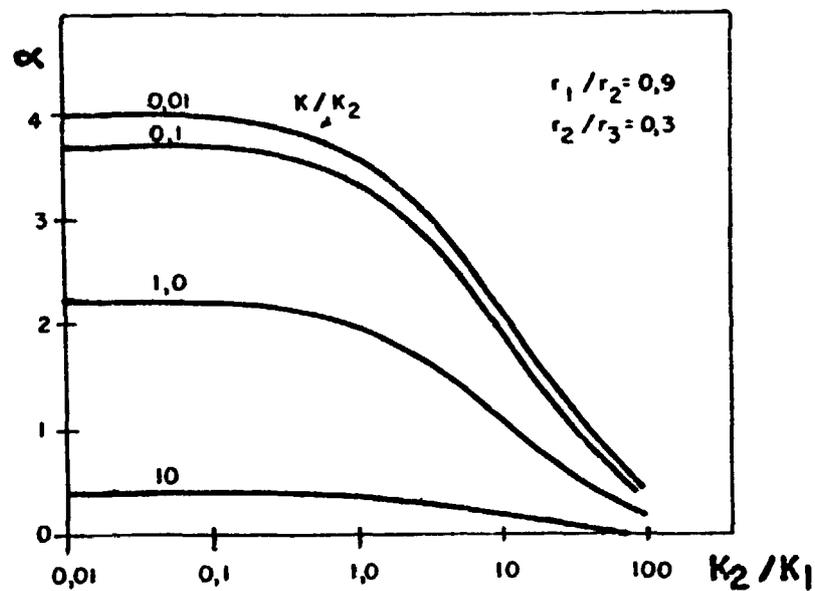


FIGURA 10 - Valores de  $\alpha$ , em função de  $K_2/K_1$  e  $K/K_2$ , com  $r_1/r_2 = 0,9$  e  $r_2/r_3 = 0,3$ . [Segundo: Drost, W. (7)]

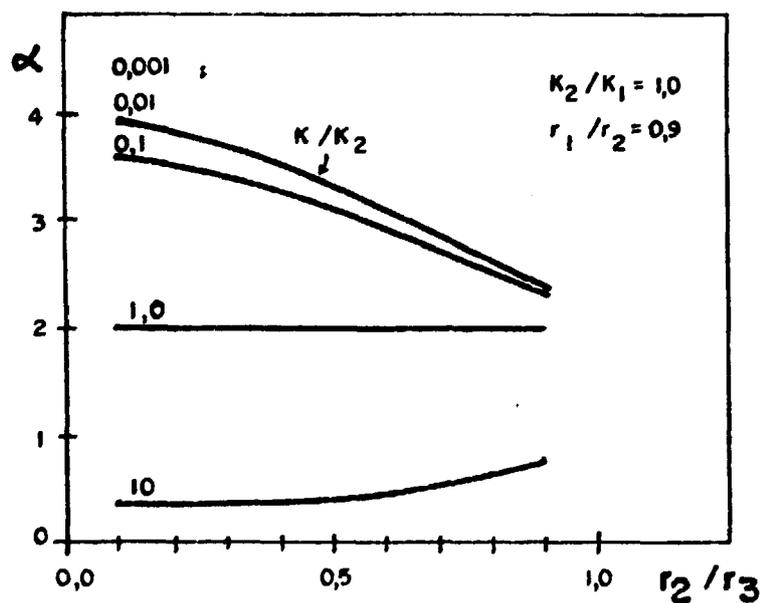


FIGURA 11 - Valores de  $\alpha$ , em função de  $r_2/r_3$  e  $K/K_2$ , com  $K_2/K_1 = 1,0$  e  $r_1/r_2 = 0,9$ . [Segundo: Drost, W. (7)]

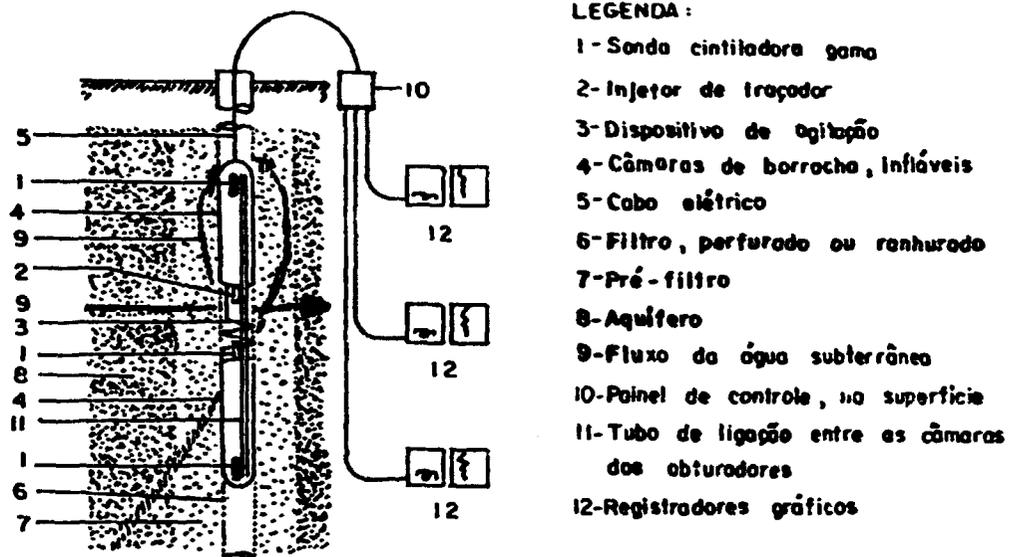


FIGURA 12 - Dispositivo obturador de fluxos verticais.  
[Segundo: Drost, W. (6)]

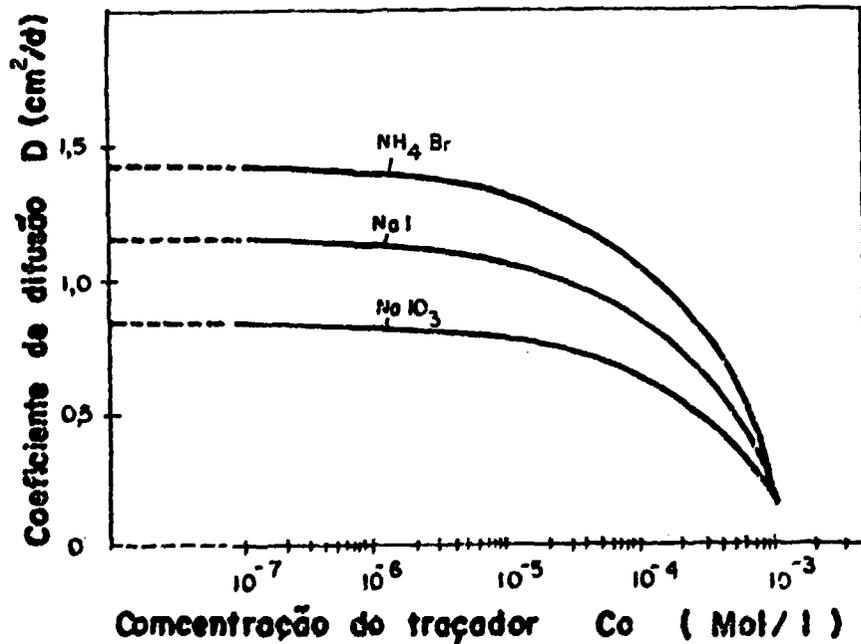


FIGURA 13 - Coeficiente de difusão em função da concentração do traçador, para alguns radioisótopos.  
[Segundo: Drost, W. (7)]

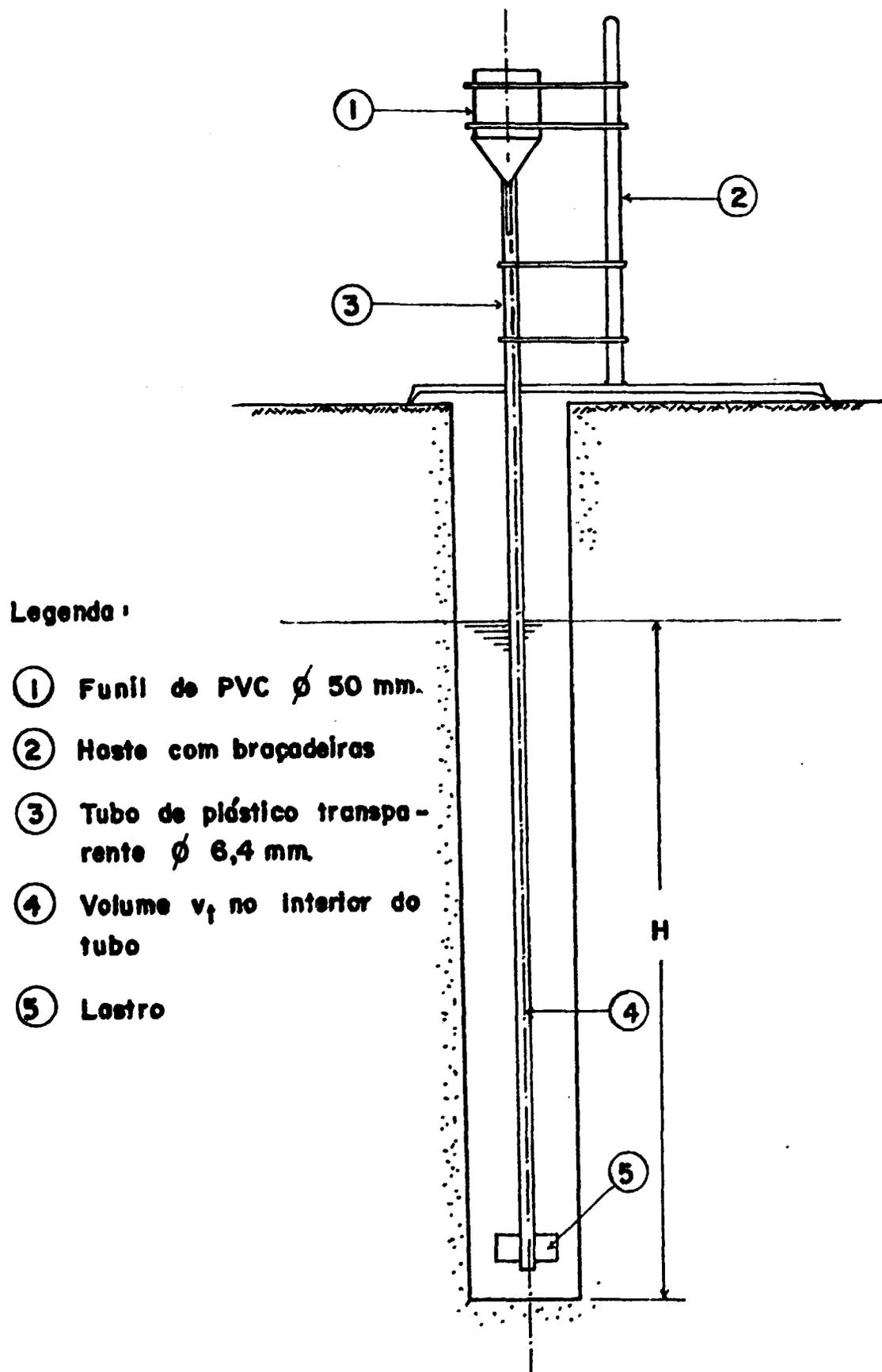
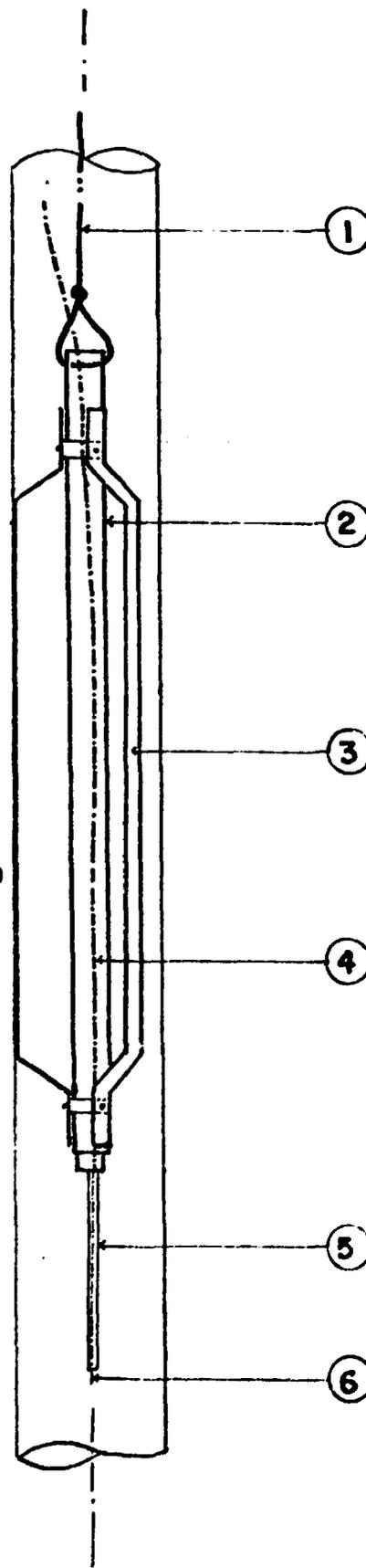


FIGURA 14 - Injetor de traçador, para marcação da coluna piezométrica.

**Legenda:**

- ① Corda de "nylon"
- ② Tubo de alumínio  $\varnothing$  25 mm.
- ③ Fita de aço 20 mm.
- ④ Tubo plástico de  $\varnothing$  3,2 mm conectado à micro bomba
- ⑤ Tubo de aço inox  $\varnothing$  6,4 mm
- ⑥ Bico injetor  $\varnothing$  3,2 mm

**Escala 1:5**



**FIGURA 15 - Injetor pontual de traçador .**

Legenda :

- ① Encaixe para a haste
- ② Aresta correspondente à janela do colimador
- ③ Encaixe da sonda cintiladora gama
- ④ Janela do colimador
- ⑤ Blindagem de chumbo

Escala 1:2,5

Material : alumínio

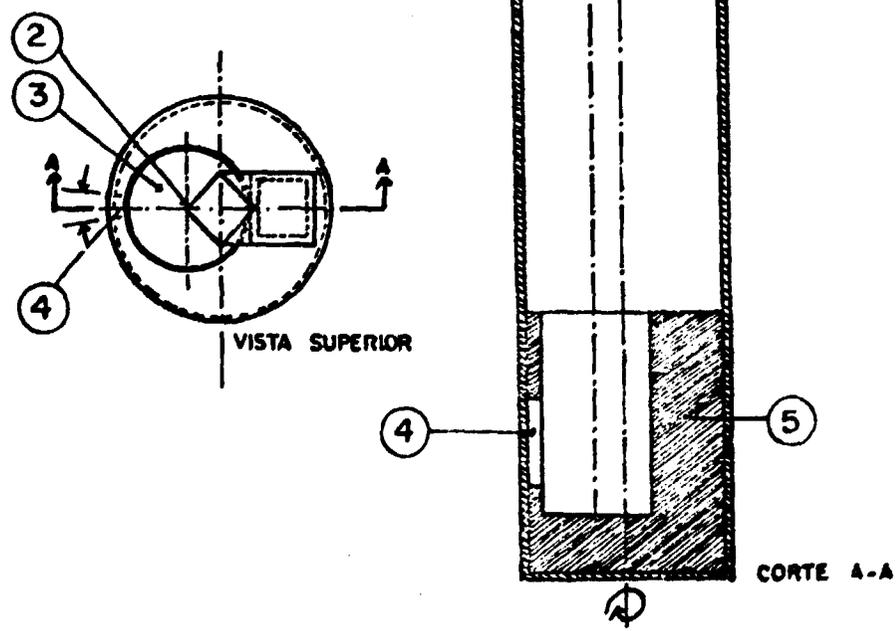


FIGURA 16 - Colimador para a sonda cintiladora gama

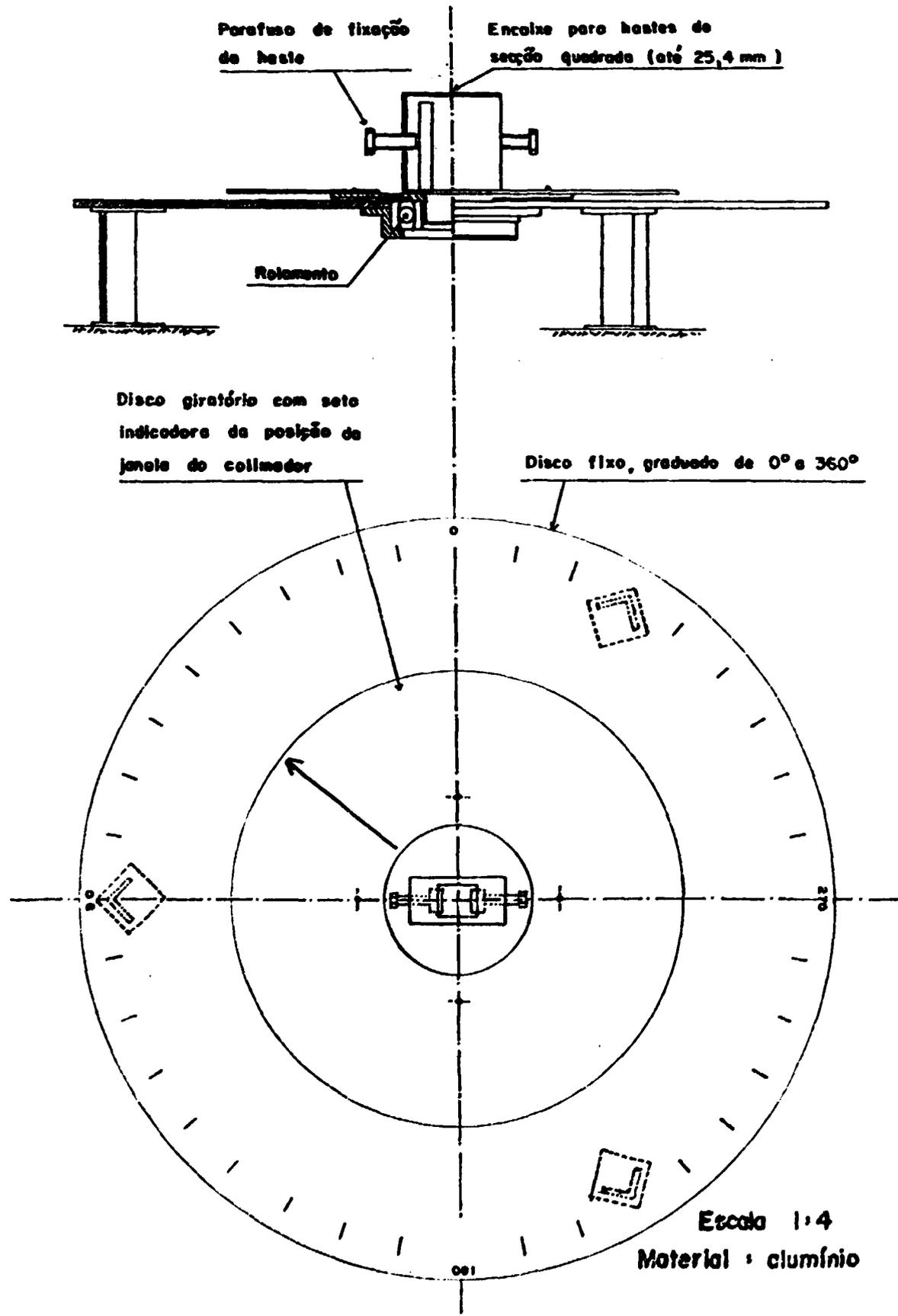


FIGURA 17 - Suporte para hastes de secção quadrada, giratório, com indicação da posição do colimador.

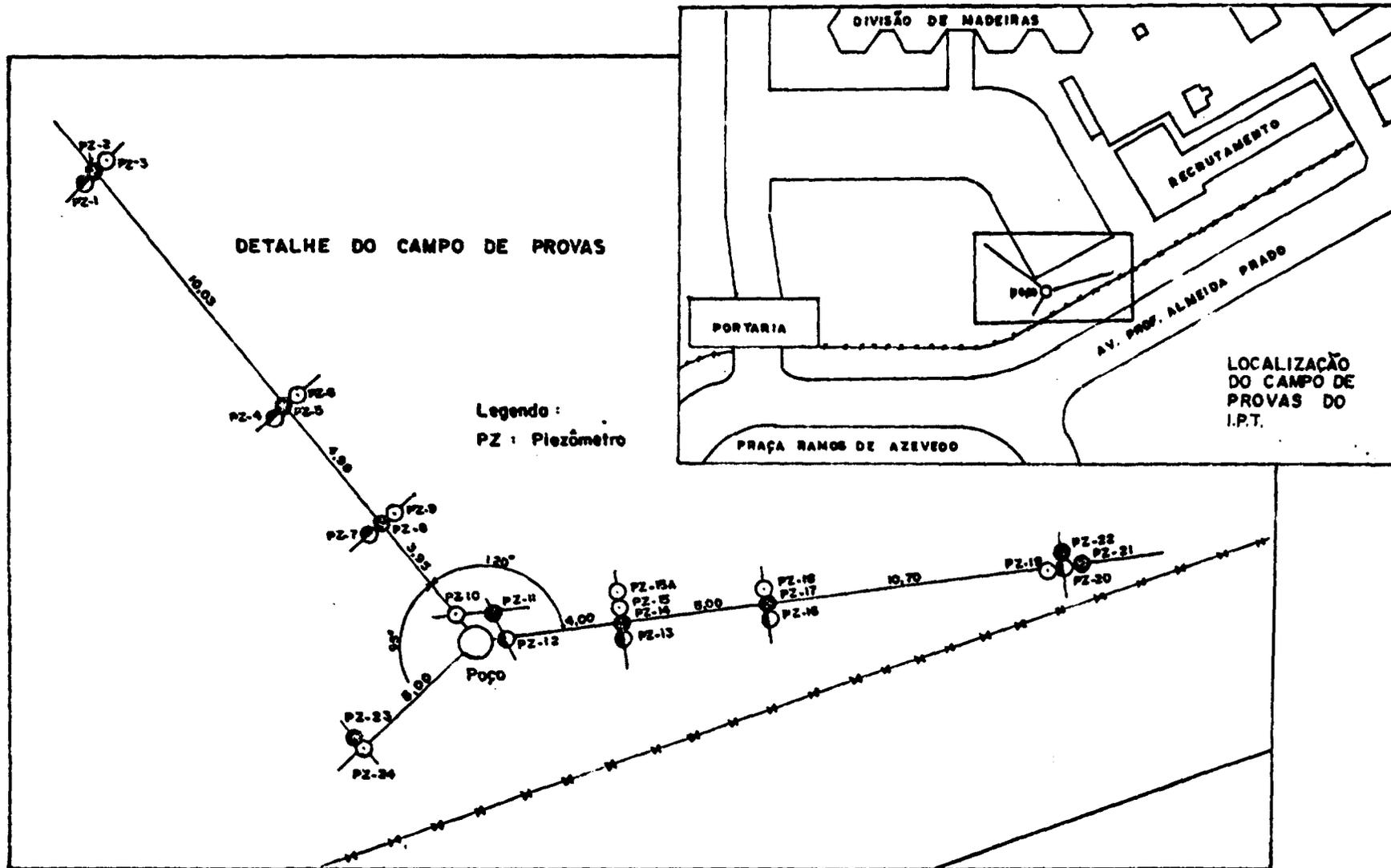


FIGURA 18 - Localização do poço no campo de provas do IPT. [ Segundo : IPT ,(12) ]

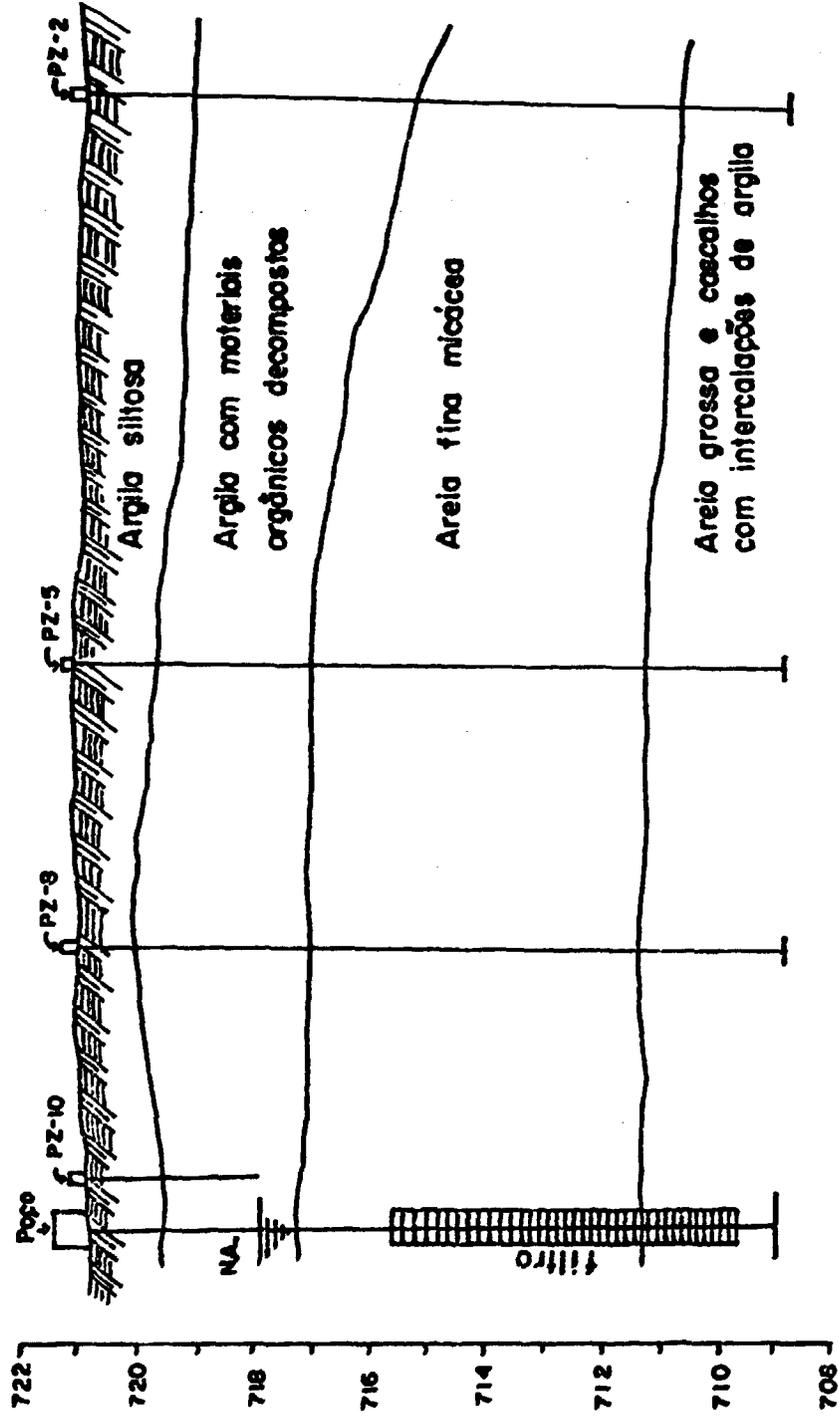


FIGURA 19 - Perfil litológico nas imediações do poço, entre os piezômetros 2 e 10. [ Segundo : IPT (12) ]

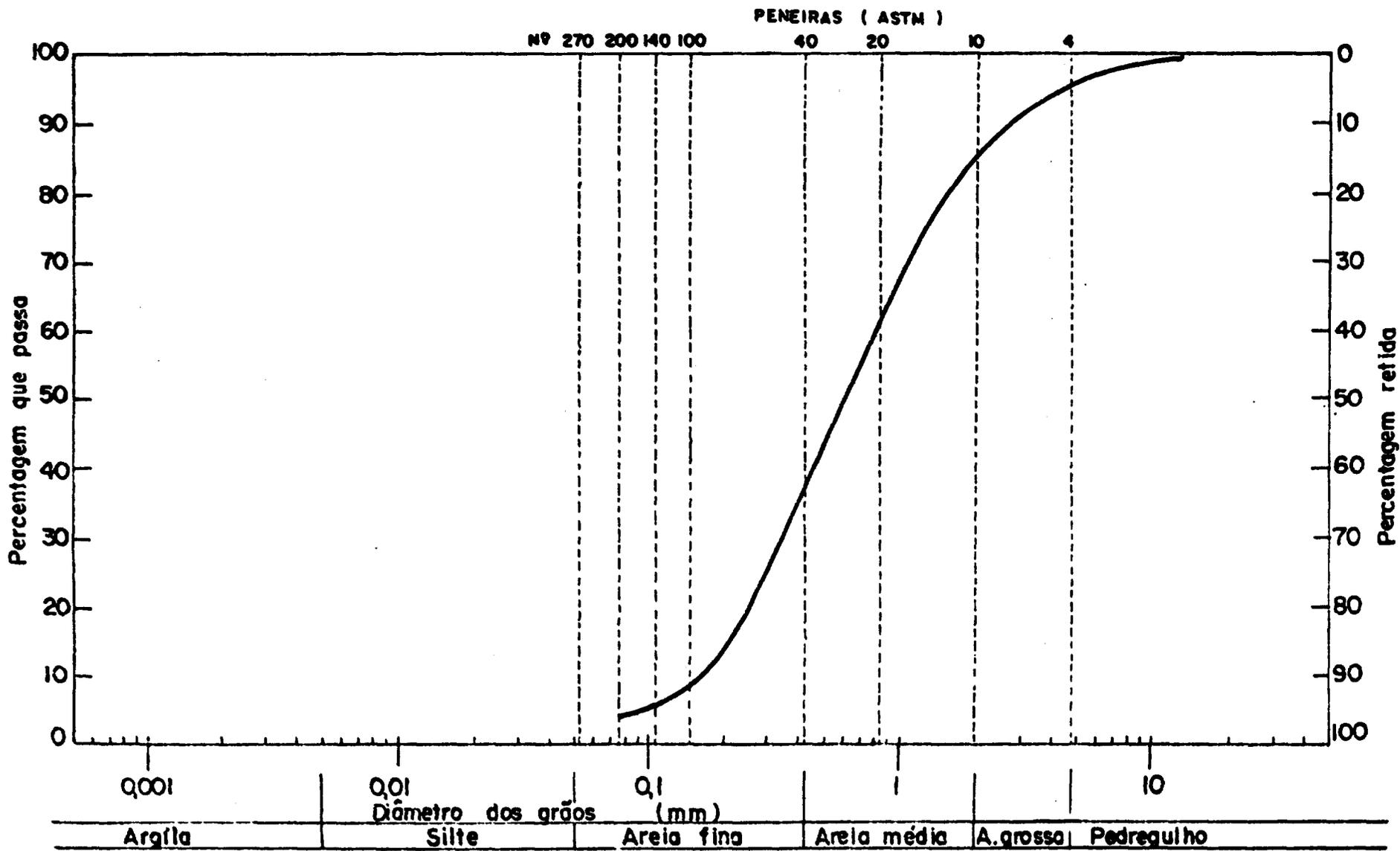
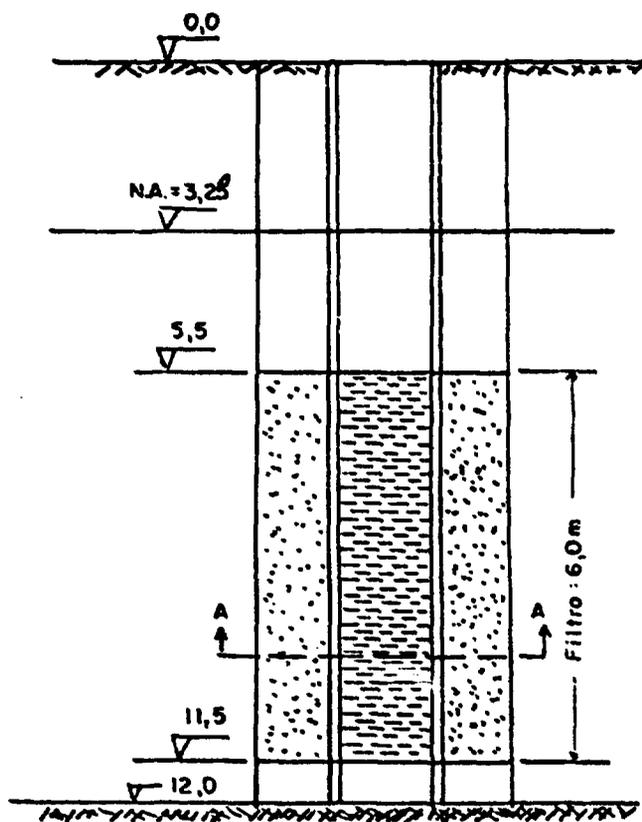
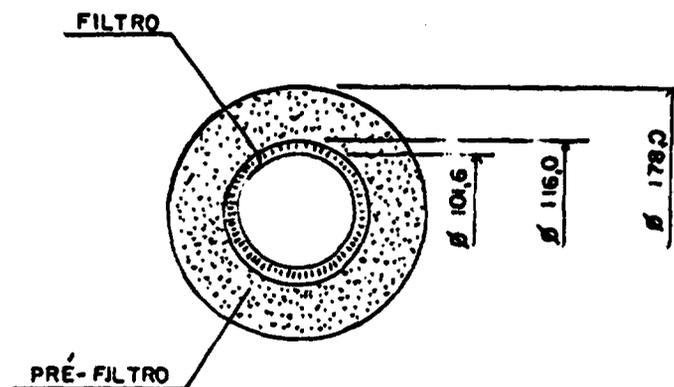


FIGURA 20 - Distribuição granulométrica representativa do melo poroso. [ Segundo : IPT , (14) ]



**Secção longitudinal**

Cotas em metros



**Corte A-A**

medidas em milímetros

FIGURA 21 - Corte longitudinal e secção transversal do poço . [ Segundo : IPT , ( 12 ) ]

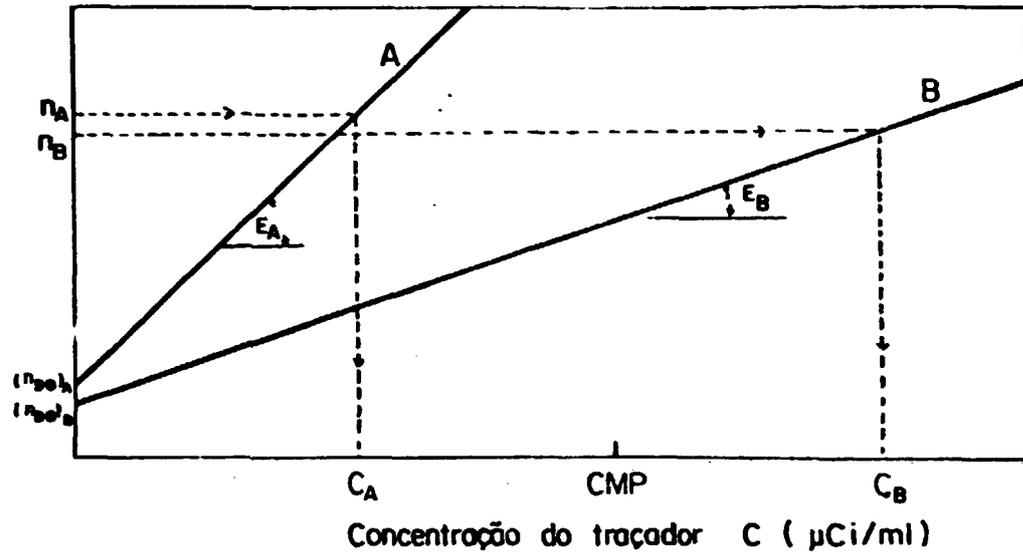


FIGURA 22 - Curvas de calibração do detector, para distintos volumes de diluição

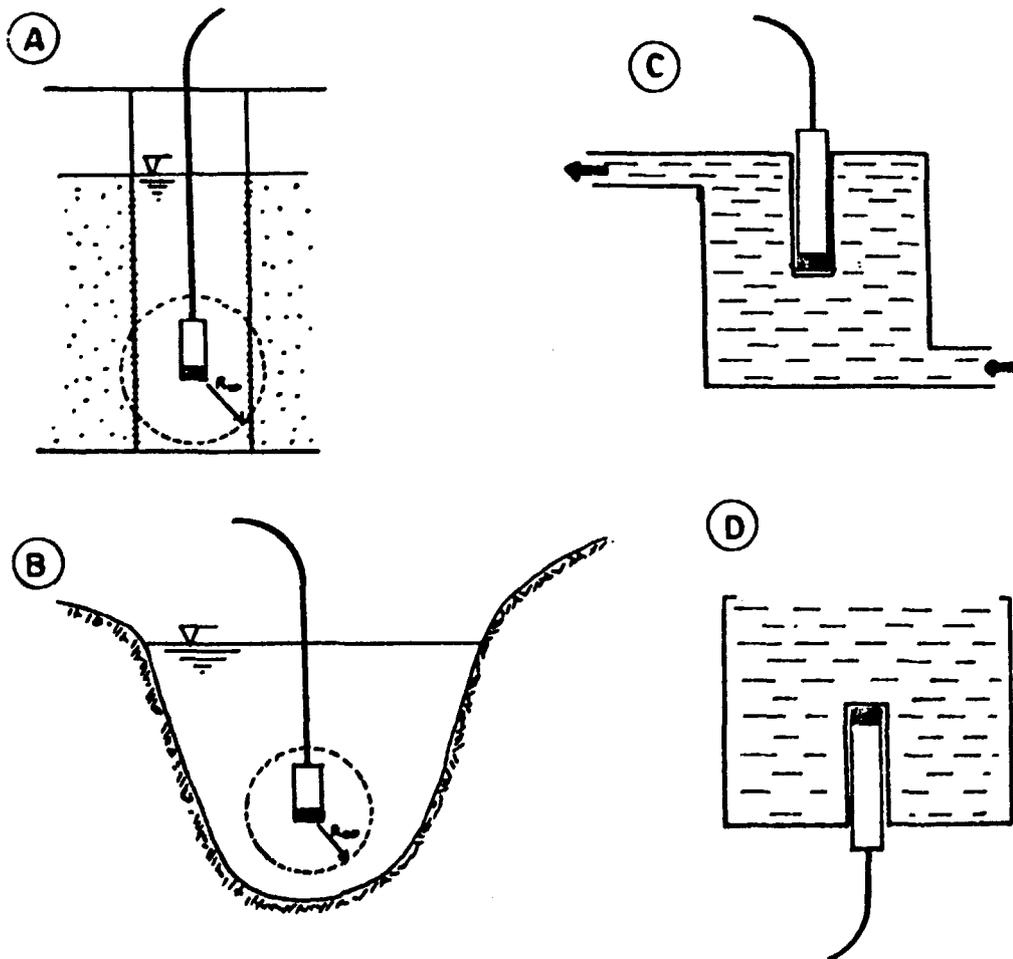
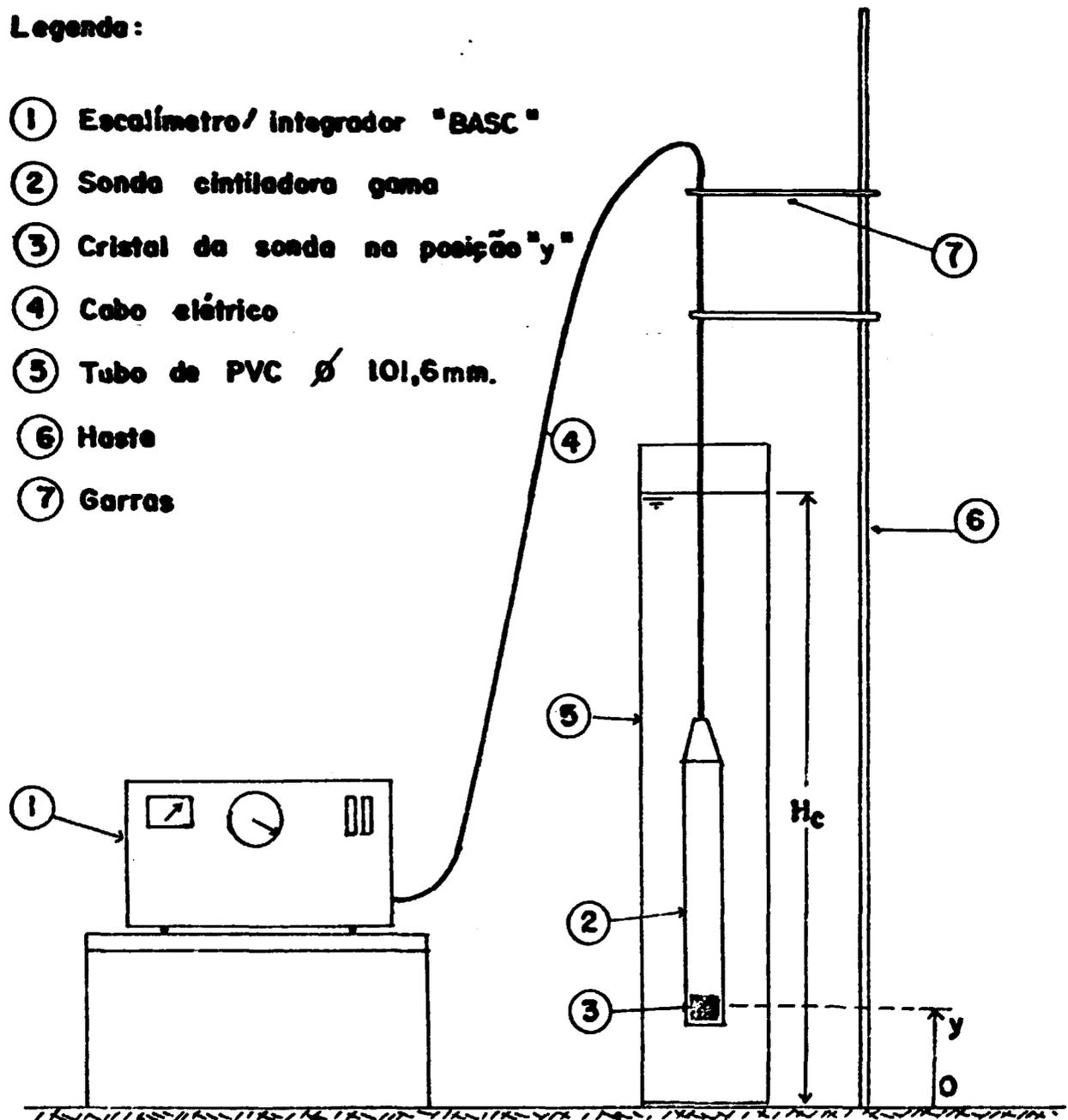


FIGURA 23 - Técnicas de detecção com sonda cintiladora gama, de uso mais frequente.  
[ Segundo : Bedmor, A.P. (3) ]

**Legenda:**

- ① Escalímetro/ integrador "BASC"
- ② Sonda cintiladora gama
- ③ Cristal da sonda na posição "y"
- ④ Cabo elétrico
- ⑤ Tubo de PVC  $\varnothing$  101,6mm.
- ⑥ Haste
- ⑦ Garras



**FIGURA 24 - Sistema utilizado na calibração da sonda cintiladora gama .**

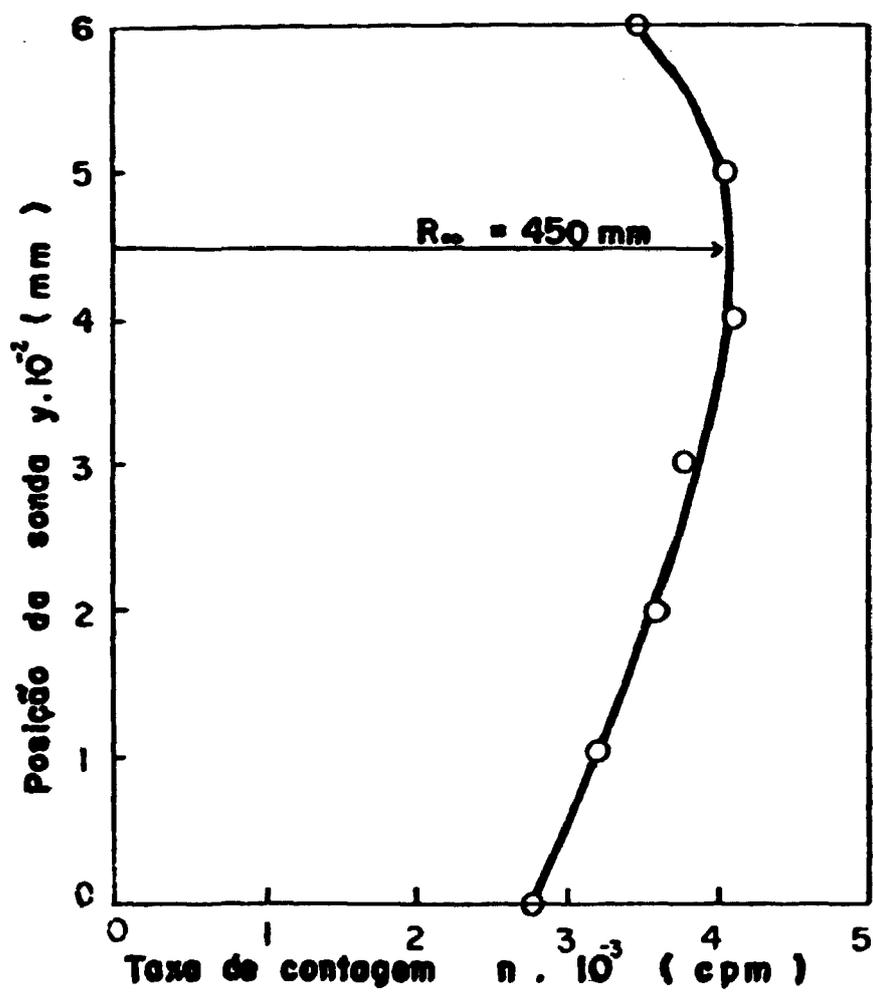


FIGURA 25 - Determinação do raio infinito para o  $^{82}\text{Br}$ .

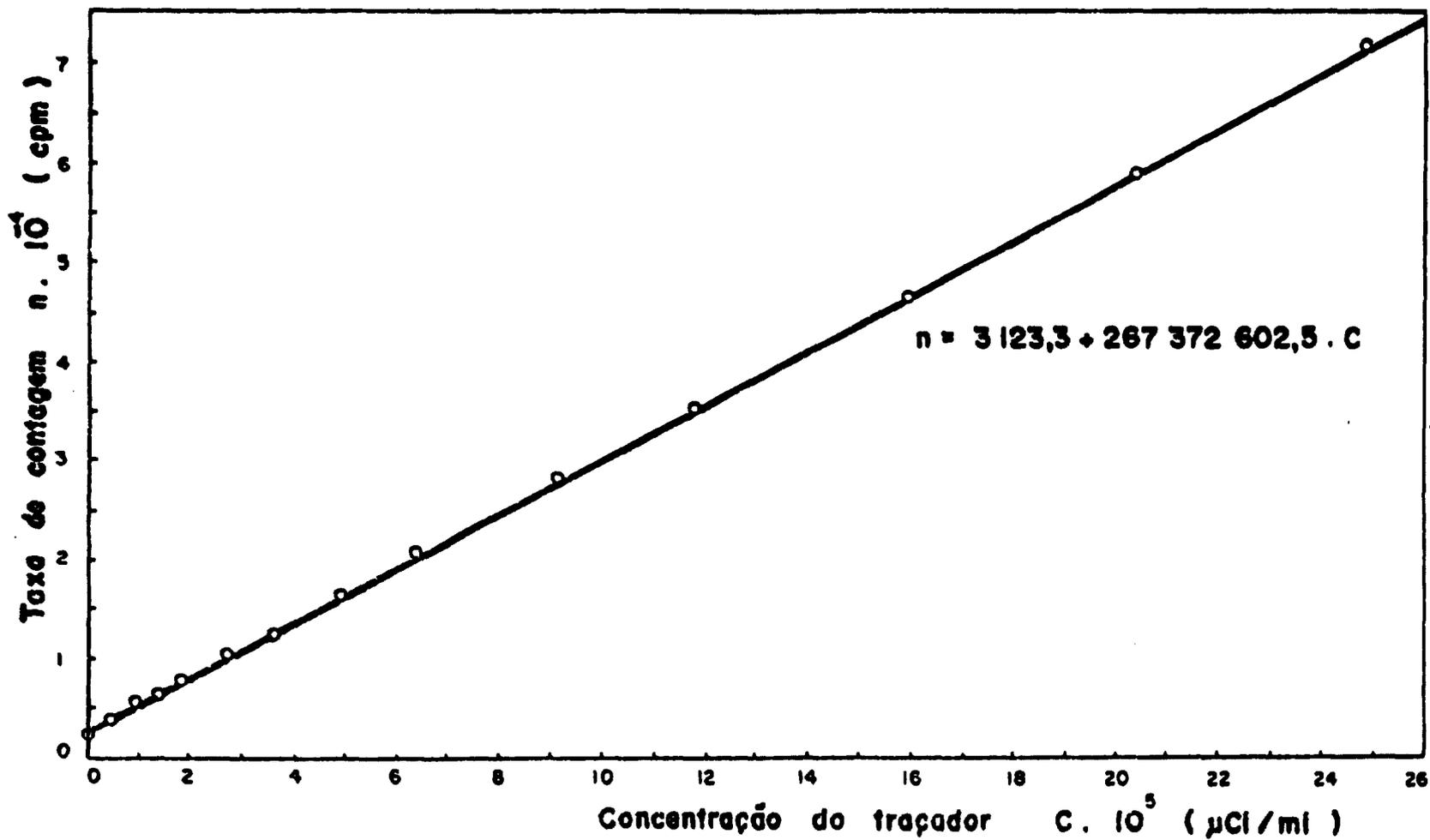


FIGURA 26 - Curva de calibração para a sonda cintiladora gama, e  $^{82}\text{Br}$ .

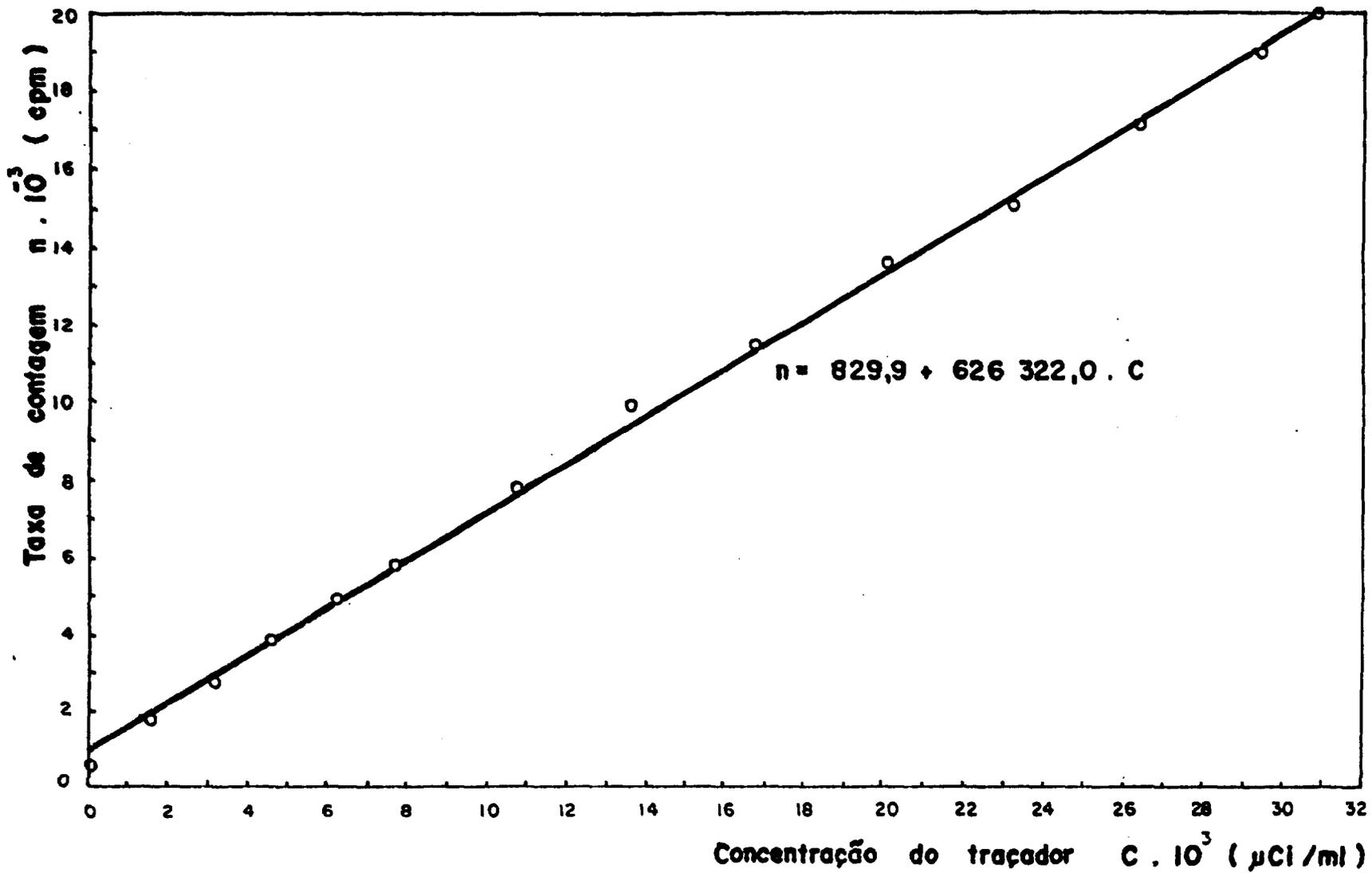


FIGURA 27 - Curva de calibração para o sonda cintiladora gama, colimada, e  $^{51}\text{Cr}$ .

Etapas :

- (A) - Posicionamento do injetor com a água ocupando o volume  $v_f$  ;
- (B) e (C) - A solução está sendo injetada e passa a ocupar o volume  $v_f$  ;
- (D) e (E) - O injetor está sendo retirado e a solução marca a coluna piezométrica.

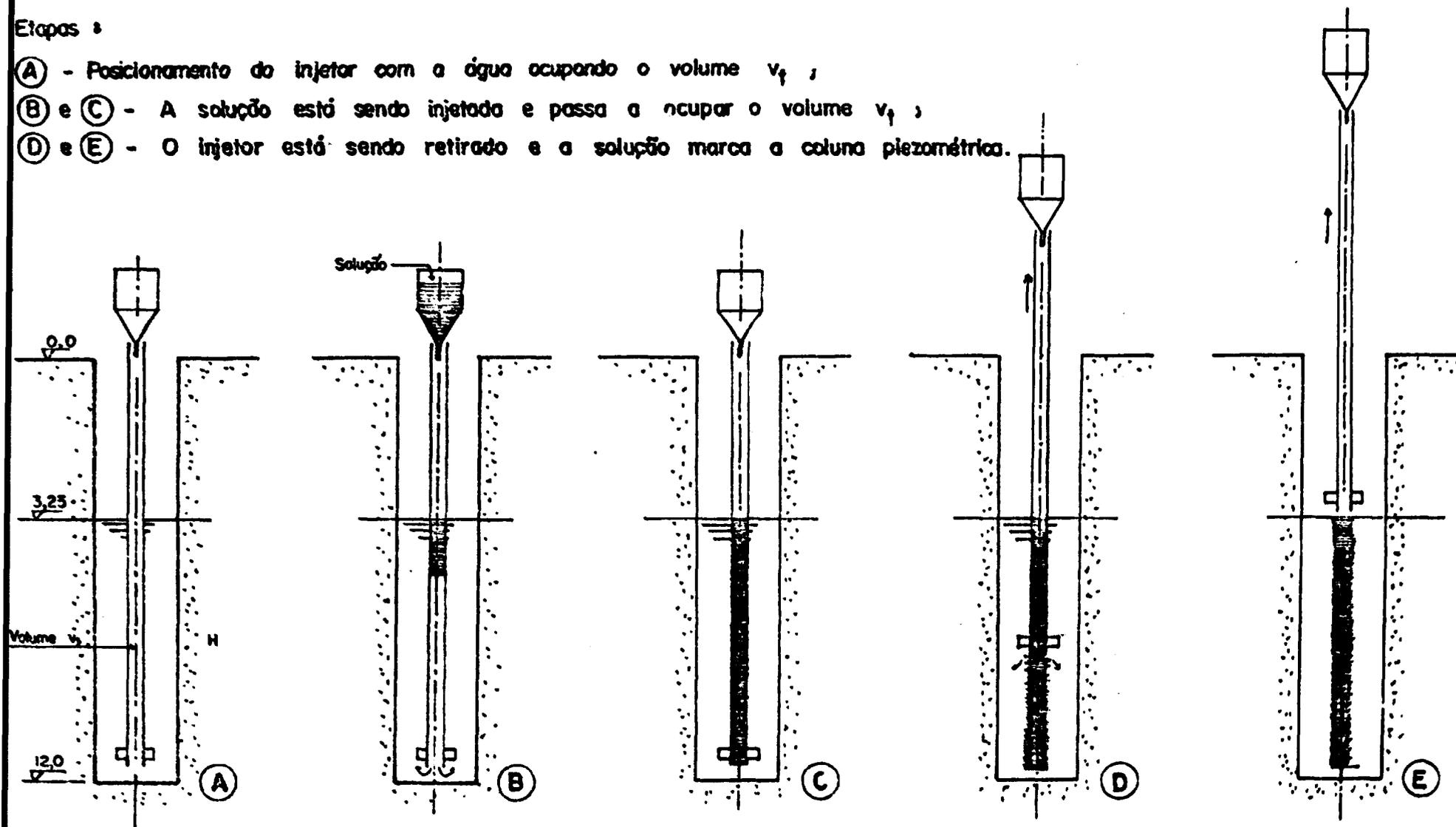
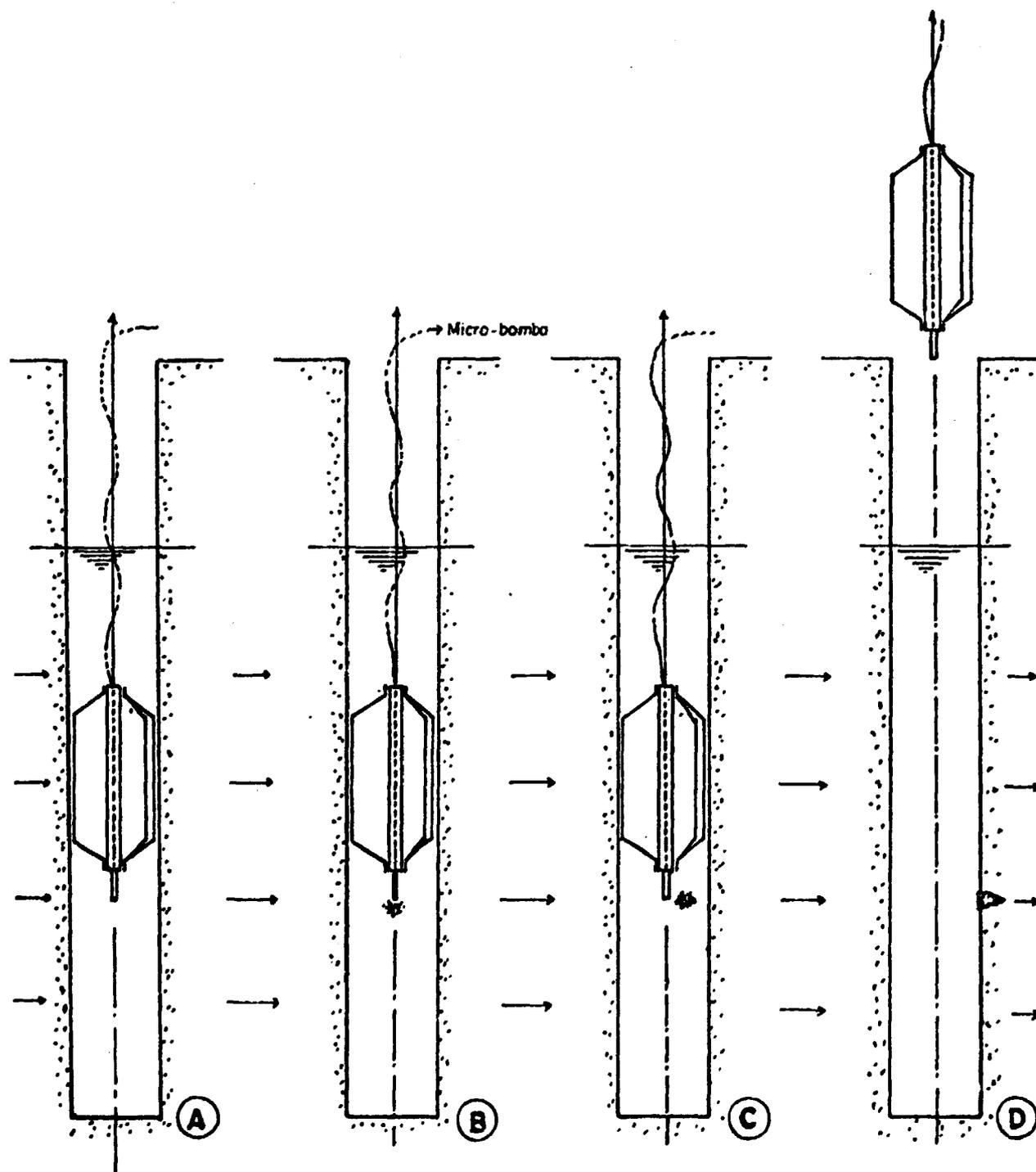


FIGURA 28 - Etapas seguidas na marcação da coluna piezométrica do poço.

**Etapas :**

- (A) - Posicionamento do injetor pontual na profundidade desejada ;
- (B) - Injeção da solução radioativa por meio da micro-bomba peristáltica ;
- (C) - O injetor continua imobilizado, até a nuvem radioativa alcançar as paredes do filtro e vizinhanças ;
- (D) - O injetor é retirado quando a nuvem radioativa alcançar as paredes do filtro e vizinhanças .



**FIGURA 29 - Etapas seguidas no injeção pontual da solução radioativa .**

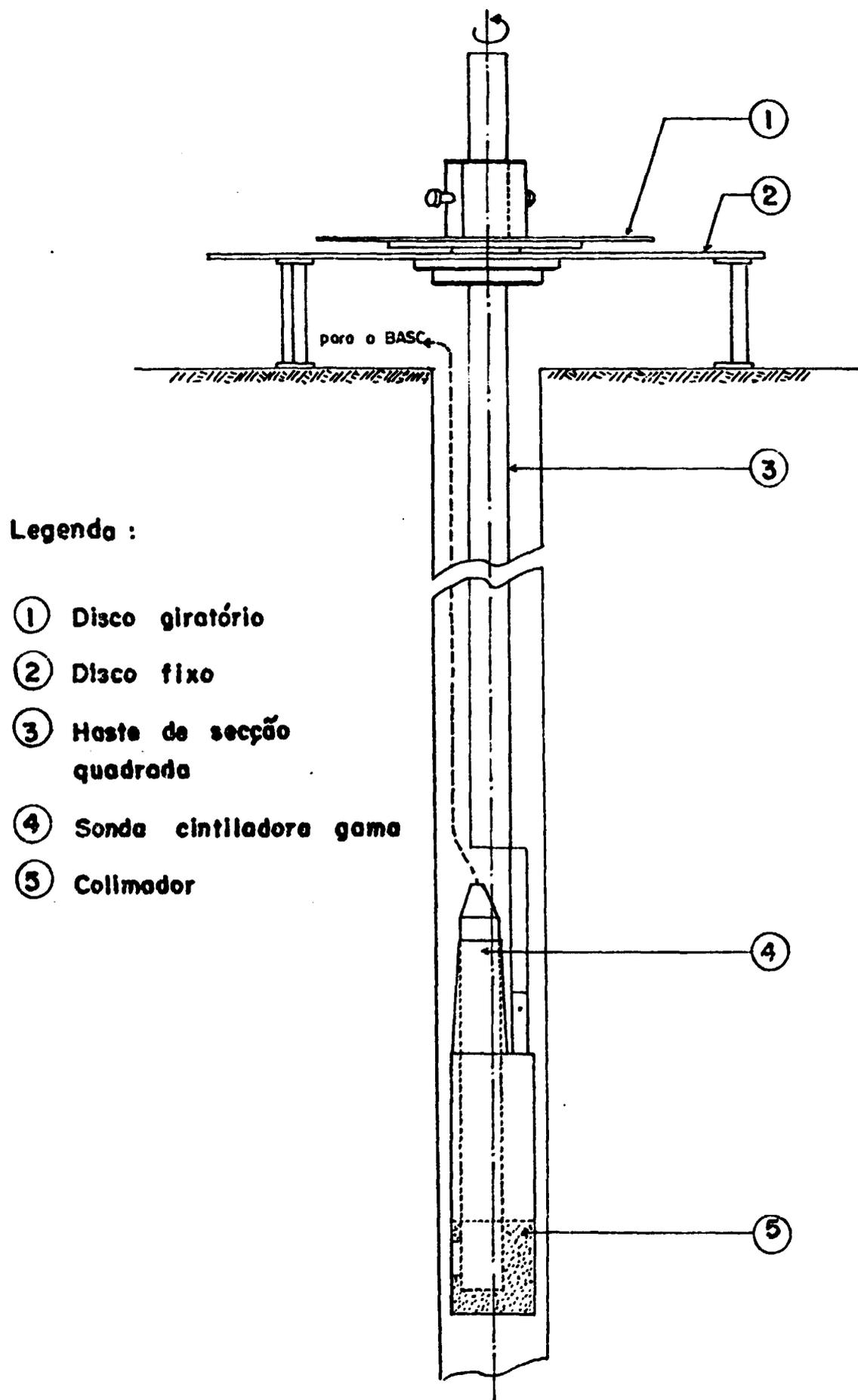


FIGURA 30- Sistema de detecção utilizado nas determinações da direção e do sentido do fluxo .

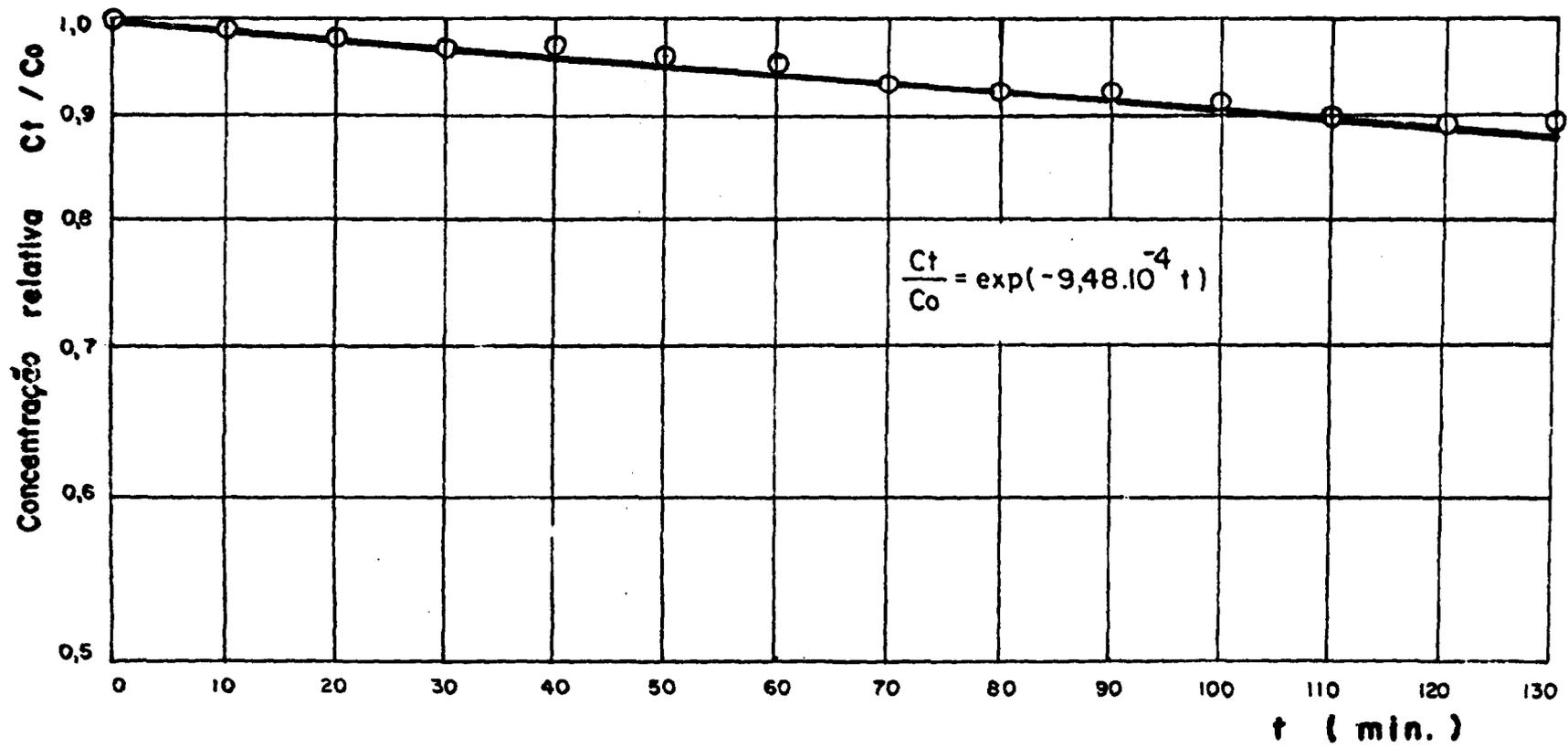
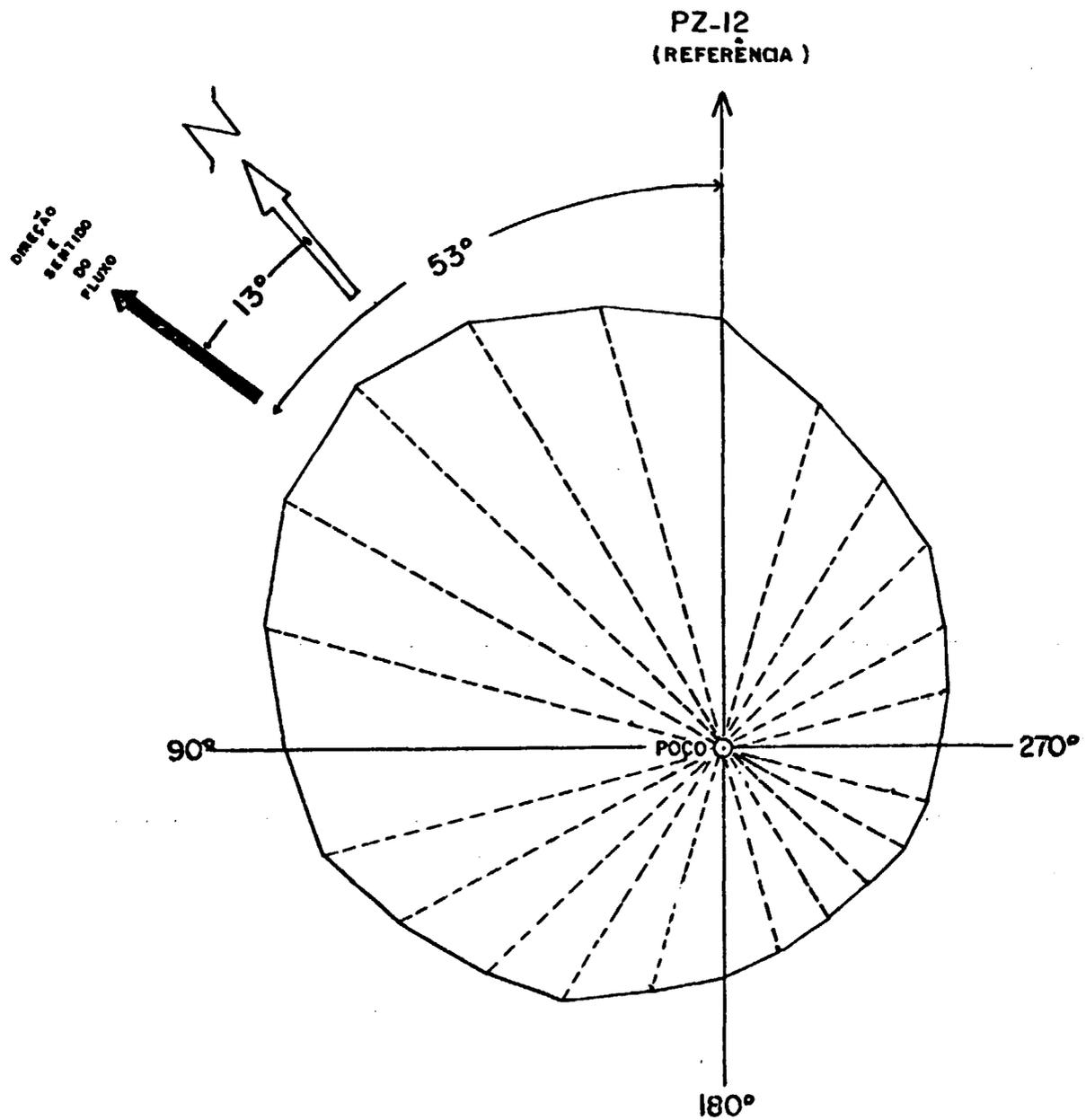
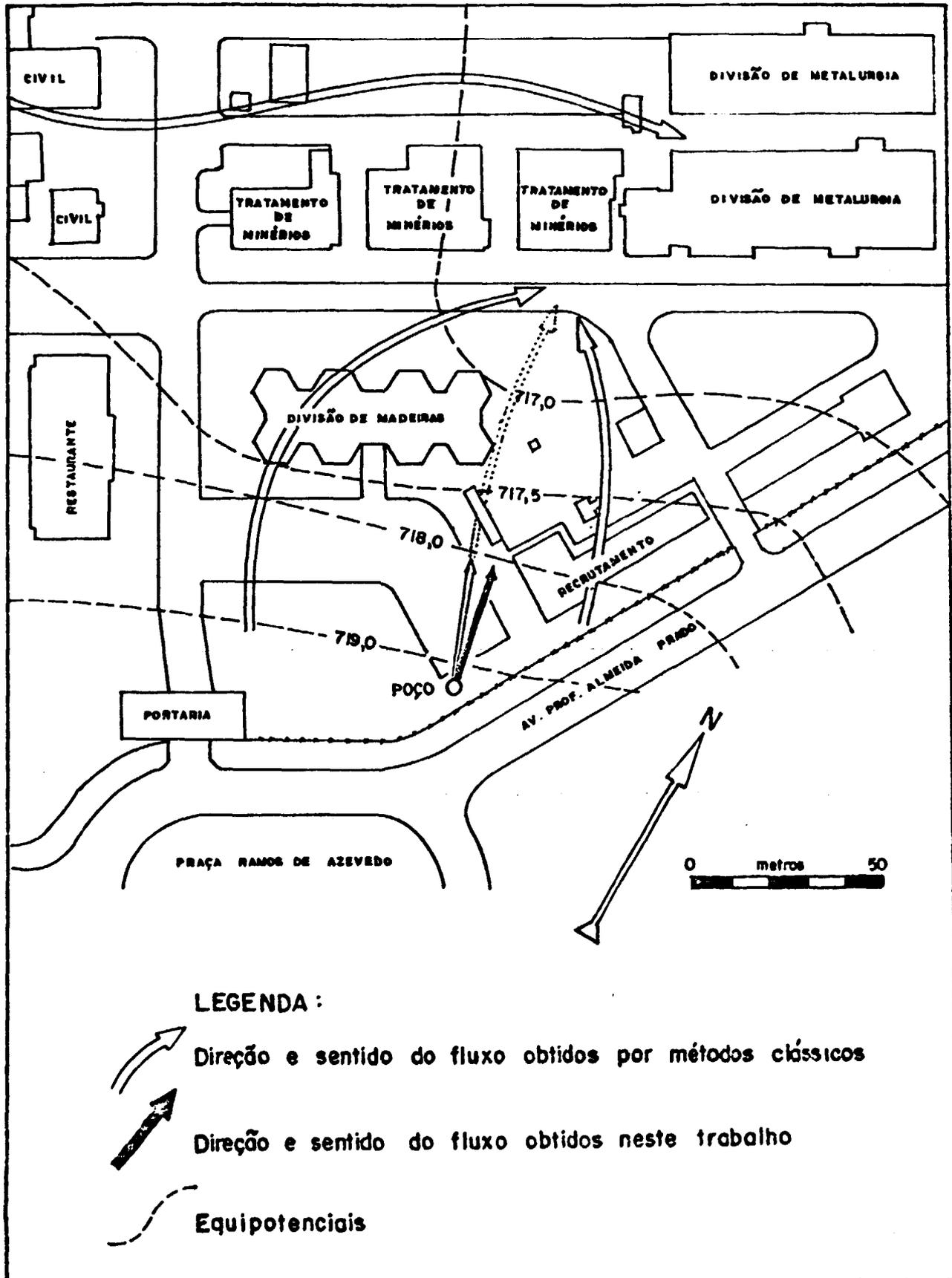


FIGURA 31 - Curva de diluição para a determinação da velocidade aparente .



**FIGURA 32 - Representação vetorial das taxas de contagem em função do ângulo de rotação, direção e sentido do fluxo.**



**FIGURA 33 -** Comparação entre as direções e sentidos do fluxo obtidos por métodos clássicos e neste trabalho .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAONZA, E.; BEDMAR, A.P.; Aplicacion de la tecnica del pozo unico mediante el marcado de toda la columna piezometrica. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotopes in hydrology: proceedings of a symposium on ... held in Vienna, 9-10 march 1970. Vienna, 1970, p. 695-711.
2. BEAR, J. Hydraulics of groundwater. New York, McGraw Hill, 1979.
3. BEDMAR, A.P. Isotopos em hidrologia. Madrid, Alhambra, 1972.
4. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP. Condições de fornecimento e lista de preços de material radioativo. São Paulo, 1983. (Catálogo comercial).
5. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Água subterrânea e poços tubulares. São Paulo, 1978.
6. DROST, W.; MOSER, H.; NEUMAIER, F.; RAUERT, W. Isotopes methods in groundwater hydrology. Brussels, EURISOTOP, 1974.
7. DROST, W.; KLOTZ, D.; KOCH, A.; MOSER, H.; NEUMAIER, F.; RAUERT, W. The borehole dilution method of measuring groundwater filtration velocity. Munchen, Gesellschaft fur Strahlenforschung m.b.H., Mar., 1968. (GSF-Bericht R-16).
8. FRANCISS, F.O. Hidráulica de meios porosos. São Paulo, EDUSP, 1980.

9. GÓMEZ, H.R. Selección del trazador radioactivo en aguas subterráneas y superficiales. In: COMISSION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA, Argentina. Aplicacion de radioisotopos en hidrologia - 6to curso regional. San Juan, 13 de octubre al 20 de noviembre de 1970. San Juan, 1970. p. 1-35.
10. HALEVY, E.; MOSER, H.; ZELLHOFER, O.; ZUBER, A. Borehole dilution techniques: a critical review. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotopes in hidrology: proceedings of a symposium on ... held in Vienna, 14-18 november, 1966. Vienna, 1967. p. 531-64.
11. HAZZAA, I.B. Single well technique using  $^{32}\text{P}$  for determining direction and velocity of groundwater flow. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotopes in hydrology: proceedings of a symposium on ... held in Vienna, 9-13 march, 1970. Vienna, 1970. p. 713-24.
12. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Levantamento do lençol freático do IPT (projeto LELEFRIPT). São Paulo, 1975. (Relatório nº 8454).
13. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Implantação do campo de provas do IPT. São Paulo, 1979. (Relatório nº 12.459).
14. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Ensaio de granulometria (peneiramento). São Paulo, 1983. (Relatório nº 684.841).
15. KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY. Methods of soil analysis. Physical and mine-

- ralogical properties. Madison, Wisconsin, 1965. p. 210-21.
16. KROLIKOWSKI, CZ. The influence of measuring probes on the examination of the filtration rate of underground waters in borahole and piezometers. Atomkernenergie, 10 (10): 57-61, 1965.
17. LALLEMAND, A. & GRISON, G. Contribution a la selection de traceurs radioactifs pour l'hydrogeologie. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotope hydrology: proceedings of a symposium on ... held in Vienna, 9-13 march 1970. Vienna, 1970. p. 823-33.
18. LINSLEY, R.K. & FRANZINI, J.B. Engenharia de recursos hídricos. São Paulo, EDUSP, 1978.
19. MORE, R.J. Os modelos hidrológicos e a geografia. In: CHORLEY, R.J. & HAGGETT, P. Modelos físicos e de informação em geografia. Rio de Janeiro, EDUSP, 1975.
20. MUNERA, H.A. Modelos matematicos simplificados para interpretacion de resultados de ensaios por el metodo de marcacion de toda la columna piezometrica. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotopes in hydrology: proceedings of a symposium on ... held in Vienna, 11-15 march, 1974. Vienna, 1974. p. 255-75.
21. NORDISK ELEKTRISK APPARATFABRIK. Manual for BASC gamma probe. Denmark, 1972. (Manual de operação).
22. NORDISK ELEKTRISK APPARATFABRIK. Instruction manual for BASC portable battery scaler, Denmark, 1972. (Manual de operação).

23. PAYNE, B.R.; CAMERON, J.F.; PECKHAM, A.E.; THATCHER, L.L.  
The role of radioisotope techniques in hydrology. In:  
UNITED NATIONS. Peaceful uses of atomic energy: pro-  
ceedings of the 3th international conference on .....  
held in Geneva. 31 aug-9 sept., 1964. v. 15. Special  
aspects of nuclear energy and isotope applications.  
New York, 1965. p. 226-38.
24. PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A. Hidrologia  
de superfície. São Paulo, Edgard Blucher, 1973.
25. TODD, D.K. Ground water hydrology. New York, John Wi-  
ley, 1959.
26. WILSON, E.M. Engineering hydrology. London, Mc Millan,  
1971.