

**CONDIÇÕES DE PERCOLAÇÃO D'ÁGUA NA OMBREIRA ESQUERDA  
DA BARRAGEM DE ILHA SOLTEIRA, RIO PARANÁ,  
UTILIZANDO TÉCNICAS RADIOISOTÓPICAS**

*WLADIMYR SANCHEZ, GUIDO GUIDICINI e RICARDO F. DA SILVA*

**PUBLICAÇÃO IEA N.º 389**  
Abril — 1975

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**  
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)  
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"  
SAO PAULO — BRASIL

**CONDIÇÕES DE PERCOLAÇÃO D'ÁGUA NA OMBREIRA ESQUERDA  
DA BARRAGEM DE ILHA SOLTEIRA, RIO PARANÁ,  
UTILIZANDO TÉCNICAS RADIOISOTÓPICAS**

**Wladimir Sanchez, Guido Guidicini\* e Ricardo F. da Silva\*\***

**Coordenadoria de Aplicações de Radioisótopos  
e Radiações na Engenharia e na Indústria  
Instituto de Energia Atômica  
São Paulo - Brasil**

**Publicação IEA Nº 389  
Abril - 1975**

---

\* Geólogo, Divisão de Minas e Geologia Aplicada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo.  
\*\* Geólogo, Assessor da Seção de Geologia Aplicada da Divisão de Minas e Geologia Aplicada do IPT, de São Paulo.

**Instituto de Energia Atômica**

**Conselho Superior**

Eng<sup>o</sup> Roberto N. Jafel - Presidente  
Prof. Dr. Emilio Mattar - Vice-Presidente  
Prof. Dr. Jose Augusto Martins  
Prof. Dr. Milton Campos  
Eng<sup>o</sup> Helcio Modesto da Costa

**Superintendente**

Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

# CONDIÇÕES DE PERCOLAÇÃO D'ÁGUA NA OMBREIRA ESQUERDA DA BARRAGEM DE ILHA SOLTEIRA, RIO PARANÁ, UTILIZANDO TÉCNICAS RADIOISOTÓPICAS

Wladimir Sanchez, Guido Guidicini e Ricardo F. da Silva

## RESUMO

Neste trabalho descrevem-se as técnicas radioisotópicas usadas no estudo da percolação de água subterrânea, no exato local da implantação da eclusa da Barragem de Ilha Solteira, em sua ombreira esquerda.

Durante os trabalhos feitos com sondas rotativas, necessários a complementação dos estudos geológicos superficiais, verificou-se, na série de ensaios efetuados, perda total d'água na cota de 275,00 m.

A perda d'água ocorreu nas medições do contato entre os derrames de basalto. Nos ensaios dessa perda d'água verificou-se a absorção total da vazão da bomba, da ordem de 80 l/min.

Para determinar a velocidade de percolação da água nas prováveis fendas do basalto efetuou-se um ensaio com traçador radioativo ( $^{131}\text{I}$ ). Tentativa anterior, feita com corantes, não forneceu resultados satisfatórios.

Para o estudo do comportamento do traçador radioativo, utilizaram-se duas técnicas: medida de sua diluição na água original do furo e medida do tempo de trânsito.

Os resultados dos ensaios tornaram evidente a existência de uma fenda ou um conjunto de fendas que se estende, do furo de injeção do radioisotopo, na direção dos poços artesianos situados na margem esquerda do rio Paraná, a jusante da Barragem de Ilha Solteira.

As fendas aqui referidas localizam-se na cota 272,00 ao longo do contato entre os derrames de basalto.

## 1 - Introdução

Quando se efetuaram as campanhas de sondagens rotativas para a complementação dos estudos geológicos, no local da implantação da eclusa da barragem de Ilha Solteira, ombreira esquerda, verificou-se uma modificação brusca no comportamento do lençol d'água subterrânea.

Ao atingir-se as imediações do contacto entre os derrames que lá ocorrem, em torno da cota 275,00, verificou-se perda total da água de circulação dos furos e a absorção total da vazão da bomba ( $V = 80 \text{ l/minuto}$ ), no decorrer dos ensaios de perda d'água, efetuados na região do contacto. Com o prosseguimento da perfuração o nível d'água estabilizou-se em torno da cota 275,00, cinco metros abaixo do nível local do rio Paraná.

Esses fatos mostraram que o contacto possui elevada permeabilidade e está sujeito a uma drenagem situada abaixo do nível do rio Paraná. O levantamento das áreas responsáveis por essa drenagem revelou três (3) possibilidades, conjugadas ou não que podem ser visualizadas na figura 1, a saber:

- a) a parede esquerda das escavações do vertedouro que intercepta o contacto entre os derrames, na cota 275,00 e que verte água continuamente. Essa escavação foi aberta

em meados de 1967, atingindo a cota 264,00. Naquela época observou-se grande fluxo d'água proveniente do contacto mas não se efetuou medida de vazão na oportunidade. Com o decorrer do tempo esse fluxo d'água foi sofrendo reduções acentuadas em relação à época da execução das escavações;

- b) o conjunto de poços artesianos situados a montante da enseadeira. Esses poços aprofundaram-se até a cota média 210,00 e entraram em operação no período compreendido entre novembro de 1969 e fevereiro de 1970. Destinaram-se ao abastecimento de água para o canteiro da obra;
- c) o conjunto de poços artesianos na ombreira esquerda, a jusante da área da Central de Concreto e depósito de agregados. Atingem em profundidade a cota média 225,00 e na sua maioria entraram em funcionamento no período compreendido entre outubro de 1968 a janeiro de 1969. Destinaram-se a alimentação da Central de Concreto e da Cidade de Ilha Solteira.

A geologia local caracteriza-se pela presença de derrames basálticos em posição sub horizontal. Em particular, na área da eclusa, em cota 275,00, aproximadamente, o contacto entre os derrames que lá ocorrem mergulha suavemente para jusante e para o leito do rio, em torno de 0,5% e 0,2%, aproximadamente (figura 2).

Para determinar se a velocidade de percolação da água nas prováveis fendas do basalto efetuou-se em novembro de 1969 um ensaio tentativo, por meio da injeção de corantes, em um dos furos abertos na região da eclusa, o SR 1042. Essa tentativa não conduziu a resultados positivos e lavou a programação de um segundo ensaio com radioisótopos, contando com a participação do pessoal técnico dos Institutos de Pesquisa Tecnológica (IPT) e de Energia Atômica (IEA).

## II Técnica dos Radioisótopos

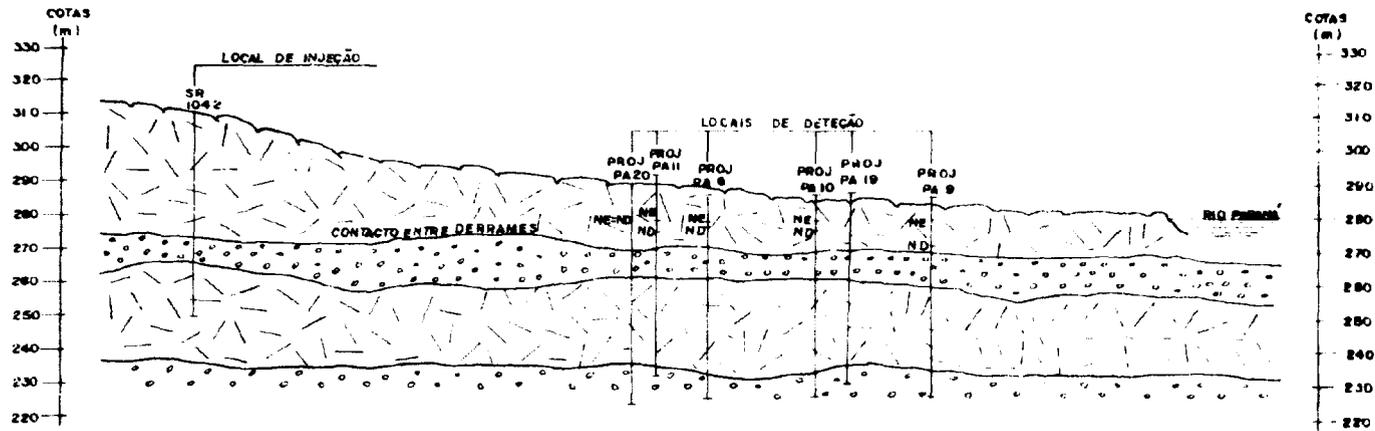
Mostra-se, com o auxílio da figura 3, o princípio da técnica radioisotópica utilizada na determinação do caminho de percolação da água. Em determinado instante lançou-se certa quantidade de traçador radioativo no furo SR 1042, situada a distâncias conhecidas dos poços artesianos e da parede esquerda das escavações do vertedouro. Havendo interconexão da água do furo SR 1042 com o lençol subterrâneo que abastece os poços artesianos a montante da enseadeira e com os poços que alimentam a Central de Concreto, o traçador radioativo aparecerá na água bombeada desses poços. Admitindo-se linhas de fluxos radiais, o traçador radioativo chegará ao poço artesiano depois de um bombeamento prévio de toda a água contida no cilindro imaginário de raio  $r$  (distância entre o furo SR 1042 e o poço de bombeamento) e altura  $b$  (espessura da camada de basalto vesículo amigdaloidal).

O volume  $V$  da água bombeada e que provém da camada de basalto vesículo amigdaloidal, equivale ao produto do volume do cilindro pela porosidade efetiva  $P_e$ , ou seja  $V = \pi r^2 b P_e$ . Considerando-se que o traçador radioativo chega ao poço de bombeamento depois de transcorrido um intervalo de tempo  $\Delta t$ , contado a partir do seu lançamento, tem-se:

$$Q \Delta t = \pi r^2 b P_e \quad (1)$$

$$P_e = \frac{Q \Delta t}{\pi r^2 b} \quad (2)$$





**LEGENDA**



BASALTO COMPACTO



BASALTO VESÍCULO-AMIBALDOIDAL

0 50 100m ESC. GRÁFICA HORIZONTAL

FIG 2

SECÇÃO GEOLOGICA ESQUEMATICA AO LONGO DO EIXO DE PROPAGAÇÃO DO RADIOISÓTOPO

Os valores de  $Q$ ,  $r$  e  $b$  são conhecidos. Determina-se o intervalo de tempo  $\Delta t$  medindo-se a atividade presente na água bombeada, por meio de registro contínuo ou por tomadas periódicas de amostras. Por meio da figura 3, observam-se também as curvas típicas que representam a saída do traçador radioativo dos poços de bombeamento. Mede-se o intervalo de tempo  $\Delta t$  considerando-se o tempo transcorrido desde a injeção até o que corresponde ao centro de gravidade da curva de concentração radioativa x tempo. Quando a curva é aproximadamente simétrica (forma de sino) pode-se considerar o ponto de máxima concentração da radioatividade como sendo o tempo representativo da chegada do traçador no poço de bombeamento. Para facilitar a determinação da posição de atividade máxima recomenda-se representar em papel semi-logaritmo a concentração de traçador em função de  $\sqrt{\frac{Q \cdot \Delta t}{\pi b}}$ .

A ligação dos poços de medida, onde se verificou a presença de radioatividade, permite estabelecer o caminho de percolação da água a partir do furo SR - 1042.

Conhecendo-se a distância  $r$  entre o furo SR - 1042 e os poços de bombeamento e o intervalo de tempo  $\Delta t$  transcorrido até a detecção do ponto que corresponde ao centro de gravidade da distribuição de radioatividade em função do tempo, determina-se a velocidade média de caminhamento da água, isto é,

$$V = \frac{r}{\Delta t} \quad (3)$$

Determina-se a permeabilidade  $K$  aplicando-se a lei de Darcy,

$$K = V \cdot h \cdot P_e \quad (4)$$

onde  $h$  é o gradiente hidráulico entre o furo SR - 1042 e os poços de bombeamento

Essa técnica pode ser utilizada em aquíferos com fluxos horizontais ou quase horizontais. As principais vantagens desse processo em relação às técnicas convencionais, são:

- 1 - proporciona dados para medir simultaneamente a permeabilidade e a porosidade efetiva;
- 2 - proporciona medidas mais diretas;
- 3 - os parâmetros que intervêm no cálculo da permeabilidade podem ser determinados com grande precisão e com menos interferência

## II.1 - Isótopo Radioativo Injetado

Escolheu-se o isótopo  $^{131}\text{I}$  para ser injetado no furo SR - 1042 pelos motivos seguintes:

- a) e um isótopo pouco absorvido pelos materiais do meio onde escoar;
- b) seu grau de solubilidade na água é grande;
- c) a radiação gama emitida é de energia intermediária e facilmente detectada;
- d) sua meia vida de 8 dias permite prolongar o ensaio por um período superior a 30 dias;
- e) sua concentração máxima permitida na água é bem conhecida ( $60 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ );
- f) sua produção é dependente de processamento químico relativamente simples.

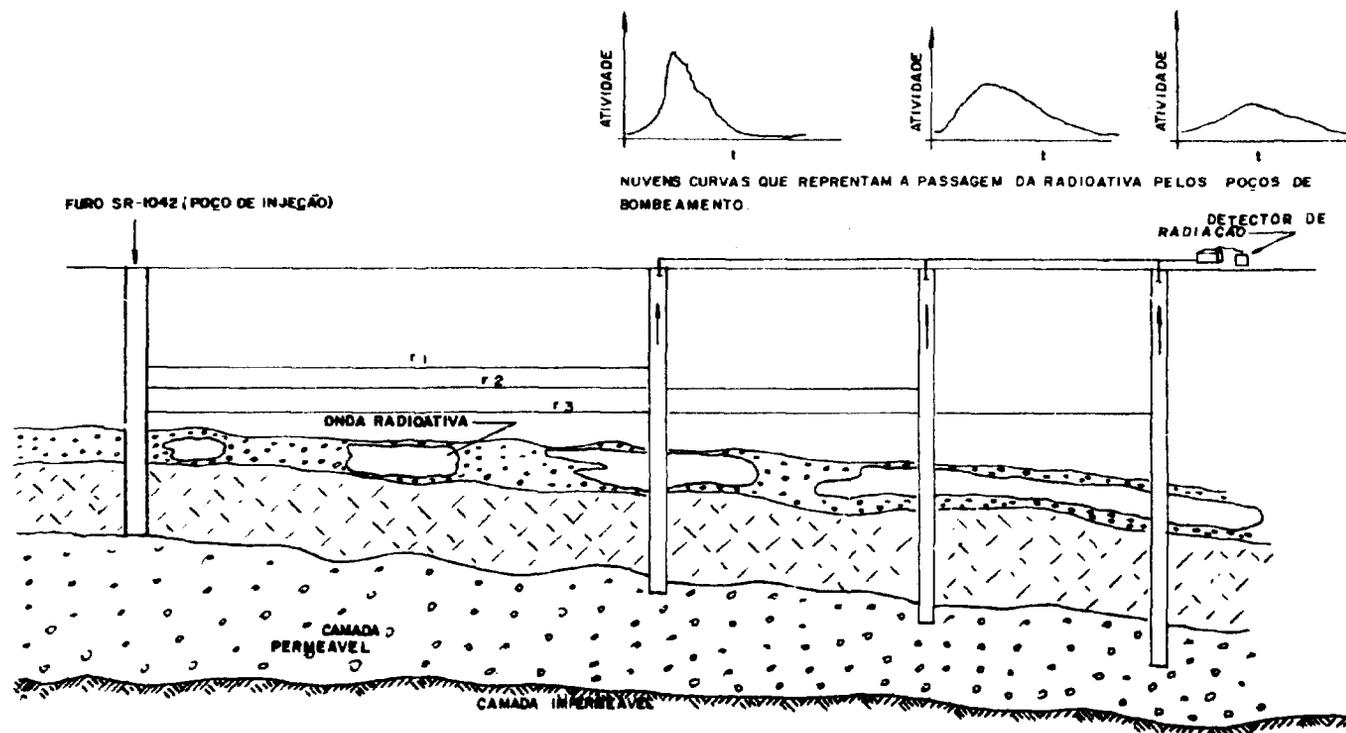


FIG. 3

PRINCÍPIO DA TÉCNICA RADIOISOTÓPICA PARA MEDIR O CAMINHO DE PERCOLAÇÃO DA ÁGUA

## II.2 - Injeção e Detecção do $^{131}\text{I}$

Mostra-se, esquematicamente, na figura 4 e nas fotografias 5, 6 e 7 a técnica utilizada na injeção do  $^{131}\text{I}$ . Esse radioisótopo foi dissolvido em uma solução de iodeto de sódio, não radioativo e introduzido no interior de um tubo plástico colocado dentro do poço. Na extremidade superior do tubo plástico existia uma ampola de vidro pirex com capacidade de 0,3 litro que armazenava a solução radioativa e facilitava sua introdução pelo interior do tubo plástico. A extremidade inferior do tubo estava na cota 260,00 aproximadamente. Retirando-se rapidamente o tubo do interior do piezômetro ele libera o material radioativo contido no seu interior.

Para facilitar um escoamento rápido da solução radioativa injetou-se no furo, em seguida, 15.000 litros de água provenientes de um carro pipa, com vazão de 100 l/minuto (fotografia 8).

Periodicamente, introduzia-se uma sonda detectora no interior do furo SR - 1042 para medir a variação da concentração de radioatividade contida na água.

A sonda detectora era formada por um cilindro estanque, de aço inox, com diâmetro externo de 35 mm e altura de 350 mm, contendo no seu interior um cristal de NaI(Tl) de 1"  $\phi$  x 1" H, fotomultiplicadora EMI, 11 estágios e um amplificador de corrente. A sonda estava ligada ao escalímetro por meio de um cabo co-axial graduado, que permitia medir a concentração de radioatividade em cotas bem determinadas.

## II.3 - Técnicas Utilizadas

Utilizaram-se duas técnicas neste trabalho:

1. **Tempo de trânsito:** consiste em determinar o instante de chegada da nuvem radioativa nos poços de bombeamento, conhecendo-se a distância entre eles e o furo SR - 1042;
2. **Técnica da diluição:** obtém-se a velocidade por meio da diminuição da concentração em função do tempo, como consequência do escoamento do fluxo d'água.

Levando-se em conta os estudos anteriores, escolheram-se os seguintes locais para medir o tempo de trânsito:

- a) poços artesianos a jusante do pátio da Central de Concreto;
- b) poços artesianos próximos à ensecadeira de montante;
- c) infiltração existente na parede esquerda da escavação do vertedouro de superfície.

A água dos poços artesianos de montante, PA 6, PA 26, PA 27, é canalizada para um único reservatório, a caixa d'água número dois (2). A água dos poços artesianos de jusante, PA 8, PA 9, PA 10, PA 11, PA-12, PA-14, PA-15, PA-19, PA 20, PA-21, PA 29 e PA-30 é canalizada para a caixa d'água número três (3), da estação de recalque

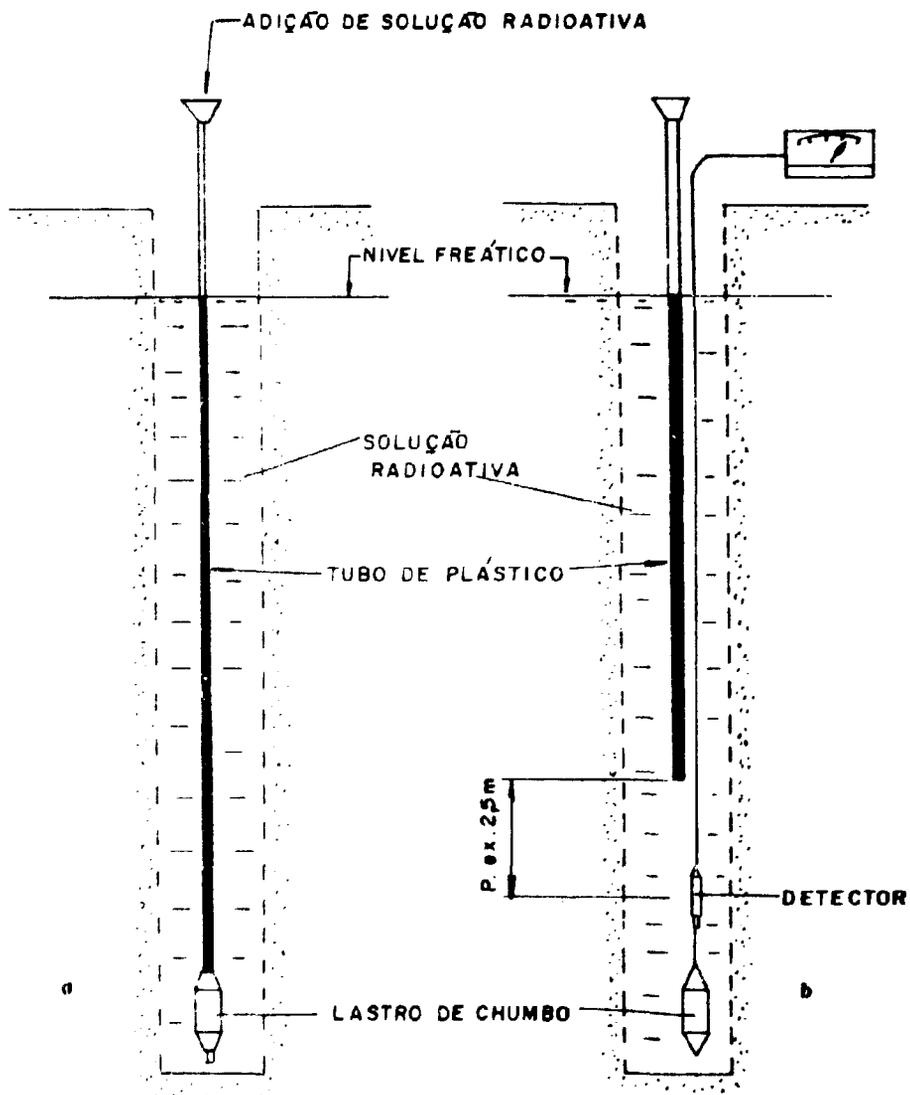


FIG. 4

REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TÉCNICA DE MARCAÇÃO  
DE TODA A COLUNA PIEZOMÉTRICA



**Foto 5**

**Retirada do isótopo radioativo da blindagem de chumbo**



**Foto 6**

**Injetor contendo no interior a ampola de vidro com solução de iodeto de sódio não radioativo**



Foto 7

Sistema para introduzir iodo radioativo no interior da ampola de vidro

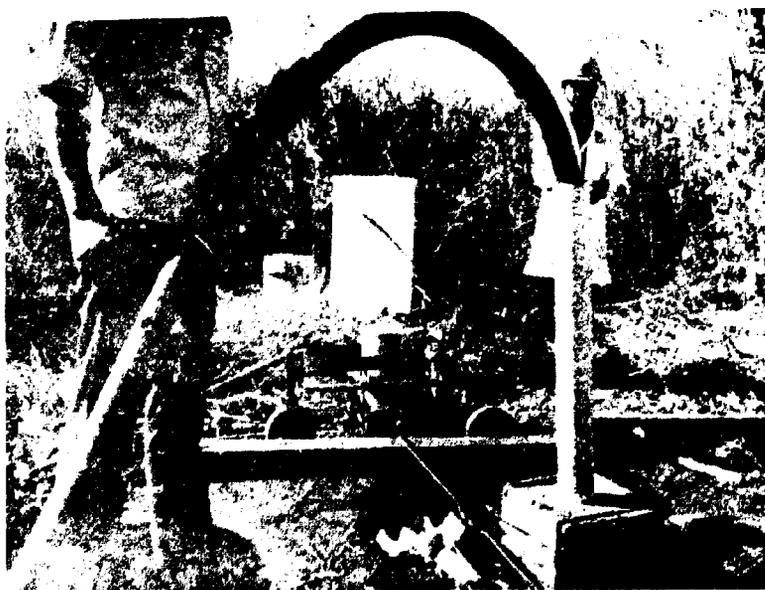


Foto 8

Injeção de água no furo SR-1042 com vazão de 100 l/min

Depois da injeção da solução radioativa fixou-se uma sonda detectora na entrada da caixa d'água número dois para que se pudesse observar a presença ou ausência de radioatividade nas águas provenientes dos poços artesianos de montante. Procedeu-se de maneira análoga na estação de recalque. Um terceiro conjunto detector foi mantido imóvel para que se pudesse analisar as diferentes zonas de infiltração d'água na parede esquerda das escavações dos vertedouros.

As sondas fixas eram mantidas em funcionamento 24 horas ininterruptamente, ao passo que a área da escavação era inspecionada periodicamente. Em intervalos de duas horas registravam-se as contagens fornecidas pelas sondas fixas. A água proveniente das infiltrações nas paredes do vertedouro era armazenada em uma pequena área da escavação e analisada posteriormente em intervalos de seis horas.

Decorridas cerca de 140 horas após a injeção, a sonda instalada na caixa d'água da estação de recalque número três registrou radioatividade na água que estava sendo bombeada. Percorreu-se com a unidade detectora móvel os vários poços artesianos que abasteciam aquela caixa d'água para identificar o local de onde provinha a radioatividade. Manteve-se fixo em sua posição original o detector da estação de recalque para avaliação da quantidade total de  $^{131}I$  que seria armazenada na caixa d'água. Caso a atividade fosse superior ao máximo permissível poder-se-ia interromper o bombeamento de alguns poços e conseqüentemente diminuir a concentração de  $^{131}I$  na caixa d'água.

Dois vezes por dia, media-se a variação da concentração de radioatividade no interior do furo SR 1042, por meio de perfilagens que permitiram localizar uma região muito permeável, por onde havia uma saída horizontal da água e avaliar a quantidade de radioisótopo retida no interior do furo.

### III Dados Coletados

Assinalou-se a chegada da onda radioativa ( $t_{ch}$ ) em vários poços artesianos de jusante, em diferentes instantes. Deduziram-se os seguintes tempos de trânsito ( $t_t$ ):

PA 20	$t_{ch} = 137$ horas	$t_t = 168$ horas
PA 8	$t_{ch} = 155$ horas	$t_t = 179$ horas
PA 11	$t_{ch} = 160$ horas	$t_t = 196$ horas
PA 10	$t_{ch} = 210$ horas	$t_t = 244$ horas
PA 19	$t_{ch} = 250$ horas	$t_t = 296$ horas
PA 9	$t_{ch} = 290$ horas	$t_t = 338$ horas

Considerou-se como tempo de trânsito o intervalo de tempo transcorrido desde a injeção até o instante que corresponde ao centro de gravidade da curva de distribuição da concentração radioativa versus tempo de passagem.

Os dados relativos às características dos poços estão dispostos na tabela I e são os seguintes:

- 1 distância em metros, do SR 1042 aos PA de jusante;
- 2 cota da boca dos PA;

- 3 Nível dinâmico (N.D) dos PA;
- 4 cota do N.D dos PA;
- 5 diferença entre a cota do NA do SR 1042 (273,39) e a cota dos PA de jusante;
- 6 gradiente hidráulico;
- 7 velocidade de percolação.

Mostra-se, na figura 9, a variação da concentração de  $^{131}\text{I}$  na água bombeada pelos diferentes poços artesianos que abastecem a caixa d'água da estação de recalque número três (3).

A variação da concentração de radioatividade no interior do furo SR 1042 (figura 10) mostra que no trecho 1 a água estava estagnada. No trecho 2 havia pequena penetração de água provocando um fluxo descendente, no fim desse trecho, no ponto correspondente à cota 272,00 notava-se uma saída horizontal de água e entre os trechos números 3-4 notava-se uma nova contribuição de água que formava um fluxo ascendente.

#### IV - Conclusão e Observações

- 1 existe uma fenda ou um conjunto de fendas que se estende do SR 1042 da eclusa para os poços artesianos situados na margem esquerda, a jusante da barragem de Ilha Solteira. Essa fenda desenvolve-se ao longo do contacto entre os derrames que lá ocorrem, em torno da cota 272,00 (figura 2);
- 2 o fluxo d'água da fenda escoou no sentido do SR 1042 para os PA de jusante (figura 11);
- 3 a velocidade do escoamento é da ordem de  $1,2 \times 10^{-2}$  cm/s, sendo o gradiente hidráulico médio de  $10^{-2}$  m/m;
- 4 a onda radioativa proveniente do SR 1042 apresenta, na altura dos PA de jusante, a 650 metros de distância, largura mínima de 250 metros (distância entre PA 8 e o PA 11) e máxima de 500 metros. Entretanto, essas medidas não definem a largura da fenda que se pode estender lateralmente fora desses limites;
- 5 não se observou a presença de radioatividade nas águas dos PA situados ao longo da enscadeira de montante e nem nas infiltrações ao longo da parede esquerda da escavação do vertedouro de superfície;
- 6 a concentração de radioatividade contida na caixa d'água esteve sempre bem abaixo da concentração máxima permissível estabelecida pelas normas da Agência Internacional de Energia Atômica;
- 7 observou-se, durante os ensaios, uma diminuição progressiva da quantidade de material radioativo detectada, à medida em que a onda ativa atingia os poços artesianos mais afastados do SR 1042, provocada por dois efeitos:
  - a) captação das maiores frações de material radioativo pelos poços mais próximos ao SR 1042;
  - b) decaimento radioativo do  $^{131}\text{I}$  durante os 17 dias de ensaio.
- 8 a diminuição da vazão de infiltração d'água na parede esquerda da escavação dos vertedouros de superfície foi, a nosso ver, causada pela abertura dos poços artesianos na região da Central de Concreto. A presença desses poços artesianos e seu contínuo bombeamento teria causado modificações acentuadas na rede d'água subterrânea, que no local estudado teria passado de uma direção do fluxo longitudinal ao eixo da barragem (sentido eclusa rio Parana) para um sentido montante jusante. Qualquer modificação no regime do bombeamento, por paralisação momentânea ou permanente, e abertura de novos poços na área poderá provocar alteração no estado atual das linhas de fluxo.

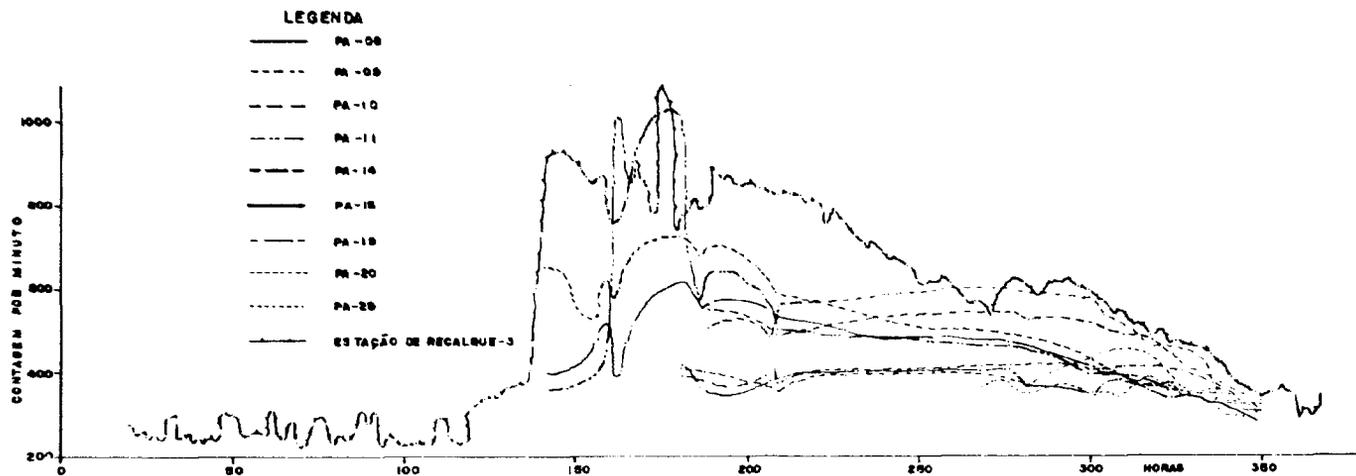


FIG. 9

VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE  $I^{131}$  NA ÁGUA BOMBADA PARA A CAIXA D'ÁGUA DA ESTAÇÃO DE RECALQUE Nº 3

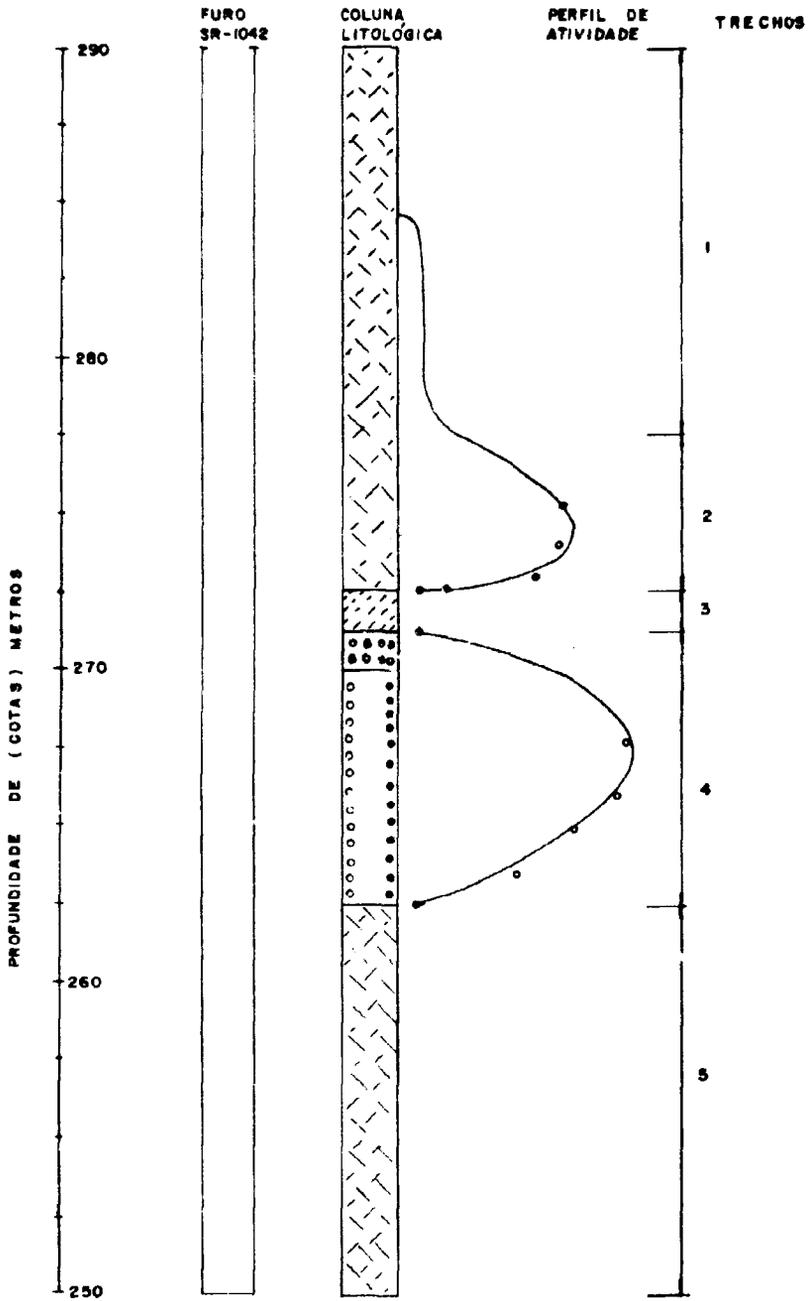


FIG. 10

REPRESENTAÇÃO DOS FLUXOS D'ÁGUA ENCONTRADOS NO FURO SR-1042



TABELA I

## DADOS RELATIVOS AOS POÇOS ARTESIANOS DE JUSANTE

PA	Distância do SR 1042	Cota da Boca do PA m	Nível dinâmico do Poço Artesiano N D m	Cota do N D do P A	Diferença de cota do N D SR 1042 P A m	Gradiente Hidráulico m/m	Velocidade de Percolação cm/s
8	700	287,84	21,46	266,38	7,01	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,30 \times 10^{-1}$
9	1030	287,13	19,94	267,19	6,20	$0,59 \times 10^{-2}$	$1,13 \times 10^{-1}$
10	855	287,90	25,44	262,46	10,93	$1,27 \times 10^{-2}$	$1,25 \times 10^{-1}$
11	625	293,70	28,00	265,70	7,69	$1,23 \times 10^{-2}$	$1,21 \times 10^{-1}$
12	675	295,05	21,58	272,47	0,92	$0,13 \times 10^{-2}$	não foi detectado <sup>1,31</sup>
14	1065	SELADO	SELADO	-	-	-	-
15	860	285,14	12,51	272,63	0,76	$0,09 \times 10^{-2}$	não foi detectado <sup>1,31</sup>
19	900	274,48	25,90	248,58	24,81	$2,77 \times 10^{-2}$	-
20	585	293,00	25,00	268,00	5,39	$0,92 \times 10^{-2}$	$1,14 \times 10^{-1}$
21	1150	299,00	SELADO	-	-	-	-
29	1250	284,56	20,86	263,70	9,69	$7,78 \times 10^{-2}$	-

DADOS RELATIVOS AO FURO DE INJEÇÃO SR 1042: Cota da boca do furo = 311,19 M  
 Nível d'água (N A.) = 37,80 m  
 Cota do N A. do furo = 273,39 m

\* O N.D. não pôde ser medido com precisão em virtude de bloqueio dos poços pela canalização das bombas

## ABSTRACT

This paper deals with radioisotopic techniques used in the study of water percolation at the exact place of the construction of the canal lock of Ilha Solteira Dam, in its left side.

At the time of the drilling operations, using rotative drills, which were necessary to complement the surface geological studies it was discovered, by water leakage tests, a total loss at 275,00 level. This water loss occurred at the vicinities of basalt lava flows. The water leakage tests showed that the total absorption of pumping flow was about 80 liters per minute.

To determine the velocity of water percolation in the probable cracks or fractures of the basalt a test of radioactive tracer ( $^{131}\text{I}$ ) was used. Previous tentative, using dyes, proved to be no satisfactory. For the study of the radioactive tracer behaviour two techniques were tried:

- a) measurement of its dilution in the original water of the well.
- b) measurement of residence time.

Results from the tests showed the existence of a crack or a set of cracks oriented from the radioisotopic injection well to the artesian wells located at the left shore of Parana river, below Ilha Solteira Dam.

The mentioned cracks are localized at the 272,00 level, close to the contact between the basalt lava flows.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 IYA, V K et alii. A radiotracer study on flow path of seepage in the coffer dams at S. Isailam. *Int J appl Radiat Isotopes*, New York, **18**:349-57, 1967.
- 2 KEELING, C D & BOLIN, B. General theory of reservoir models. *Tellus*, Stockholm, **19**:566, 1967.
- 3 SAUERWEIN, K. The flow of a stream through a reservoir. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. *Isotopes in hydrology: proceedings of a symposium*, Vienna, 14-18 November 1966. Vienna, 1967. p 697-719.

