

URIEL DUARTE

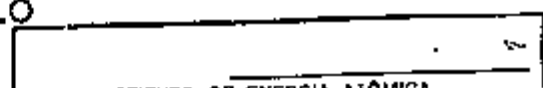
Orientador: Nelson Ellert

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE
VAZÃO COM O EMPREGO DE
TRAÇADORES RADIOATIVOS



Dissertação de Mestrado apresentada
ao Instituto de Geociências da Uni-
versidade de São Paulo.

SÃO PAULO
1973



AGRADECIMENTOS

Expresso meus agradecimentos:

- ao Instituto de Energia Atômica (I.E.A.), na pessoa de seu Superintendente professor Dr. Rômulo - Ribeiro Pieroni, pelo consentimento da realização deste trabalho;
- ao professor Dr. Nelson Ellert, meu orientador no campo de geociências, pelo incentivo e interesse demonstrado neste novo campo da ciência nuclear;
- ao professor Dr. Wladimir Sanchez, diretor da Divisão de Aplicação de Radioisótopos na Engenharia e Indústria (D.A.R.E.I.), a qual pertenceço, pela orientação dada durante as experiências, assim como pela cuidadosa revisão dos textos aqui apresentados;
- ao professor Dr. Edmundo Garcia Agudo, pela ajuda e orientação durante e depois da realização dos ensaios;
- ao professor Dr. Antonio Carlos Gerônimo Castagnet pelas observações teóricas e práticas dos métodos empregados;
- ao Sr. Claudio Szulak pelos projetos da aparelhagem extra usada durante o transcórre dos ensaios;
- ao geólogo Claudio Lísias Seignemartin pela ajuda nos trabalhos de campo;
- a física Barbara Maria Rzycki pelos excelentes desenhos e gráficos aqui apresentados;

- aos meus colegas da Divisão que, direta ou indiretamente, contribuíram na realização deste trabalho;
- as Srtas. Vera Lucia da Costa e Maria Luiza Frêscica pela datilografia;
- ao Sr. Jayme Alves da Silva pelo trabalho de impressão e montagem desta dissertação.

ÍNDICE

Introdução	1
------------------	---

CAPITULO I - NOÇÕES DE RADIOATIVIDADE

I.1 - Isótopos	4
I.2 - Abundância Isotópica	6
I.3 - Radioisótopos Naturais e Séries Radioativas	6
I.4 - Desintegração dos Isótopos Naturais	7
I.5 - Reação Nuclear	7
I.6 - Isótopos Artificiais	9
I.7 - Lei Fundamental da Radioatividade	11
I.8 - Atividade	18
I.9 - Formas de Desintegração	19
I.9.1 - Emissão de Partículas Alfa	19
I.9.2 - Emissão de Partículas Beta	20
I.9.3 - Emissão de Raios Gama	21

CAPITULO II -TRAÇADORES

II.1 - Considerações Gerais	23
II.2 - Traçador Ideal	24
II.3 - Traçadores não Isotópicos	26
II.4 - Traçadores Radioativos	27
II.5 - Aplicação de Radioisótopos	32
II.6 - Técnicas de Medida	32
II.7 - Vantagens e Inconvenientes no uso de Traçadores Radioativos	40
II.8 - Riscos Derivados do uso de Radioisótopos em Hi - drologia	41
II.8.1 - Irradiação Externa	42
II.8.2 - Irradiação Interna	45
II.8.3 - Riscos Potenciais das Técnicas Isotópicas Uti- lizadas	51

CAPITULO III - MEDIDAS DE VAZÃO

III.1 - Métodos Convencionais	54
III.2 - Distância Mínima de Homogeneização	57
III.3 - Verificação da Homogeneização (Lateral)	61
III.4 - Tempo de Passagem da "Onda Radioativa".....	62
III.5 - Métodos Radioisotópicos	64
III.5.1 - Método dos Dois Picos	64
III.5.2 - Método da Contagem Total	69
III.5.2.1 - Variantes do Método	73
III.5.2.2 - Sistemas de Injeção	75
III.5.2.3 - Correntes Divergentes	75
III.5.2.4 - Constante de Proporcionalidade ou de Calibra ção	77
III.5.2.5 - Cálculo da Atividade a Injetar	79
III.5.3 - Método da Injeção Contínua ou da Diluição	81
III.5.3.1 - Cálculo da Atividade a Injetar	84
III.6 - Comparação entre os Métodos Descritos	84

CAPITULO IV - PARTE EXPERIMENTAL

IV.1 - Medidas de Vazão em Tubulações	88
IV.1.1 - Método da Contagem Total	88
IV.1.2 - Método dos Dois Picos	94
IV.1.3 - Comparação entre os resultados obtidos	97
IV.2 - Medidas de Vazão em Canalizações	99
IV.3 - Medidas de Vazão em Rios	108
IV.4 - Conclusões e Observações	112
Bibliografia	114

INTRODUÇÃO

A medida de vazão é problema fundamental em muitos campos, notadamente em engenharia e hidráulica. Incansáveis buscas experimentais e teóricas sobre o problema desenvolveram grande numero de soluções aproximadas. Para cada aplicação em particular foi desenvolvida uma técnica, geralmente com sucesso limitado. Os métodos aqui desenvolvidos além de serem aplicáveis nos casos em que os métodos convencionais não podem ser utilizados apresentam melhor resolução e versatilidade.

Os aparelhos comumente usados nas medições de vazão em tubulações apresentam várias deficiências. Por exemplo, um tubo de Pitot mede a velocidade linear na ponta do tubo. Para se medir volume torna-se necessário considerar a seção transversal da corrente com o tubo Pitot, ou usar-se uma fórmula empírica, para cálculo do fluxo medio, por meio da integral dos pontos da área transversal. Podem também apresentar defeitos provocados pelas partículas em suspensão, que podem obstruir parcial ou totalmente a abertura do tubo.

Placas com orifícios também servem à medição de vazão, mas elas dependem de formulas empíricas, com numerosos coeficientes. Quando um orifício estiver corroído ou houver incrustações, a precisão das medidas será prejudicada. As fórmulas usadas nos cálculos de vazão em tubulações, com estes aparelhos, levam em conta um fator empírico, que depende da natureza da parede da tubulação.

Métodos de dissolução, proporcionam resultados precisos, quando usados em líquidos limpos, com aparelhagem mantidas em perfeitas condições de operação e frequentemente calibradas. Com estes métodos utilizam-se traçadores químicos (cloreto de sódio fenóis, ácido bórico, detergentes, etc...) e colorantes (fluoreceína, dicromato de potássio, rodamina B, eosina, roxo do congo, etc.), que além de caros não são aplicáveis em medidas de grandes vazões. Podem provocar ainda contaminações duradouras sendo fisicamente afe

tadas pelo meio em medição.

Vertedores também possibilitam medições de vazão, por meio de fórmulas semiempíricas. Quando as condições são anormalmente baixas ou altas, geralmente as fórmulas não conduzem a resultados precisos.

Normalmente, em medições de vazão de rios, utiliza-se o molinete. Este aparelho, que necessita de cuidadosa manutenção após cada campanha de medidas, poderá proporcionar resultados insatisfatórios em decorrência de sua parte mecânica. Existe ainda a necessidade de se conhecer a seção transversal do escoamento ou "perímetro molhado", o que é trabalhoso, dada a quantidade de fatores intervenientes.

Em estações fixas, de registro contínuo, os medidores convencionais são insubstituíveis, mas devem ser periodicamente calibrados. Geralmente as calibrações são realizadas por meio de métodos convencionais. Atualmente a técnica mais indicada para aferição das medições de vazão é a dos traçadores radioativos.

São várias as vantagens apresentadas pelas técnicas radioisotópicas de medição de vazão, e entre elas pode-se destacar a identidade entre o agente marcado e o marcador, que pode chegar ao nível atômico (um átomo do isótopo radioativo se comporta do mesmo modo que um átomo estável do mesmo elemento). A detecção do radioisótopo também pode alcançar níveis atômicos (os radioisótopos de vida curta, com períodos de 100 dias ou menos, podem ser detetados em quantidades pequenas como 10^{-16} ou 10^{-17} de gramas). Ainda como vantagens, a técnica possibilita medições "in situ" e vida limitada do radioisótopo, que pode ser escolhido de acordo com a duração prevista para a experiência.

Entre os métodos de medição de vazão descritos neste trabalho, utiliza-se com mais frequência o da "Contagem Total". Seu emprego possibilita obter valores com precisão da ordem de 1% e as medições independem do conhecimento da seção transversal do escoamento.

Foi D. E. Hull, em 1957, que ao analisar medidas realizadas em um oleoduto, onde periodicamente se havia injetado

determinado radioisótopo, adaptou o método dos traçadores químicos aos traçadores radioativos. Com o método da Contagem Total mede-se o fluxo em qualquer parte da corrente e em diversos tipos de corrente. Por meio de um detetor de radiação, fixo em uma seção a jusante, suficientemente distante para proporcionar completa mistura do traçador com o escoamento, registra-se a contagem da radiação emitida durante a passagem da nuvem radioativa. A relação entre a contagem total da radiação N, a atividade A de traçador injetado no escoamento e a vazão volumétrica Q, é expressa por uma fórmula simples,

$$Q = \frac{F \cdot A}{N}$$

onde, F, chamado fator de calibração, é característico de cada radioisótopo, do detetor utilizado e da geometria de detecção.

Neste trabalho descreve-se com pormenores a parte teórica pelo fato de não existir ainda em nossa língua, nenhum compêndio que trate do assunto e também porque os hidrólogos ou pessoas que trabalham no ramo, praticamente desconhecem a utilização da radioatividade na hidrologia.

Na parte prática procurou-se realçar as vantagens dos métodos empregados, caracterizados pela simplicidade, eficiência, baixo custo, alta sensibilidade e ausência de perigo para a saúde dos técnicos.

Pretende-se mostrar, também, as facilidades do emprego de radiotraçadores em hidrologia de superfície, e consequentemente melhor divulgação dos métodos empregados.

CAPÍTULO I

NOÇÕES DE RADIOATIVIDADE

I-1 ISÓTOPOS

A teoria atômica de Dalton postulava serem os átomos de um mesmo elemento inteiramente idênticos, no que concerne à massa, tamanho e demais propriedades. Durante muito tempo considerou-se os pesos relativos dos átomos como a propriedade fundamental dos elementos. Entretanto, Mendeleieff, em sua classificação periódica, dispunha certos elementos em posições que não as exatamente determinadas pela ordem dos pesos atômicos, talvez prevendo o aparecimento de outras propriedades desses elementos. Realmente, os estudos posteriores sobre a estrutura do átomo demonstraram que as propriedades químicas dos elementos são determinadas pelo número de elétrons que envolvem os núcleos. Sendo o número de elétrons do átomo de um dado elemento numericamente igual à carga do núcleo respectivo, ele coincide com o número atômico do elemento. De acordo com a representação do núcleo que fornece o modelo próton-nêutron, é perfeitamente possível admitir espécies atômicas com idênticas estruturas eletrônicas, diferindo apenas no tocante ao número de neutrons que entram na composição dos núcleos. A esta possibilidade corresponde o fenômeno da isotopia.

W. Crookes, em 1896, já admitia a existência de isótopos, mas somente com a descoberta da radioatividade é que apareceram razões mais evidentes desta existência. Em 1906, B. B. Boltwood identificou o iônio como sendo um elemento radioativo. Verificou-se, então, que as propriedades químicas do iônio eram de tal forma idênticas às do tório que os compostos de iônio e tório eram quimicamente inseparáveis. Todavia, esses dois elementos apresentavam indiscutíveis diferenças de massa

e propriedades radioativas. Posteriormente, A. S. Russel e R. Rossi (1912) observaram que os espectros de arco do iônio e do tório eram iguais. Outros casos semelhantes haviam levado F. Soddy (1910) a considerar que um elemento, não obstante sua homogeneidade química, fosse constituído de uma mistura de várias espécies atômicas e que seu peso atômico seria a média ponderada das massas das espécies atômicas componentes.

Comprovou-se a suposição de Soddy quando J.J.Thomson (1912), investigando os raios positivos do neônio, constatou que este elemento continha átomos com número de massa 20 e 22 ainda que os átomos mais pesados representassem apenas uma pequena fração. A partir daí Soddy propôs o nome de isótopos para designar as espécies atômicas com idêntica carga nuclear e massa diferente, tomando em conta que tais espécies atômicas devem ocupar o mesmo lugar na classificação periódica.

Estudos posteriores, efetuados com o auxílio do espectrógrafo de massa, revelaram que a isotopia não é uma exceção, pois a maior parte dos elementos ocorrem na forma de misturas de isótopos. Como os isótopos de um elemento têm idêntica estrutura eletrônica, eles são quimicamente idênticos. O número variável de neutrons é que diferencia os isótopos. É óbvio que as propriedades físicas dos elementos que dependem diretamente da massa atômica não são idênticas nos isótopos. O efeito da diferença da massa é mais apreciável nos casos dos elementos mais leves, porque ela assume uma significação relativa maior. Neste particular, o exemplo extremo é o do hidrogênio, que possui três isótopos: o hidrogênio leve (H), o deutério (^2H) e o trítio (^3H), de números de massa 1, 2, e 3, respectivamente. Os isótopos do hidrogênio são os únicos que receberam nomes específicos, em grande parte devido às apreciáveis diferenças do comportamento que exibem. Para se distinguir um isótopo de outro, usam-se notações que especificam o número de massa. Por exemplo, os isótopos de neônio com os números de massa 20 e 22 são representados por ^{20}Ne e ^{22}Ne .

I-2 ABUNDÂNCIA ISOTÓPICA

Alguns elementos, como o Al, P, etc., possuem somente um isótopo estável. Sem dúvida, a maior parte dos elementos têm dois ou mais isótopos (o Sn chega a ter dez). Quando ocorrem vários isótopos, a proporção com que cada um entra na formação do elemento natural é definida e constante. Esta proporção recebe o nome de abundância isotópica e pode ser expressa em porcentagem, como por exemplo:

- o H natural está formado por 99,985% de ^1H e 0,01492% de ^2H (deutério).
- o C natural está formado por 98,893% de ^{12}C e 1,107% de ^{13}C .
- o O natural tem 99,759% de ^{16}O , 0,0374% de ^{17}O e 0,239% de ^{18}O .

I-3 RADIOISÓTOPOS NATURAIS E SÉRIES RADIOATIVAS

A maioria dos radioisótopos encontrados na natureza possuem cargas nucleares e números de massa elevados. Isótopos naturais com cargas nucleares mais baixas apresentam radiatividade (^3_1H , $^{14}_6\text{C}$, $^{40}_{19}\text{K}$). Com exceção do trítio, os isótopos radioativos naturais dos elementos leves possuem períodos de semidesintegração extremamente longos. O ^3H e o ^{14}C são produzidos continuamente, pelo bombardeio do ^{14}N existente na natureza, com nêutrons provenientes dos raios cósmicos. Os raios cósmicos chegam à Terra, provindos do espaço universal, e são formados por prótons de energia muito alta. A energia média por partícula equivale a cerca de 10.000 MeV, mas existem partículas com energias bem mais elevadas. Ao chocar com os núcleos dos átomos dos componentes do ar, os prótons cósmicos originam processos secundários, desintegram os núcleos atômicos e formam milhares de partículas capazes de originar novas partículas.

Os radioisótopos naturais pesados foram agrupados em

três séries de desintegração, conhecidos como série do tório, do urânio e do actínio. Cada uma delas tem como membro-pai um isótopo radioativo de longo período de semidesintegração, que por sucessivas desintegrações originam os demais, até atingir-se um produto final estável. Os produtos finais das três séries são isótopos do chumbo. A hipótese de existência de uma quarta série radioativa, encontrou confirmação com a descoberta dos elementos transurânicos e a produção artificial de numerosos radioisótopos pesados. Com esses elementos foi possível traçar uma quarta série radioativa, a série do neptúnio.

I-4 DESINTEGRAÇÃO DOS ISÓTOPOS NATURAIS

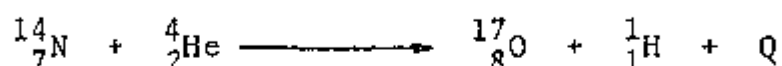
O fenômeno da radioatividade prende-se à existência de radioisótopos, constituídos de núcleos estáveis, que se desintegram espontaneamente. Os processos de desintegração são acompanhados da emissão de partículas alfa (α), beta (β) e gama (γ). Com a desintegração dos núcleos atômicos resultam produtos que diferem do original não somente quanto as propriedades radioativas, mas também em relação às propriedades químicas. Os processos radioativos envolvem, portanto, a transmutação dos elementos. No caso de radioisótopos naturais, geralmente as espécies atômicas resultantes da desintegração também são radioativas. Estas, por sua vez, desintegram-se formando outros produtos, até que, finalmente, resultam espécies estáveis e inativas. Tem-se, assim, toda uma sucessão de produtos de processos radioativos encadeados, chamada série de desintegração.

I-5 REAÇÃO NUCLEAR

A radioatividade natural é um processo espontâneo, que na maioria dos casos ocorre com elementos de massa compre-

endidos entre 238 e 207 e números atômicos compreendidos entre 92 e 81.

A reação nuclear de um elemento naturalmente estável foi conseguida, pela primeira vez, por H. Rutherford (1919), fazendo incidir um feixe de partículas α emitidas pelo rádio sobre nitrogênio gasoso. Observou-se que o bombardeio das moléculas de nitrogênio pelas partículas α produzia pequeno número de novas partículas capazes de atravessar até 40 cm de espessura de ar. A deflexão dessas partículas, por meio de um campo magnético, demonstrou que se tratava de prótons movendo-se com grande velocidade. Estes prótons seriam resultante de uma reação nuclear do tipo:



onde Q é a energia de desintegração envolvida na reação.

Trabalhos posteriores de E. Rutherford e J. Chadwick (1919 e 1925) mostraram que todos os elementos compreendidos entre o boro e o potássio, com exceção feita ao carbono e oxigênio, são igualmente suscetíveis de desintegração e emissão de protons, por efeito do bombardeio com partículas α .

O poder de penetração dos prótons formados nas reações (α, p) depende do elemento bombardeado. O flúor emite partículas com poder de penetração no ar, da ordem de 65 cm, e o alumínio, de até 90 cm. Os prótons são emitidos em todas as direções, o que prova que sua energia cinética provém principalmente da desintegração dos átomos. O número de desintegrações, provocadas pelo bombardeamento dos radioisótopos naturais com partículas alfa (α), é mínimo, tendo-se constatado a formação de apenas dezenas de prótons por milhão de partículas α incidentes. As partículas alfa possuem carga elétrica positiva e por isso ao se aproximarem de um núcleo, tendem a ser desviadas. A colisão destas partículas com um núcleo é tanto mais difícil quanto maior for a carga nuclear do elemento alvo. Esta limitação é superada, quando a partícula incidente possui alta energia, o que se consegue mediante utilização de aceleradores. Com partículas α aceleradas foram conseguidas novas desintegrações do tipo (α, p).

Os prótons e os dêuterons (núcleos do deutério) possuem cargas elétricas menores, e por isso foram admitidos como eventuais projéteis capazes de vencer a repulsão eletrotática dos núcleos com mais facilidade do que as partículas α .

Os neutrons não possuem carga, daí sua possibilidade de colidir com os núcleos dos elementos é maior do que, por exemplo, as partículas duplamente carregadas. Em consequência as colisões inelásticas com neutrons, que provocam desintegrações de núcleos, ocorrem mais frequentemente do que nas irradiações com partículas α . Os neutrons são emitidos com velocidades da ordem de 1/10 da velocidade da luz e energias de um milhão de elétrons-volts aproximadamente. As colisões de neutrons rápidos (altas energias) provocam desintegrações de muitos núcleos. Os neutrons rápidos depois de sofrerem colisões perdem energia e se transformam em neutrons lentos ou térmicos. Em outras palavras, neutrons térmicos são aqueles cujas velocidades foram reduzidas nas colisões, a ponto de suas energias se tornarem equivalentes à energia de equilíbrio de qualquer outra partícula à mesma temperatura. O amortecimento da velocidade é alcançado mediante a passagem dos neutrons rápidos através de materiais contendo ao menos uma espécie de átomos leves, chamados moderadores.

I-6 ISÓTOPOS ARTIFICIAIS

A produção de isótopos artificiais foi iniciada por I. Curie e F. Joliot (1934). Submetendo alvos de boro, magnésio e alumínio ao bombardeio com partículas α , constataram que os materiais bombardeados continuavam a emitir radiações mesmo depois de removida a fonte de partículas α . As medidas de ionização e de deflexão magnética provaram que a radiação emitida pelos elementos bombardeados era constituída de positrons. Observou-se, também, que a intensidade dos positrons diminuía exponencialmente com o tempo, da mesma forma que nos casos de isótopos naturais. O casal Joliot-Curie explicou o fenô

meno admitindo a formação de núcleos estáveis em reações do tipo (α, η), que, em seguida, se desintegravam com emissão de positrons. Em cada caso, foi medido o período de desintegração do processo.

Posteriormente, numerosos cientistas conseguiram produzir artificialmente grande número de outros isótopos, não só mediante bombardeio com partículas naturais, mas também com prótons e dêuterons eletricamente acelerados e neutrons. Os neutrons se encontram entre as melhores partículas para o bombardeio de elementos com vistas à obtenção de isótopos radioativos. As reações nucleares podem ser de vários tipos, conforme sejam os neutrons rápidos, epitérmicos e térmicos.

Existem mais de uma dúzia de tipos de reações nucleares que dão origem a isótopos radioativos artificiais. A maioria dos isótopos radioativos artificiais são emissores de eletrons negativos (partículas beta), em vez de positrons. Há uma regra que, com poucas exceções, permite predizer o sinal da radiação. Se o isótopo formado for mais pesado do que os isótopos estáveis do elemento, ele será um emissor de partículas β negativas; se mais leve, geralmente será emissor de positrons. Menos frequentemente o núcleo deste elemento pode capturar um eletron das camadas mais próximas. De cada um dos elementos conhecidos, pode se produzir vários isótopos. Em geral, um dado isótopo pode ser obtido por meio de mais de uma reação nuclear.

Métodos práticos para a produção artificial de radioisótopos são os baseados no bombardeamento com ions eletricamente acelerados (protons, deuterons e núcleos de hélio, com velocidades controladas, produzidas em ciclotron) ou com neutrons rápidos e lentos. Presentemente, a mais importante fonte de produção de radioisótopos artificiais é o reator nuclear, que é capaz de fornecer um intenso feixe neutrônico, que permite irradiar facilmente qualquer elemento.

1.7 LEI FUNDAMENTAL DA RADIOATIVIDADE

O decaimento radioativo é uma propriedade do núcleo e só depende do seu estado. O decaimento de todos os radioisótopos é caracterizado pela seguinte regularidade: em dado isótopo o número de núcleos que se desintegra, por unidade de tempo, representa uma fração definida do número total de núcleos remanescentes. A fração dos núcleos desintegrados varia de elemento para elemento, dependendo da instabilidade de cada um deles. Matematicamente a lei do decaimento radioativo pode ser expressa pela relação:

$$-dN = \lambda \cdot N \cdot dt \quad (1)$$

isto é, o número de átomos dN , que se desintegra durante um curto período de tempo dt , é proporcional ao número total inicial de átomos N . O fator λ é chamado constante de desintegração e determina o número de átomos desintegrados por unidade de tempo. A constante é expressa em segundos⁻¹, dias⁻¹, anos⁻¹ e tem valor definitivo para cada radioisótopo. O sinal negativo que precede dN indica que o processo de desintegração é acompanhado pelo decréscimo do número de átomos radioativos.

A lei básica do decaimento radioativo pode ser deduzida como se segue:

a) multiplicamos a expressão (1) por -1

$$\begin{aligned} (-1) \cdot (dN) &= (-1) \cdot (\lambda \cdot N \cdot dt) \\ dN &= -\lambda \cdot N \cdot dt \end{aligned} \quad (2)$$

b) dividimos (2) por N

$$\frac{dN}{N} = \frac{-\lambda \cdot N \cdot dt}{N} \quad \therefore \quad \frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (3)$$

c) integramos (3) para obter a totalidade dos átomos desintegrados durante o tempo t

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt$$

as integrais variam de N_0 (número inicial de átomos) no instante $t = 0$ até N (número final de átomos) no instante t

$$\ln N \left| \begin{matrix} N \\ N_0 \end{matrix} \right. = -\lambda \cdot t$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda \cdot t}$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (4)$$

onde e é a base dos logarítimos naturais.

Chama-se meia vida ou, período de semidesintegração, o intervalo de tempo $T_{1/2}$, necessário para que a atividade de de radioisótopo seja reduzida exatamente pela metade. Fazendo $N = N_0/2$ e $t = T_{1/2}$, na equação(4) temos

$$\lambda T_{1/2} = \ln 2 = 0,693$$

Portanto, a meia vida de um radioisótopo é calculada pela equação:

$$T_{1/2} = 0,693/\lambda$$

As meias vidas dos radioisótopos variam dentro de grandes limites (tabela I).

De acordo com a lei exponencial de desintegração, o número de átomos radioativos presentes em uma amostra se reduz à metade depois de transcorrido o tempo T . No fim de um tempo $2T$, restará um quarto dos átomos radioativos originais e assim por diante. A desintegração exponencial significa que determinado átomo possui, em dado instante, uma probabilidade definida de sofrer a desintegração, probabilidade essa que é proporcional ao número de átomos radioativos presentes no momento. Portanto, a vida de um átomo radioativo pode estender-se entre valores de tempo que vão desde zero até infinito. Explica-se assim, a gradual redução da intensidade da radiação, pois do contrário, todos os átomos se desintegrariam ao mesmo tempo. Frequentemente se menciona, entre as características dos radioisótopos, o período de vida média de um átomo radioativo. Pode-se demonstrar que a vida média de um átomo radioativo, τ , é igual à recíproca de sua constante de desintegração

$$\ln N \left| \begin{matrix} N \\ N_0 \end{matrix} \right. = -\lambda \cdot t$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda \cdot t}$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (4)$$

onde e é a base dos logarítimos naturais.

Chama-se meia vida ou, período de semidesintegração, o intervalo de tempo $T_{1/2}$, necessário para que a atividade de de radioisótopo seja reduzida exatamente pela metade. Fazendo $N = N_0/2$ e $t = T_{1/2}$, na equação(4) temos

$$\lambda T_{1/2} = \ln 2 = 0,693$$

Portanto, a meia vida de um radioisótopo é calculada pela equação:

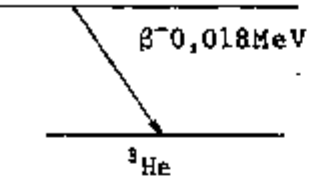
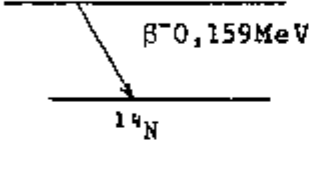
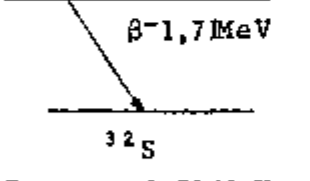
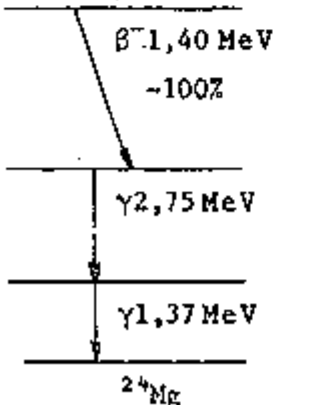
$$T_{1/2} = 0,693/\lambda$$

As meias vidas dos radioisótopos variam dentro de grandes limites (tabela I).

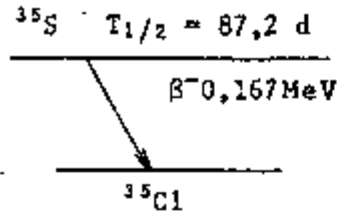
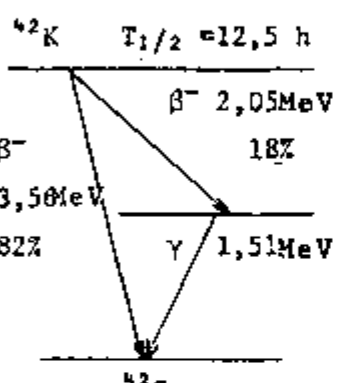
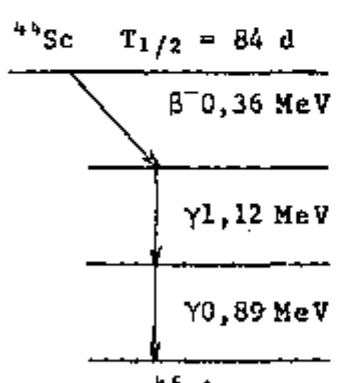
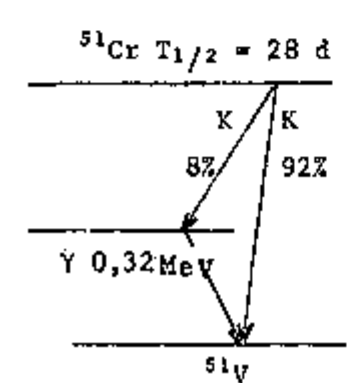
De acôrdo com a lei exponencial de desintegração, o número de átomos radioativos presentes em uma amostra se reduz à metade depois de transcorrido o tempo T . No fim de um tempo $2T$, restará um quarto dos átomos radioativos originais e assim por diante. A desintegração exponencial significa que determinado átomo possui, em dado instante, uma probabilidade definida de sofrer a desintegração, probabilidade essa que é proporcional ao número de átomos radioativos presentes no momento. Portanto, a vida de um átomo radioativo pode estender-se entre valores de tempo que vão desde zero até infinito. Explica-se assim, a gradual redução da intensidade da radiação, pois do contrário, todos os átomos se desintegrariam ao mesmo tempo. Frequentemente se menciona, entre as características dos radioisótopos, o período de vida média de um átomo radioativo. Pode-se demonstrar que a vida média de um átomo radioativo, τ , é igual à recíproca de sua constante de desintegração

TABELA I

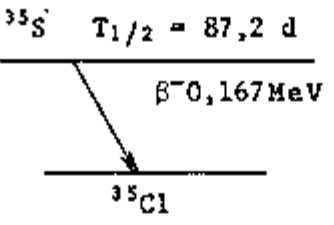
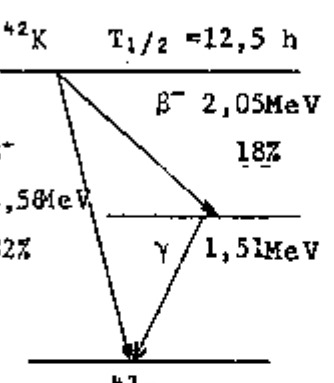
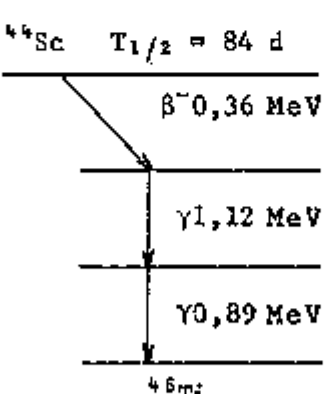
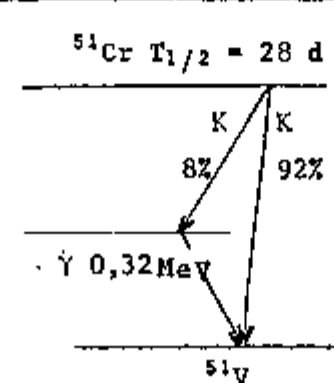
CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS RADIOISÓTOPOS

<p>${}^3\text{H } T_{1/2} = 12,62 \text{ a}$</p>  <p>$\beta^- 0,018 \text{ MeV}$</p> <p>${}^3\text{He}$</p> <p>$E_{\text{max}} = 18 \text{ keV}$</p> <p>$E_{\text{med}} = 5,5 \text{ keV}$</p>	<p>Alcance para E_{max}</p> <p>No ar = 4,5 mm</p> <p>Na água = 6 μ</p>	<p>Origem Natural ${}^{14}\text{N}(n,{}^3\text{H})$</p> <p>Produção Artificial: ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$</p> <p>Fórmula ${}^3\text{H}_2\text{O}$</p> <p>Unidade 1 UT = $\frac{1 \text{ átomo } {}^3\text{H}}{10^{18} \text{ átomos H}}$ = $7,1 \times 10^{-3} \text{ des/min cm}^3 \text{ água}$</p>
<p>${}^{14}\text{C } T_{1/2} = 5760 \text{ a}$</p>  <p>$\beta^- 0,159 \text{ MeV}$</p> <p>${}^{14}\text{N}$</p> <p>$E_{\text{max}} = 159 \text{ keV}$</p> <p>$E_{\text{med}} = 50 \text{ keV}$</p>	<p>Alcance para E_{max}</p> <p>No ar = 19,3 cm</p> <p>Na água = 250 μ</p>	<p>Origem Natural ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$</p> <p>Produção Artificial ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$</p>
<p>${}^{32}\text{P } T_{1/2} = 14,3 \text{ d}$</p>  <p>$\beta^- 1,7 \text{ MeV}$</p> <p>${}^{32}\text{S}$</p> <p>$E_{\text{max}} = 1,71 \text{ MeV}$</p> <p>$E_{\text{med}} = 700 \text{ keV}$</p>	<p>Alcance para E_{max}</p> <p>No ar = 603 cm</p> <p>Na água = 8 mm</p>	<p>Processo de Produção ${}^{31}\text{P}(n,\gamma){}^{32}\text{P}; \sigma = 0,19 \text{ barns}$</p> <p>Atividade Produzida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)</p> <p>1 semana = 25mCi/g de P</p>
<p>${}^{24}\text{Na } T_{1/2} = 15 \text{ h}$</p>  <p>$\beta^- 1,40 \text{ MeV}$ -100%</p> <p>$\gamma 2,75 \text{ MeV}$</p> <p>$\gamma 1,37 \text{ MeV}$</p> <p>${}^{24}\text{Mg}$</p>	<p>$E_{\gamma} : 1,84 \text{ mR/h: 1m: 1mCi}$</p> <p>Na água:</p> <p>$\mu_{01} = 0,05 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 13,6 \text{ cm}; X'_{1/2} = 20 \text{ cm}$</p> <p>$\frac{\mu_{01}}{\rho} = 0,024 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção ${}^{23}\text{Na}(n,\gamma){}^{24}\text{Na};$ $\sigma = 0,54 \text{ barns}$</p> <p>Atividade Produzida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)</p> <p>24 horas = 260mCi/g Na</p>

CONTINUAÇÃO TABELA I

<p>^{35}S $T_{1/2} = 87,2 \text{ d}$</p>  <p>$\beta^- 0,167 \text{ MeV}$</p> <p>$^{35}\text{Cl}$</p> <p>$E_{\text{max}} = 167 \text{ keV}$</p> <p>$E_{\text{med.}} = 49 \text{ keV}$</p>	<p>Alcance para E_{max}</p> <p>No ar = 27 cm</p> <p>Na água = 250 μ</p>	<p>Processo de Produção $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S};$ $\sigma = 0,30 \text{ barns}$ $^{34}\text{S}(n,\gamma)^{35}\text{S};$ $0,011 \text{ barns}$</p> <p>Atividade Produzida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)</p> <p>1 semana = 6,3 mCi/g Cl 1 semana = 0,26 mCi/g S</p>
<p>^{42}K $T_{1/2} = 12,5 \text{ h}$</p>  <p>$\beta^- 2,05 \text{ MeV}$ 18%</p> <p>$\beta^- 3,50 \text{ MeV}$ 82%</p> <p>$\gamma 1,51 \text{ MeV}$</p> <p>^{42}Ca</p>	<p>$E_{\gamma} : 0,14 \text{ mR/h} ; 1 \text{ m; } 1 \text{ mCi}$</p> <p>Na água</p> <p>$\frac{\mu_{01}}{\rho} = 0,058 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 12,4 \text{ cm}; X'_{1/2} = 17,8 \text{ cm}$</p> <p>$\frac{\mu_{a1}}{\rho} = 0,028 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção $^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K};$</p> <p>Atividade Produzida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)</p> <p>24 horas : 27 mCi/g K</p>
<p>^{46}Sc $T_{1/2} = 84 \text{ d}$</p>  <p>$\beta^- 0,36 \text{ MeV}$</p> <p>$\gamma 1,12 \text{ MeV}$</p> <p>$\gamma 0,89 \text{ MeV}$</p> <p>^{46}Ti</p>	<p>$E_{\gamma} : 0,14 \text{ mR/h (alm, p/1mCi)}$</p> <p>EM ÁGUA</p> <p>$\mu_{01}/\rho = 0,058 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 10 \text{ cm} ; X'_{1/2} = 14,4 \text{ cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,028 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção $^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$ $\sigma = 22 \text{ barns}$</p> <p>Atividade Produzida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)</p> <p>1 semana = 0,38 Ci/g Sc</p>
<p>^{51}Cr $T_{1/2} = 28 \text{ d}$</p>  <p>K 8%</p> <p>K 92%</p> <p>$\gamma 0,32 \text{ MeV}$</p> <p>^{51}V</p>	<p>$E_{\gamma} : 0,016 \text{ mR/h (alm, p/1mCi)}$</p> <p>Na água</p> <p>$\mu_{01}/\rho = 0,12 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 5,7 \text{ cm} ; X'_{1/2} = 8,3 \text{ cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,032 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção $^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$ $\sigma = 0,69 \text{ barns}$</p> <p>Atividade Produzida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)</p> <p>1 semana = 30 mCi/g Cr</p>

CONTINUAÇÃO TABELA I

<p>^{35}S $T_{1/2} = 87,2 \text{ d}$</p>  <p>$\beta^- 0,167 \text{ MeV}$</p> <p>$^{35}\text{Cl}$</p> <p>$E_{\text{max}} = 167 \text{ keV}$</p> <p>$E_{\text{med}} = 49 \text{ keV}$</p>	<p>Alcance para E_{max}</p> <p>No ar = 27 cm</p> <p>Na água = 250 μ</p>	<p>Processo de Produção $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$; $\sigma = 0,30 \text{ barns}$</p> <p>$^{34}\text{S}(n,\gamma)^{35}\text{S}$; $0,011 \text{ barns}$</p> <p>Atividade Produzida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)</p> <p>1 semana = 6,3mCi/g Cl 1 semana = 0,26mCi/g S</p>
<p>^{42}K $T_{1/2} = 12,5 \text{ h}$</p>  <p>$\beta^- 2,05 \text{ MeV}$ 18%</p> <p>$\beta^- 3,58 \text{ MeV}$ 82%</p> <p>$\gamma 1,51 \text{ MeV}$</p> <p>^{42}Ca</p>	<p>$E_{\gamma} : 0,14 \text{ mR/h} ; 1 \text{ m; } 1 \text{ mCi}$</p> <p>Na água</p> <p>$\frac{\mu_{01}}{\rho} = 0,058 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 12,4 \text{ cm} ; X'_{1/2} = 17,8 \text{ cm}$</p> <p>$\frac{\mu_{a1}}{\rho} = 0,028 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção $^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K}$;</p> <p>Atividade Produzida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)</p> <p>24 horas : 27mCi/g K</p>
<p>^{46}Sc $T_{1/2} = 84 \text{ d}$</p>  <p>$\beta^- 0,36 \text{ MeV}$</p> <p>$\gamma 1,12 \text{ MeV}$</p> <p>$\gamma 0,89 \text{ MeV}$</p> <p>^{46}Ti</p>	<p>$E_{\gamma} : 0,14 \text{ mR/h (alm, p/lmCi)}$</p> <p>EM ÁGUA</p> <p>$\mu_{01}/\rho = 0,058 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 10 \text{ cm} ; X'_{1/2} = 14,4 \text{ cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,028 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção $^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$</p> <p>$\sigma = 22 \text{ barns}$</p> <p>Atividade Produzida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)</p> <p>1 semana = 0,38Ci/g Sc</p>
<p>^{51}Cr $T_{1/2} = 28 \text{ d}$</p>  <p>$\beta^- 0,32 \text{ MeV}$</p> <p>$\gamma 0,32 \text{ MeV}$ 82%</p> <p>$\gamma 0,32 \text{ MeV}$ 92%</p> <p>^{51}V</p>	<p>$E_{\gamma} : 0,016 \text{ mR/h (alm, p/lmCi)}$</p> <p>Na água</p> <p>$\mu_{01}/\rho = 0,12 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 5,7 \text{ cm} ; X'_{1/2} = 8,3 \text{ cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,032 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção $^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$</p> <p>$\sigma = 0,69 \text{ barns}$</p> <p>Atividade Produzida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$)</p> <p>1 semana = 30 mCi/g Cr</p>

CONTINUAÇÃO TABELA I

<p>^{58}Co $T_{1/2} = 71\text{d}$</p>	<p>$E_{\gamma} : 0,55\text{mR/h (alm, p/lmCi)}$</p> <p>Na água $\mu_{01}/\rho = 0,075\text{cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 9,3\text{cm}; X'_{1/2} = 13,3\text{cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,03\text{cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção</p> <p>$^{58}\text{Ni}(n,\gamma)^{58}\text{Co}$</p> <p>$\sigma = 90$ barns</p> <p>Atividade Produzida $(10^{12}\text{n/cm}^2/\text{s})$</p> <p>1 semana : $100\mu\text{Ci/g Ni}$</p>
<p>^{60}Co $T_{1/2} = 5,3\text{a}$</p>	<p>$E_{\gamma} : 1,31\text{mR/h (alm, p/lmCi)}$</p> <p>Na água $\mu_{01}/\rho = 0,063\text{cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 11,1\text{cm}; X'_{1/2} = 15,8\text{cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,029\text{cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção</p> <p>$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$</p> <p>$\sigma = 37$ barns</p> <p>Atividade Produzida $(10^{12}\text{n/cm}^2/\text{s})$</p> <p>1 semana : 23mCi/g Co</p>
<p>^{65}Zn $T_{1/2} = 245\text{d}$</p>	<p>$E_{\gamma} : 0,27\text{mR/h} : 1\text{m} : 1\text{mCi}$</p> <p>Na água $\mu_{01}/\rho = 0,067\text{cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 10,4\text{cm}; X'_{1/2} = 14,9\text{cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,031\text{cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção</p> <p>$^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$</p> <p>$\sigma = 0,22$ barns</p> <p>Atividade Produzida $(10^{12}\text{n/cm}^2/\text{s})$</p> <p>1 semana = $0,88\text{mCi/g Zn}$</p>
<p>^{82}Br $T_{1/2} = 35,4\text{h}$</p>	<p>$E_{\gamma} : 1,46\text{mR/h} : 1\text{m} : 1\text{mCi}$</p> <p>Na água $\mu_{01}/\rho = 0,084\text{cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 8,2\text{cm}; X'_{1/2} = 12\text{cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,032\text{cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção</p> <p>$^{81}\text{Br}(n,\gamma)^{82}\text{Br}$</p> <p>$\sigma = 1,6$ barns</p> <p>Atividade Produzida $(10^{12}\text{n/cm}^2/\text{s})$</p> <p>24 horas = 160mCi/g Br</p>

CONTINUAÇÃO TABELA I

<p>^{86}Rb $T_{1/2} = 18,7\text{d}$</p> <p>β^- 0,68 MeV 8%</p> <p>β^- 1,76 MeV 92%</p> <p>γ 1,08 MeV</p> <p>^{86}Sr</p>	<p>$E_\gamma = 0,05\text{mR/h} : 1\text{m} : 1\text{mCi}$</p> <p>Na água</p> <p>$\mu_{01}/\rho = 0,072\text{cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 9,8\text{cm} ; X'_{1/2} = 14\text{cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,031\text{cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção</p> <p>$^{85}\text{Rb}(n,\gamma)^{86}\text{Rb}$</p> <p>$\sigma = 0,66$ barns</p> <p>Atividade Produzida</p> <p>$(10^{12}\text{n}/\text{cm}^2/\text{s})$</p> <p>1 semana 25mCi/g Rb</p>
<p>^{131}I $T_{1/2} = 80\text{d}$</p> <p>β^- 0,25 MeV 3%</p> <p>β^- 0,33 MeV 9%</p> <p>β^- 0,61 MeV 87%</p> <p>β^- 0,81 MeV 1%</p> <p>γ 0,64 MeV</p> <p>γ 0,28 MeV 7%</p> <p>γ 0,36 MeV 80%</p> <p>γ 0,72 MeV</p> <p>^{131}Xe</p>	<p>$E_\gamma = 0,22\text{mR/h} : 1\text{m} : 1\text{mCi}$</p> <p>Na água</p> <p>$\mu_{01}/\rho = 0,11\text{cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 6,3\text{cm} ; X'_{1/2} = 9\text{cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,03\text{cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção</p> <p>$^{130}\text{Te}(n,\gamma)^{131}\text{Te} \beta^{131}\text{I}$</p>
<p>^{110}Ag $T_{1/2} = 253\text{d}$</p> <p>Energia dos fotons e %</p> <p>$\gamma_1 = 1,52 - 15\%$</p> <p>$\gamma_2 = 1,39 - 25\%$</p> <p>$\gamma_3 = 0,86 - 78\%$</p> <p>$\gamma_4 = 0,81 - 6\%$</p> <p>$\gamma_5 = 0,76 - 21\%$</p> <p>$\gamma_6 = 0,71 - 16\%$</p> <p>$\gamma_7 = 0,68 - 10\%$</p> <p>$\gamma_8 = 0,66 - 99\%$</p>	<p>$E_\gamma = 1,43\text{mR/h} : 1\text{m} : 1\text{mCi}$</p> <p>Na água</p> <p>$\mu_{01}/\rho = 0,075\text{cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 9,3\text{cm} ; X'_{1/2} = 13,3\text{cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,03\text{cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção</p> <p>$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110}\text{Ag}$</p> <p>$\sigma = 1,56$ barns</p> <p>Atividade Produzida</p> <p>1 semana = 3,9mCi/g Ag</p>
<p>^{192}Ir $T_{1/2} = 74\text{d}$</p> <p>Energia dos fotons e %</p> <p>$\gamma_1 = 0,61 - 7\%$</p> <p>$\gamma_2 = 0,60 - 12\%$</p> <p>$\gamma_3 = 0,46 - 57\%$</p> <p>$\gamma_4 = 0,32 - 85\%$</p> <p>$\gamma_5 = 0,31 - 30\%$</p> <p>$\gamma_6 = 0,30 - 25\%$</p> <p>$\gamma_7 = 0,20 - 4\%$</p>	<p>$E_\gamma = 0,48\text{mR/h} : 1\text{m} : 1\text{mCi}$</p> <p>Na água</p> <p>$\mu_{01}/\rho = 0,105\text{cm}^2/\text{g}$</p> <p>$X_{1/2} = 6,6\text{cm} ; X'_{1/2} = 9,6\text{cm}$</p> <p>$\mu_{a1}/\rho = 0,033\text{cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção</p> <p>$^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$</p> <p>$\sigma = 370$ barns</p> <p>Atividade Produzida</p> <p>$(10^{12}\text{m}/\text{cm}^2/\text{s})$</p> <p>1 semana = 1,7mCi/g Ir</p>

CONTINUAÇÃO TABELA I

<p>^{198}Au</p> <p>$T_{1/2} = 65 \text{ h}$ $\beta^- 0,29 \text{ MeV } 1\%$ $\beta^- 1,37 \text{ MeV } 0,02\%$ $\beta^- 0,96 \text{ MeV } 99\%$ $\gamma 0,68 \text{ MeV } 1\%$ $\gamma 0,41 \text{ MeV}$ ^{198}Hg</p>	<p>$E_{\gamma} = 0,23 \text{ mR/h: } 1 \text{ m: } 1 \text{ mCi}$</p> <p>Na água $\mu_{01}/\rho = 0,103 \text{ cm}^2/\text{g}$ $X_{1/2} = 6,6 \text{ cm}; X'_{1/2} = 9,8 \text{ cm}$ $\mu_{a1}/\rho = 0,033 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Processo de Produção $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ $\sigma = 98 \text{ barns}$</p> <p>Atividade Produzida $(10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s})$ 1 semana = $6,2 \text{ mCi/g Au}$</p>
---	---	---

ABREVIATURAS USADAS:

E_{max} = ENERGIA MÁXIMA

E_{med} = ENERGIA MÉDIA

des = DESINTEGRAÇÃO

mR/h, m, mCi = MILIROENTGEM POR HORA, POR METRO, POR MILICURIE

μ_{01} = COEFICIENTE DE ABSORÇÃO TOTAL (NA ÁGUA) E PARA A ENERGIA $h\nu$ (cm^{-1})

μ_{a1} = COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DO MEIO 1

ρ = DENSIDADE DO MEIO

$X_{1/2}$ = ESPESSURA DE SEMIRREDUÇÃO (SEMIESPESURA) (REDUZ RADIAÇÃO PRIMÁRIA A 50%)

$X'_{1/2}$ = ESPESSURA MÉDIA DE SEMIRREDUÇÃO (REDUZ RADIAÇÃO PRIMÁRIA A 37%)

$T_{1/2}$ = MEIA VIDA

n = NEUTRONS

σ = SEÇÃO DE CHOQUE

ção:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

Quando se utiliza isótopos radioativos na solução de problemas hidrológicos, a meia vida é um dos fatores que limita sua escolha. A meia vida deve ser compatível com o período entre a produção do rádioisótopo e o fim do trabalho. No computo deste tempo temos: irradiação, fracionamento, diluições, marcação, transporte ao lugar onde se realiza o trabalho e duração do mesmo. Este último valor nem sempre é passível de cálculo quando se estuda águas subterrâneas.

Segundo os dados da tabela I, quando o tempo transcorrido entre a calibração e a medição for superior a 5 ou 6 meias vidas, a atividade residual se reduz a 3,12% e 1,56% respectivamente, da atividade inicial. Nestas condições, se a diluição do traçador, no ponto de amostragem for grande, torna-se difícil detetá-la.

Quando se realizam experiências em águas subterrâneas com traçadores radioativos, é preciso conhecer pelo menos a ordem de magnitude do tempo gasto entre a injeção e a detecção, isto é, a duração do ensaio, para que se possa selecionar o traçador radioativo. Utilizando-se as conhecidas fórmulas de D'Allen Hazen, Zunker, Darcy, etc., calcula-se a permeabilidade K do meio e estima-se o tempo de trânsito do traçador entre dois pontos. De acôrdo com a expressão de Darcy

$$V_1 = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{K}{m_e} \cdot \frac{dh}{dl}$$

onde Δt é o tempo de trânsito do traçador entre dois pontos,

Δl é a distância entre os dois pontos considerados,

m_e é a porosidade efetiva,

dh/dl é o gradiente hidráulico

1.8 ATIVIDADE

A atividade de uma substância é caracterizada pelo

número de desintegrações radioativas que ocorre na unidade de tempo. Portanto podemos escrever

$$A = -dN/dt$$

onde dN é o número de átomos radioativos desintegrados no intervalo de tempo dt . A atividade A é igual ao produto da constante de desintegração λ , multiplicada pelo número total de átomos radioativos N_0

$$A = \lambda N_0$$

De acôrdo com a equação (4), a variação da atividade, no tempo t considerado, pode ser calculada pela equação

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Muitas vêzes se deseja não a atividade remanescente, mas o valor percentual ou fração da atividade inicial. Usa-se então a expressão

$$A_t/A_0 = e^{-\lambda t}$$

onde A_t/A_0 é a relação entre a atividade residual e a atividade inicial, ou seja a fração da atividade encontrada depois de um período de tempo t .

A unidade de atividade é o Curie (Ci), que representa a desintegração de $3,7 \cdot 10^{10}$ átomos por segundo. Como submúltiplos empregam-se o milicurie (mCi) e o microcurie (μ Ci).

$$1 \text{ Ci} = 10^3 \text{ mCi} = 10^6 \mu\text{Ci}$$

I.9 FORMAS DE DESINTEGRAÇÃO

I.9.1 EMISSÃO DE PARTÍCULAS ALFA

O estudo dos desvios sofridos pelas partículas alfa (α), sob a ação combinada de campos magnéticos e elétricos, demonstrou que a relação entre a carga e massa das partículas

alfa é a mesma, qualquer que seja a fonte emissora.

$e/m = 4,813 \text{ u.e.m. por g}$, ou $5,2727 \cdot 10^{17} \text{ e.s.u.g}^{-1}$,
 onde u.e.m. é a unidade elétrica de massa e
 e.s.u.g^{-1} é a carga específica do eletron.

Para se determinar a massa da partícula α , foi preciso conhecer a carga transportada por um número definido de partículas. Determinou-se que a carga positiva de uma partícula α é equivalente a duas vezes a carga eletrônica. A massa da partícula alfa é igual a $6,62 \cdot 10^{-24} \text{ g}$, que é aproximadamente quatro vezes maior que a do átomo de hidrogênio. Formulou-se, assim, a hipótese de que a partícula alfa seria um átomo de hélio duplamente ionizado. De fato, E. Rutherford e F. Royds (1906) confirmariam, experimentalmente, por análises espectroquímicas, que o gás emitido pelas substâncias radioativas emissoras de partículas alfa era o hélio.

As partículas α movem-se através dos gases em linha reta, causando a ionização das moléculas do meio. Depois de percorrerem certa distância, não se pode identificar mais qualquer efeito provocado pelas partículas α . As partículas alfa emitidas pelos diferentes radioisótopos se caracterizam por possuir distintos poderes de penetração. Chama-se percurso à distância de penetração, em centímetros, através do ar seco, a 15°C e 760mm de pressão. Em geral, as partículas α emitidas por dado elemento radioisotópico possuem idêntica velocidade inicial, mas seu percurso varia com a natureza do meio atravessado.

I.9.2 EMISSÃO DE PARTÍCULAS BETA

As partículas beta (β) são constituídas de elétrons emitidos diretamente pelos núcleos, durante os processos de desintegração radioativa. As partículas β não possuem energias discretas. A velocidade das partículas beta varia continuamente dentro de certa faixa, sendo que as de maior conteúdo energético possuem velocidades próximas à da luz. Estas partículas são emitidas segundo um espectro contínuo de

energias.

As partículas β também provocam fenômenos de ionização. Para iguais distâncias percorridas, a ação ionizante das partículas β é bem menor do que a das partículas α . As partículas β mais rápidas produzem, ao atravessar o ar à pressão atmosférica, 50 a 100 pares de ions por cm percorrido, ao passo que as partículas α de mesma energia chegam a produzir 20.000 pares de ions. Em compensação, o percurso desenvolvido pelas partículas beta, no mesmo meio, é bem maior, podendo alcançar algumas dezenas de centímetros no ar. Tal como no caso das partículas α , a ação ionizante das partículas β aumenta à medida que diminuem suas velocidades, atingindo um máximo para valores da ordem de $3 \cdot 10^8$ cm/s. Abaixo deste valor, a ionização torna-se menor e desaparece para velocidades ainda mais fracas.

A absorção das partículas β ocorre de maneira diferente à das partículas α . Enquanto estas sofrem uma atenuação brusca, as partículas β atenuam-se gradualmente, em parte por absorção e em parte pelos desvios de sua trajetória retilínea. Quando as partículas β atravessam um meio absorvente, a intensidade I da radiação primária obedece a equação exponencial

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

onde I_0 é a intensidade de radiação antes de penetrar no meio absorvedor,

μ é um fator de proporcionalidade chamado coeficiente de absorção que depende da natureza do material absorvente e da energia das partículas β ,

x é a espessura do absorvedor atravessada pela partícula,

e é a base dos logarítimos naturais.

1.9.3 EMISSÃO DE RAIOS GAMA

Em muitos casos, nas desintegrações onde existem emissores de partículas α e β , estas podem vir acompanhadas

por raios γ , de natureza eletromagnética. Estes raios possuem comprimento de onda menor que os dos raios X e poder de penetração superior ao das partículas α e β .

Somente certos radioisótopos emitem radiação γ . Ela tanto pode acompanhar uma desintegração α quanto uma desintegração β . Isso acontece quando, na emissão de uma partícula α ou β , o núcleo resultante fica em estado excitado e seu excesso de energia é então emitido em forma de um quantum de radiação eletromagnética, de frequência muito alta. Como o núcleo pode assumir estados energéticos definidos e discretos, a passagem de um estado de maior conteúdo energético a outros mais baixos se processa pela emissão de um quantum de energia $h\nu$, correspondente à diferença de energia entre os estados energéticos envolvidos. Assim, os raios γ emitidos por um radioisótopo têm comprimentos de onda definidos e característicos.

Os raios γ , ao atravessarem uma camada de gases, provocam a ionização das suas moléculas de modo diferente ao que ocorre com as partículas α e β . Estas últimas formam, ao longo do seu percurso, uma contínua sucessão de íons, e, gradualmente, perdem sua energia inicial. Os raios γ conservam suas energias até o momento em que, colidindo com os elétrons dos átomos, transferem a eles energia suficiente para expulsá-los das órbitas.

CAPITULO II

TRAÇADORES

II.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com o nome de traçador designa-se, geralmente, qualquer produto que, incorporado na massa de uma substância, permite investigar seu comportamento em determinado processo físico ou químico.

O uso de traçadores em Hidrologia é muito antigo. Foram utilizados os mais diferentes tipos de traçadores, algumas vezes adicionados diretamente na água, e em outras, aproveitando-se determinadas substâncias nela incorporadas, como consequência de processos naturais ou de derramamentos acidentais. Baseando-se no comportamento destes traçadores pode-se deduzir determinados parâmetros hidrológicos. Porém, para eles, é condição fundamental que seu comportamento seja igual, ao menos, muito parecido ao da água.

Os traçadores não isotópicos mais utilizados, consistem em determinados compostos químicos solúveis em água e facilmente identificáveis, principalmente compostos iônicos e colorantes. Em alguns casos, a simples análise dos íons transportados pela água, como consequência da dissolução de materiais do meio ou de contaminações acidentais, pode proporcionar informações valiosas. Porém a interpretação destes resultados deve ser feita com grande prudência, principalmente quando a água percorre meios de composição litológicas diferentes.

II.2 TRACADOR IDEAL

O traçador ideal para usos hidrológicos deve cumprir as seguintes condições:

1. O comportamento do traçador no processo que se pretende investigar deve ser idêntico ao da água, que dizer, o traçador e a água devem difundir-se com a mesma velocidade (fidelidade do marcado). Esta condição, exige por sua vez, outras a saber:

- o traçador não deve realizar com a água reações que venham interferir em sua identificação posterior;
- não deve provocar reação química com os materiais do meio;
- não deve ser absorvido e/ou adsorvido pelos materiais sólidos do meio;
- no caso de traçadores iônicos, não devem ser produzidos fenômenos de troca com os átomos do mesmo tipo, existentes no meio;
- a quantidade de traçador a ser utilizado em uma experiência não deve modificar de forma significativa, a densidade, viscosidade ou temperatura da água, para não provocar alterações no fluxo natural;
- os fenômenos de dispersão e difusão do traçador devem ser iguais que os correspondentes às moléculas de água.

2. No caso do traçador ser adicionado à água, esta não deve conter nada do mesmo, ou somente uma concentração tão baixa, que não interfira nos resultados.

3. Quando se aproveita como traçador uma substância existente na água, como consequência de um processo natural ou acidental alheio ao hidrólogo, sua concentração deve manter-se constante durante o estudo do fenômeno, sem interação com os materiais sólidos do meio.

4. Deve ser facilmente solúvel em água.

5. Permitir fatores de diluição bastante elevados, isto é, com uma quantidade de traçador razoavelmente pequena, marcar volumes muito grandes de água.

6. Em muitos casos, é condição importante que o traçador possa ser medido "in situ", quer dizer, sem que seja necessário fazer-se amostragem.

7. Não deve contaminar o meio por períodos muito grandes, evitando-se interferências em outras experiências futuras.

8. Deve ser de baixo custo, de fácil manipulação e inócuo para os seres vivos.

Não existe um traçador que cumpra com perfeição todas essas condições, porém uns se aproximam delas mais que outros. Devido a grande diversidade de problemas para os que utilizam traçadores, não é possível selecionar um traçador universal que se adapte satisfatoriamente a todos eles. Em linhas gerais, podem-se distinguir duas situações distintas, segundo se trate de águas superficiais ou de águas subterrâneas. No primeiro caso as condições exigidas do traçador são mais suaves, devido ao escasso contato existente entre a água e os materiais sólidos do meio, as facilidades existentes para as tomadas de amostras, e, em alguns casos, as altas velocidades do fluxo, acarretando curta duração dos ensaios. São numerosos os traçadores, isotópicos e não isotópicos que proporcionam bons resultados em águas superficiais.

Ao contrário, quando se trata de águas subterrâneas que circulam através de meios porosos seguindo trajetórias sinuosas, as condições exigidas ao traçador são mais severas, pelas seguintes razões:

1. A possibilidade de retenção do traçador pelos materiais sólidos do meio é muito elevada, provocadas não somente pelo íntimo contato da água com estes materiais, como pela baixa velocidade dos fluxos existentes.

2. As mudanças de velocidade da água devido a distribuição desigual do tamanho dos poros e das forças de atrito no interior dos mesmos, ocasionam uma dispersão longitudinal e transversal do traçador, que não coincide exatamente com a experimentada pelas moléculas de água. Isto provoca diferenças no transporte dos dois produtos, que podem chegar a ser significativas quando o fluxo da água é pequeno.

3. Diferenças de transporte são devidas também a difusão molecular e osmótica do traçador.

II.3 TRAÇADORES NÃO ISOTÓPICOS

Entre os traçadores não isotópicos mais utilizados, diferenciam-se dois tipos:

- traçadores denominados químicos, não colorantes, tais como cloreto de sódio, fenóis, ácido bórico, detergentes, etc.;
- colorantes, entre os quais podemos citar a fluoresceína, dicromato de potássio, rodamina B, eosina, ^{vermelho} roxo do Congo, azul de metileno, anilina e outros.

Nos casos de investigação em águas subterrâneas, esses traçadores podem provocar contaminações duradouras. A única forma que o traçador tem para sair do meio é por meio das correntes de água. Na realidade, só os traçadores radioativos de meia vida relativamente curta, são autoestinguíveis.

Entre os traçadores químicos, o que maior interesse oferece é o ion cloreto. Sua retenção pelos materiais sólidos do meio é praticamente inexistente, pelo que, neste sentido, constitui um traçador ideal. Sua determinação analítica em amostras de água é simples, podendo ser medido "in situ" por técnicas conductimétricas. Apresenta por sua vez, o inconveniente de encontrar-se sempre presente na água, dificultando, assim, a análise dos resultados. Quando sua concentração natu

ral é elevada, torna-se necessário juntar grandes quantidades de traçador, alterando-se consideravelmente a densidade da água e, provocando o risco derivado da formação de fluxos anômalos. Por outro lado, sua determinação por medidas de condutividade não é um método seletivo deste ion.

Quanto aos colorantes, o dicromato de potássio é utilizado com certa frequência para medir correntes superficiais. Mediante a técnica colorimétrica, baseada na reação com a difenil-carbacida, podem-se determinar concentrações de dicromato da ordem de $2 \cdot 10^{-3}$ ppm (mg/litro); apresenta o risco de ser parcialmente reduzido a cromo trivalente pelas substâncias redutoras da água. A fluoresceína é o colorante mais empregado. Sem aparelhagem especial, podem ser detetadas concentrações de 0,1 ppm e, com fluorímetros, concentrações inferiores a $2 \cdot 10^{-3}$ ppm. Tem o inconveniente de decompor-se com certa facilidade pela ação das argilas, matéria orgânica e óxido de ferro.

No geral, os colorantes tem aplicação muito limitada quando se trata de águas subterrâneas. Não podem ser medidos "in situ" e interagem facilmente com os materiais sólidos do meio. Sua limitada solubilidade na água exige o uso de grandes volumes de solução traçadora.

A sensibilidade relativa de detecção dos traçadores fluorescentes e salinos é mostrada nas tabelas II e III.

II.4 TRAÇADORES RADIOATIVOS

Em termos gerais, o método de traçadores é uma técnica para obter informação de um sistema ou de suas partes, mediante a observação do comportamento de uma substância específica, agregada ao sistema, o traçador. Geralmente o método implica em marcar uma fase específica ou parte do sistema com o traçador, para torná-la facilmente identificável.

Existem dois requisitos fundamentais na escolha do traçador:

T A B E L A II

TRAÇADORES FLUORESCENTES USADAS EM HIDROLOGIA

TRAÇADOR	URANINA	RHODAMINA B	SULFORHODAMINA B* e C**
PROPRIEDADES			
SENSIBILIDADE DE DETEÇÃO (VALORES RELATIVOS; A "IN SITU")	ELEVADA 1	ELEVADA 1	BOA 0,5
RUIDO DE FUNDO NA DETEÇÃO ("BACKGROUND")	ELEVADO (EM ÁGUAS CARREGADAS)	REDUZIDO	REDUZIDO
DEGRADAÇÃO NA LUZ	MUITO ELEVADA	ELEVADA	NULA
INFLUÊNCIA DA TEM- PERATURA SOBRE A MEDIÇÃO (VARIÇÃO POR °C)	REDUZIDA - 0,36%	ELEVADA - 2,7%	*ELEVADA - 2,9% **NULA 0%
RETENÇÃO EM SOLOS	MUITO BAIXA	MUITO ELEVADA	REDUZIDA
SOLUBILIDADE	ALTA 300g/l	REDUZIDA -10g/l	REDUZIDA -10g/l

A SOLUBILIDADE DA RHODAMINA B, DA SULFORHODAMINA B E C PODE SER MELHORADA COM SOLVENTES ORGÂNICOS

T A B E L A III

TRACADORES CONVENCIONAIS USADOS EM HIDROLOGIA

TRAÇADOR	$Cr_2 O_7$	NaI	NaCl	$MgSO_4$	$NaNO_3$	LiCl
PROPRIEDADES						
SOLUBILIDADE (g/l)	600	>1.500	300a400	500	75	600
CONCENTRAÇÃO MÍNIMA DETETÁVEL (POR AMOSTRAGEM)	0,2 a 2×10^{-6} SEM RECONCENTRAÇÃO	10^{-10} A. POR ATIVIDADE	10^{-5} COLORIMETRIA			
	0,2 a 2×10^{-7} COM RECONCENTRAÇÃO	10^{-9} A. CATALÍTICO	10^{-5} a 10^{-6} CONDUCTIMETRIA A. " IN SITU"	1 a $2 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}
COMPORTAMENTO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	INSATISFATÓRIO	ACEITÁVEL EM ÁGUAS COM REDUZIDO TEOR EM I	INSATISFATÓRIO	INSATISFATÓRIO	INSATISFATÓRIO	ACEITÁVEL

1. deve se comportar exatamente como o material marcado, na fase do processo que se deseja investigar;

2. deve possuir uma propriedade particular que o distinga do material marcado, de maneira que possa ser facilmente detetado em presença de outras substâncias.

A primeira condição pode requerer identidade física e química do traçador com o produto marcado, ou somente uma delas, dependendo do parâmetro medido. Algumas propriedades, tais como o calor, índice de refração, densidade e condutividade de aditivos, têm sido empregadas satisfatoriamente em experiências de traçadores.

Sem dúvida, os radioisótopos podem ser utilizados como traçadores, pois apresentam as seguintes vantagens:

1. a identidade entre o produto marcado e o traçador pode chegar ao nível atômico (um átomo do traçador ou isótopo radioativo se comportará igual a um átomo estável do mesmo elemento);

2. a detecção do radiotraçador pode alcançar também, níveis atômicos (os radioisótopos podem ser detetados em quantidades tão pequenas como 10^{-16} ou 10^{-17} de gramas).

Como todos os materiais existentes na natureza, são formados por átomos, e existem um ou mais isótopos radioativos para cada elemento, pode-se por meio de apropriados métodos químicos de síntese, preparar radiotraçadores para qualquer produto, desde substâncias puras até moléculas complexas como as do petróleo e seus derivados petroquímicos.

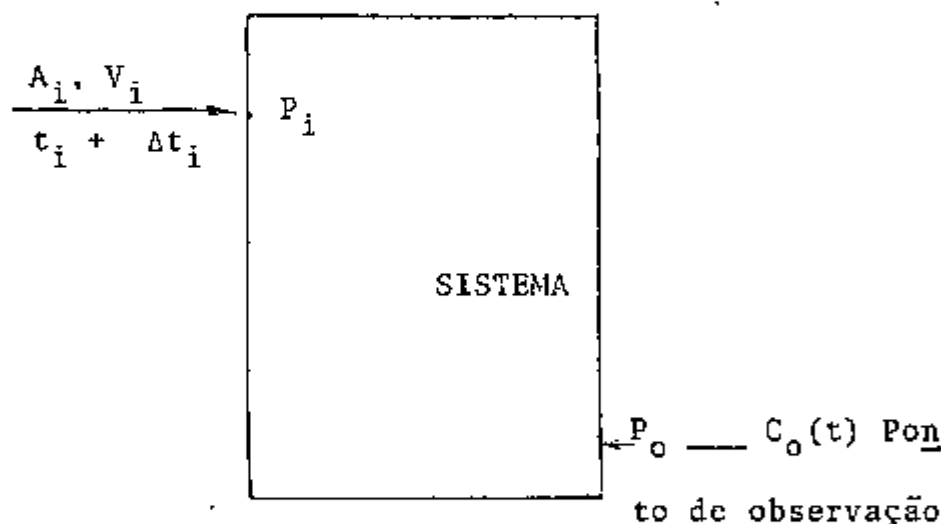
Praticamente os únicos traçadores que competem com os radioativos, no aspecto relacionado ao requisito de identidade, são os isótopos estáveis.

Em cada caso em particular deve-se usar um ou outro dependendo dos objetivos do trabalho, sensibilidade e facilidade de medição.

Além das vantagens já enumeradas, os radioisótopos têm outras características que os condicionam a condição de traçadores ótimos:

1. podem ser detetados seletivamente por discriminação do tipo e energia da radiação emitida;
2. as medições resultam fáceis e isentas de ambiguidades;
3. permitem prever a precisão dos resultados, pelo simples cálculo do erro estatístico associado com as medições de radioatividade.

Geralmente, uma experiência com radiotraçadores consiste em injetar em um ponto P_i do sistema, entre t_i e $t_i + \Delta t_i$, certa atividade A_i incorporada a um volume V_i de produto marcado, e observar a variação da concentração da atividade $C_o(t)$, em função do tempo, em um ponto P_o . Esta situação está representada no diagrama de bloco da figura a seguir



Esquema de uma experiência com radiotraçadores onde:

- A_i = atividade inicial
- V_i = volume inicial
- t_i = início da injeção
- P_i = ponto de injeção do radiotraçador
- P_o = ponto de medição

C_0 = concentração do radiotraçador em P_0

II.5 APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

Sem dúvida, o primeiro requisito a qualquer aplicação de radiotraçadores, é o conhecimento pormenorizado das características do processo a investigar, para estabelecer se a técnica utilizada irá proporcionar resultados satisfatórios.

O segundo requisito importante é planejar com máximo cuidado todas as etapas da experiência, incluindo seleção e preparação do traçador mais conveniente, forma e dispositivo de injeção, instrumental de medição, metodologia de contagem e procedimento para interpretar os resultados. Deve-se prever também procedimentos alternativos, para qualquer eventualidade que poderia apresentar-se durante o curso da experiência. Com isto, muitas vezes evita-se malogrem por falta de previsão os objetivos do ensaio, os esforços e recursos empregados em sua realização.

Um fator essencial do ponto de vista prático (que inclui considerações de custo, manipulação e de segurança radiológica) é a atividade total que deve ser incorporada ao sistema para marcá-lo. (Tabela IV).

II.6 TÉCNICAS DE MEDIDA

A detecção e medida das radiações baseiam-se em sua interação com a matéria, principalmente nos fenômenos de ionização e excitação. Quando um tipo de radiação incide sobre um detetor, este gera um sinal elétrico, que é transformado em impulso de tensão. Uma vez amplificados e, em alguns casos, classificados de acordo com sua altura, esses impulsos são contados por um equipamento eletrônico provido de indicação analógica (integrador) ou digital (escala). Ao número de impulsos liberados por unidade de tempo dá-se o nome de

T A B E L A IV
RADIOISÓTOPOS USADOS EM HIDROLOGIA

RADIOISÓ- POS	FORMA QUÍMICA MAIS USUAL	MEIA VIDA	CONCENTRAÇÃO MÁXIMA PERMISSÍVEL NA ÁGUA _X		TIPO DE RADIAÇÃO EMITIDA		ALGUMAS REFERÊNCIAS COM RESPEITO AO SEU COMPORTAMENTO XXXX
			$\mu\text{C}/\text{cm}^3$		BETA	GAMA	
			XX	XXX	meV	meV	
³ H	HTO	12,3 a	0,1	3×10^{-3}	0,018		I II
¹⁴ C		5760 a	0,2	8×10^{-4}	0,159		
²⁴ Na		15 h	6×10^{-3}	2×10^{-4}	1,40	2,75e1,57	III IV
³² P		14,2 d	5×10^{-4}	2×10^{-5}	1,71		IV
³⁵ S		89 d	2×10^{-3}	6×10^{-5}	0,167		II
³⁶ Cl		3×10^5 a	2×10^{-3}	8×10^{-5}	0,71		II
⁴⁵ Ca	Ca EDTA	165 d	3×10^{-4}	9×10^{-6}	0,26		III IV V
⁴⁶ Sc		84 d	10^{-3}	4×10^{-5}	0,36	1,12e0,89	IV V
⁵¹ Cr	Cr EDTA	27,8 d	5×10^{-2}	2×10^{-3}		0,32	II IV V
⁵⁸ Co	Co EDTA K ₃ Co(CN) ₆	72 d	4×10^{-3}	10^{-4}	0,47	0,81	V
⁵⁹ Fe	Fe EDTA	45 d	2×10^{-3}	6×10^{-5}	0,27e0,46	1,10e1,59	IV V

CONTINUAÇÃO TABELA IV

^{60}Co	Co EDTA $\text{K}_3\text{CO}(\text{CN})_6$	5,2 a	10^{-3}	5×10^{-5}	0,31	1,17e1,33	II	IV V
^{65}Zn	Zn EDTA	245 d	3×10^{-3}	10^{-4}		1,12		IV V
^{82}Br	BrNH_4 ; BrNa	36 h	8×10^{-3}	3×10^{-4}	0,45	0,55e1,47	II	
^{86}Rb		19 d	2×10^{-3}	7×10^{-5}	0,68e1,76	1,08		IV
^{89}Sr		51 d	3×10^{-4}	10^{-5}	1,46			IV
^{90}Sr - ^{90}Y		89 a 64 h			0,54-2,26			IV
^{106}Ru ^{106}Rh							II	IV V
^{110}Ag		253 d	9×10^{-4}	3×10^{-5}	0,88e0,66			
^{114}In			5×10^{-4}	2×10^{-5}			II	IV V
^{124}Sb		60 d	7×10^{-4}	2×10^{-5}	0,61e0,22	1,70e0,72		IV V
^{131}I	NaI	8 d	6×10^{-5}	2×10^{-6}	0,61	0,36e0,64	II	
^{140}Ba - ^{140}La		12,8 d - 40 h	8×10^{-4}	3×10^{-5}	1,38 etc.	1,60 etc.		IV
^{143}Pr			10^{-3}	5×10^{-5}				IV
^{147}Pm		2,5 a	6×10^{-3}	2×10^{-4}	0,22			IV
^{170}Tm		127 d	10^{-3}	5×10^{-5}	0,97	0,084		IV

CONTINUAÇÃO T A B E L A IV

^{192}Ir	Ir EDTA	74 d	10^{-3}	4×10^{-5}	0,67e0,54	0,32e0,46	IV
^{198}Au	Coloidal	65 h	2×10^{-3}	5×10^{-5}	0,96	0,41	

X - DO "BASIC SAFETY STANDARS FOR RAD PROTECTION" IAEA, SAF.
SÉRIE Nº 9 (1962) (INGERIDA POR ANO)

XX - OPERADORES

XXX - PÚBLICO EM GERAL

XXXX - I - EXCELENTE

II - EXISTEM NUMEROSOS TRABALHOS CONFIRMANDO SEU BOM COMPORTAMENTO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS.

III - SE AS ÁGUAS ESTÃO SATURADAS DESTES ELEMENTOS, PODEREMOS TER RESULTADOS ACEITÁVEIS.

IV - COMO CATIONS SÃO GERALMENTE MAUS TRAÇADORES EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, MAS EM CERTOS TIPOS DE ESTRATOS PODEM SER ACEITÁVEIS (CALCÁRIOS, AREIAS, ETC.)

V - EMPREGADOS GERALMENTE NA FORMA DE COMPLEXO.

taxa de contagem e, a partir da mesma, pode-se calcular a atividade da amostra medida, sua concentração ou sua atividade específica.

Foram desenvolvidos muitos tipos de detetores, uns para usos gerais, outros para aplicações específicas e concretas. Limitaremos a descrever, de modo sucinto, o funcionamento de um cintilador, por ter sido este tipo de detetor utilizado em nosso trabalho.

O detetor de cintilação é o sistema mais usado para as medições de raios gama, pois sua sensibilidade é superior a dos detetores Geiger - Müller.

Na figura 1 está representado de forma esquemática um detetor de cintilação. Consta de um cristal, normalmente de NaI ativado com Tâlio, ligado opticamente a um tubo fotomultiplicador. Quando um raio gama incide sobre o cristal, que é o elemento sensível, produz nele uma faísca luminosa, por excitação dos átomos de sua rede cristalina. Esta faísca luminosa é "vista" pelo fotocátodo do tubo fotomultiplicador, que libera um determinado número de elétrons (efeito similar ao da célula fotoelétrica), que por ação de um campo elétrico presente, dirigem-se com velocidades elevadas até ao primeiro dinodo. Ao se chocarem contra o dinodo produzem novo feixe de elétrons de maior intensidade que o incidente. Este feixe dirige-se, em continuação, para o segundo dinodo, produzindo um efeito similar ao anterior. O processo de multiplicação do feixe de elétrons repete-se nos diferentes dinodos, e assim, no anodo coletor chega um fluxo muito intenso destas partículas. Quando este fluxo de elétrons, de intensidade i , passa através da resistência R , origina um pulso de tensão de valor iR , que dá origem a um impulso elétrico, registrado no equipamento eletrônico associado.

A duração de todo o processo é da ordem de 10^{-8} s ou menos, e por isso estes detetores podem funcionar corretamente, registrando taxas de contagem superiores a 10^6 impulsos por minuto.

As técnicas de medida mais frequentemente utilizadas em hidrologia, com detetores de radiação, estão ilustradas na figura 2. No caso da técnica A, o detetor encontra-se

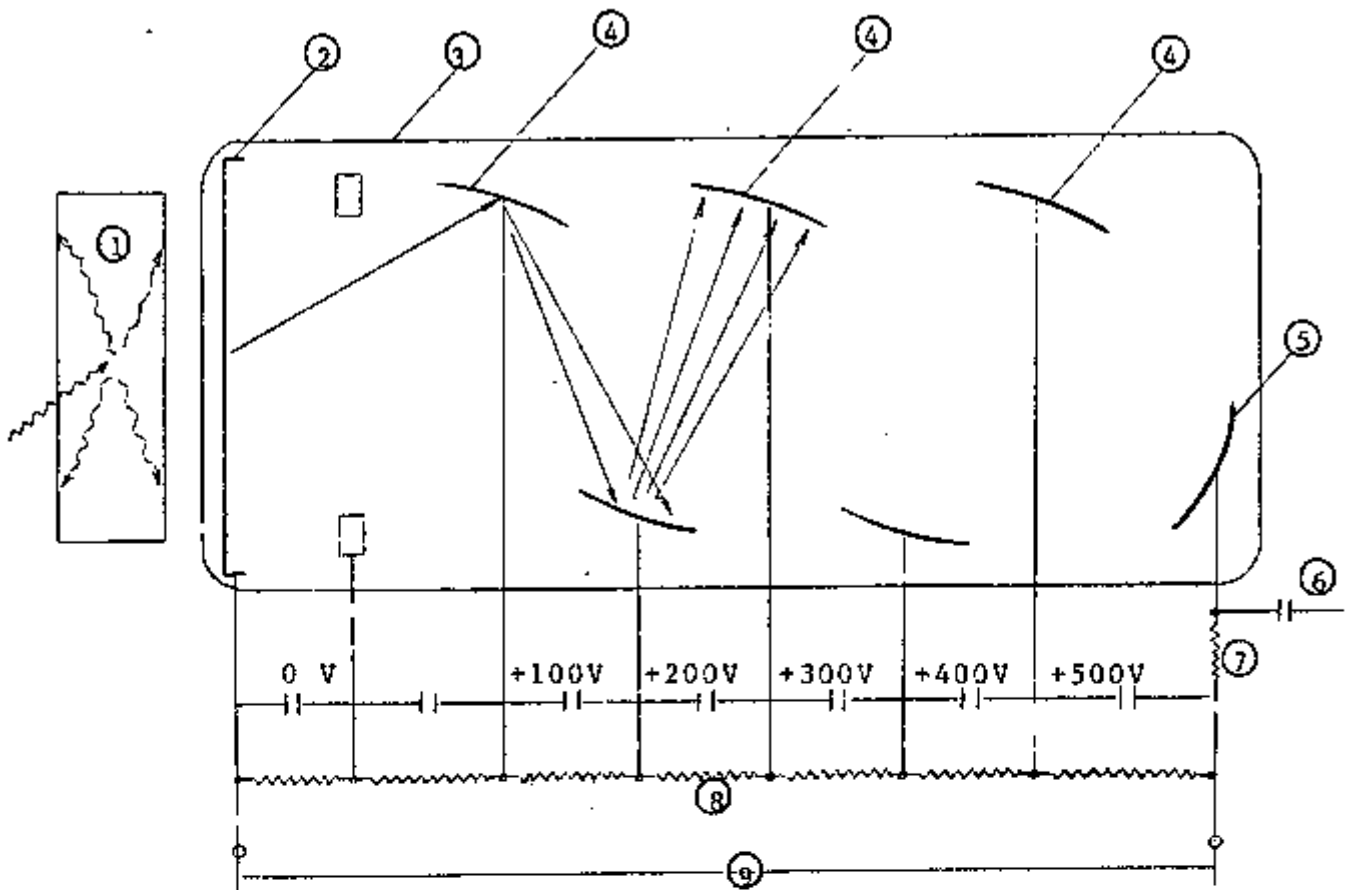
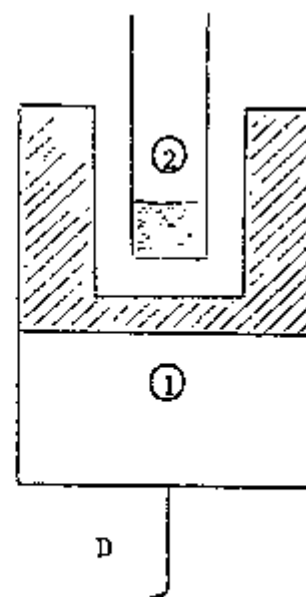
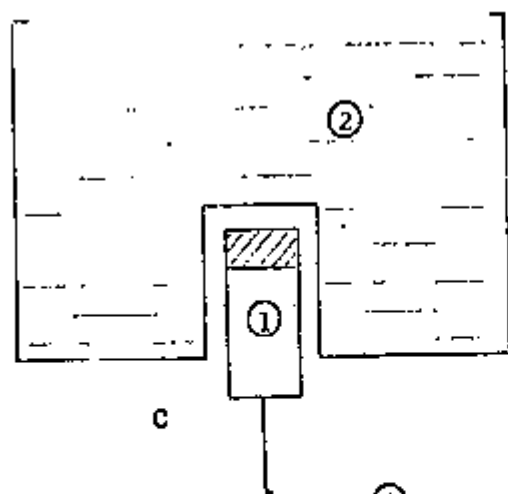
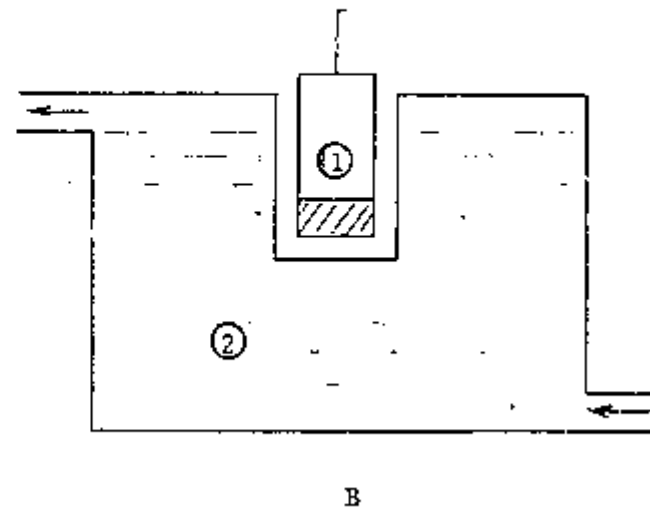
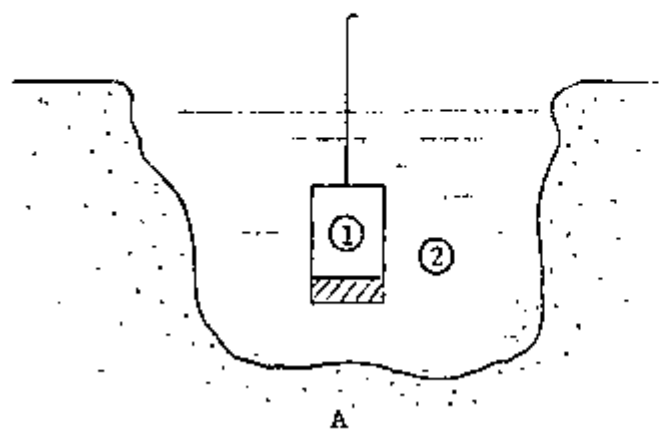


FIGURA 1 - Esquema de um cintilador.

- ① - cristal de NaI (TI)
- ② - fotocátodo
- ③ - tubo fotomultiplicador
- ④ - dinodos
- ⑤ - anodo
- ⑥ - saída dos impulsos
- ⑦ - resistência de carga R
- ⑧ - divisor de tensão
- ⑨ - voltagem aplicada

FIGURA 2 - Disposição geométrica das formas de medida utilizadas com detectores de cintilação para a medida de emissores gama



- ① - detector
- ② - amostra ou meio em medição

submerso na água. Se o volume de água que rodeia o detetor é suficientemente grande, e a concentração do traçador é uniforme, pode-se definir o chamado "volume infinito ou de saturação" como sendo o volume que contribui com 95% da resposta do detetor e como é lógico, seu raio aumenta com a energia dos raios gama. Para o ^{131}I é de aproximadamente 35 cm e para o ^{82}Br é da ordem de 80 cm. Com esta técnica de medida, o limite inferior de concentração de ^{131}I que pode ser medido, utilizando um detetor com cristal de NaI (TI) de 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura, é da ordem de $5 \cdot 10^{-4}$ Ci/litro. Isto significa que, em tais condições, 1Ci deste isótopo é suficiente para marcar $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de água. Para o ^{82}Br , estas cifras multiplicam-se por um fator, igual a 4 aproximadamente.

Nos casos B e C, o detetor encontra-se rodeado por um volume fixo de água, determinado pelas dimensões do recipiente de medida. Em B, a água é impulsionada ao recipiente por meio de uma bomba, obtendo-se um controle contínuo ou periódico da concentração do traçador. A técnica mostrada em C é utilizada para medidas descontínuas de amostras. Em ambos os casos, a sensibilidade ($\frac{\text{contagem}}{\text{minuto}} / \frac{\text{Ci}}{\text{litro}}$) aumenta com a ca

pacidade do recipiente, até alcançar um valor máximo correspondente à técnica A.

Na técnica D utiliza-se um detetor mergulhado no poço, isto é, em um orifício cilíndrico em cujo interior se introduz a amostra a medir. Esta disposição geométrica proporciona uma eficiência de medida muito elevada, pois a maior parte dos raios gama emitidos pela amostra incidem sobre a zona efetiva do detetor. Mas, o volume da amostra pode ficar limitado a 40 ou 50 cm^3 , segundo o tipo do detetor. Por isto, esta técnica é utilizada somente quando o traçador contido na água encontra-se em pequeno volume, por exemplo, mediante precipitação ou fixação em resinas de troca iônica. Ela é frequentemente empregada para medir o ^{131}I , por precipitação deste em forma de AgI em amostras de água, de até 50 litros. Utilizando-se detetor de cintilação e este procedimento, pode-se medir concentrações mínimas de $5 \cdot 10^{-5} \mu\text{Ci/Litro}$, signifi -

cando que 1Ci de ^{131}I é suficiente para marcar um volume de $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de água. Se levarmos em conta que o peso em iodo desta atividade é da ordem de 10^{-6} gramas, e que o volume da solução que o contém pode ser somente de vários mililitros, ficará compreendido o enorme fator de diluição que este tipo de marcação proporciona.

II.7 VANTAGENS E INCONVENIENTES NO USO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS

As vantagens dos traçadores radioativos frente aos inativos, podem ser resumidas nos seguintes pontos:

1. extraordinária sensibilidade de detecção, permitindo diluições da ordem de $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de água por Ci. Uma marcação similar com fluoresceína ou dicromato de potássio exige aproximadamente 500Kg destes produtos;

2. possibilidade de medida "in situ";

3. vida limitada do traçador, que pode ser escolhido de acordo com a duração prevista para a experiência. Esta vantagem tem um valor decisivo quando se trata de águas de renovação lenta (águas subterrâneas), que ficariam contaminadas durante longo tempo, se fosse empregado traçador não radioativo;

4. a medida seletiva, sem interferência de outros materiais contidos na água, radioativos ou não. Mediante espectrometria de raios gama pode se identificar o traçador de forma inequívoca, detetando-se apenas sua energia característica. Esta técnica permite o emprego simultâneo de dois ou mais traçadores com garantia de identificação e medida de cada um deles;

5. um mesmo traçador pode ser empregado em diversas formas químicas, sem que se modifique a sensibilidade da medida. Isto é muito importante, pois pode se conseguir que o tra

çador tenha um comportamento semelhante ao das moléculas de água.

Entre as desvantagens destes traçadores podemos citar:

1. No caso de isótopos de vida curta, eles tem que ser adquiridos e utilizados em datas fixas;
2. necessidade de autorização, para a aquisição e manipulação de materiais radioativos;
3. equipamento de medida mais custoso que o utilizado para traçadores não radioativos.

II.8 RISCOS DERIVADOS DO USO DE RADIOISÓTOPOS EM HIDROLOGIA

O homem, no decorrer do seu processo evolutivo sobre a Terra; sempre ficou exposto à radiação proveniente dos materiais radioativos naturais existentes na crosta terrestre, e à radiação cósmica procedente do espaço exterior. Estas radiações não demonstraram ser um perigo sério para a evolução e desenvolvimento da espécie humana. Com o advento da era nuclear, os riscos foram incrementados, com a utilização em grande escala de diversos tipos de fontes, tornando-se necessário estabelecer normas e regulamentos para que a radiação pudesse trazer reais benefícios à tecnologia.

A primeira manifestação das terríveis consequências que a energia nuclear poderia impôr para o futuro da humanidade deu origem a um estado psicológico de prevenção e, inclusive, de temor contra este novo desenvolvimento da física moderna, que afetou também as aplicações pacíficas. Porém este receio serviu de base para acelerar as investigações sobre a ação das radiações nos organismos vivos. As normas de proteção contra as radiações foram evoluindo, de acordo com os grandes avanços conseguidos no campo da Radiobiologia, fazendo com que a tecnologia nuclear se desenvolvesse em condições de segurança superiores à maioria dos setores tecnolôgi

cos restantes, como o demonstram as estatísticas de acidentes.

As normas e critério básicos de proteção contra as radiações encontram-se descritas nas recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica, organismo que constitui a máxima autoridade científica nesta matéria. Estas recomendações refletem-se, assim mesmo, nas normas de proteção ditadas por outras organizações internacionais e nas regulamentações dos distintos países. A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), com sede em Viena, fixou normas concretas para o uso de radioisótopos em hidrologia. A descrição pormenorizada das normas de proteção radiológicas vigentes não condiz com o espírito deste trabalho, e por isto limitaremos ao resumo suscinto de alguns conceitos básicos e a descrição geral dos riscos potenciais derivados de tais usos.

Os mecanismos dos efeitos biológicos das radiações têm sua origem nos fenômenos físicos de interação destas com a matéria. A energia das radiações é transferida aos elétrons do meio, provocando a ruptura dos enlaces químicos, alterando ou destruindo células. Os efeitos biológicos independem do tipo de radiação, mas sim, da quantidade total de energia absorvida pelos tecidos, da sua distribuição espacial e do tipo de órgão atingido. A periculosidade das distintas radiações depende apenas da dose absorvida pelo organismo e do seu poder de toxicidade. Levando-se em conta o poder de penetração das radiações, pode-se distinguir dois casos.

II.8.1. IRRADIAÇÃO EXTERNA

Neste caso, as radiações que agem sobre o organismo procedem de uma fonte exterior e alheia ao mesmo. As partículas alfa e beta, em virtude do pequeno poder de penetração, não apresenta riscos importantes de irradiação externa, exceto em casos isolados. A ação destas partículas limita-se à pele e às primeiras camadas do tecido subcutâneo, enquanto os

raios X e raios gama podem atingir os tecidos profundos do organismo.

Para medir a dose de radiação absorvida existem diferentes unidades, descritas a seguir:

1. Roentgen (R) é a medida da capacidade dos raios X e dos raios gama de ionizar o ar. É uma unidade de exposição. Um roentgen traduz a quantidade de radiação (raio X ou gama) capaz de produzir $2,58 \cdot 10^{-4}$ coulombs de carga elétrica por quilograma de ar seco, à temperatura e pressão normais (0°C é uma atmosfera de pressão). Um submúltiplo muito utilizado é o miliroentgen (mR), que equivale a uma milésima parte do roentgen;
2. Rad é a unidade que representa a energia absorvida por grama de material, e equivale a 100 ergs por grama, de qualquer material. Logo $1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/grama} = 0,01 \text{ Joules/quilograma}$. Frequentemente se utiliza o milirad (mrad), submúltiplo que é igual à milésima parte do rad ($1 \text{ mrad} = 0,001 \text{ rad}$).
3. Rem - do ponto de vista biológico, algumas radiações são mais eficazes que outras. Isso quer dizer que a mesma dose de radiação em rads, produzida por diferentes tipos de radiação, não provocam necessariamente os mesmos efeitos biológicos ou com a mesma intensidade. Por isso, na Radiobiologia, usa-se o Rem como unidade de dose equivalente. Com o objetivo de explicar o que se entende por Rem, é necessário introduzir o conceito de fator de qualidade de uma radiação. Este fator relaciona os efeitos das radiações com os dos raios gama provenientes do ^{60}Co , como exemplo consideremos o caso de neutrons rápidos. Para produzirem os mesmos efeitos biológicos que

os raios gama do ^{60}Co , necessita-se apenas 1/10 da dose fornecida pelos penetrantes raios gama. Diz-se então que o fator de qualidade dos neutrons rápidos é 10. O fator de qualidade para os raios X, raios gama, raios beta e elétrons é 1; para os neutrons lentos é 2,5; para os neutrons rápidos, prótons até 10 MeV e partículas alfa é 10. O Rem é definido como a dose absorvida em rads multiplicada pelo fator de qualidade da radiação, assim, $\text{Rem} = \text{rad} \cdot \text{FQ}$, onde FQ é o fator de qualidade.

As doses máximas permissíveis aceitas internacionalmente são diferentes segundo se trate de pessoas profissionalmente expostas a radiações e sujeitas por este motivo a controle médico periódico, ou de membros isolados da população ou ainda de grandes massas humanas.

Para o pessoal profissionalmente exposto, a dose máxima permitida por ano, é calculada pela expressão $D = 5(N-18)$, sendo N a idade do indivíduo expressa em anos. Presume-se que nenhuma pessoa deva começar a trabalhar com radiações antes da idade de dezoito anos. A dose anual indicada equivalente, aproximadamente, a 0,1 Rem por semana e a 0,5 milirem por hora. Sem dúvida, admite-se também que uma pessoa possa receber até 3 Rem em somente treze semanas ou, também, estes 3 Rem de uma só vez, sempre que a dose total anual não supere o valor de 5 Rem. Estas doses se referem aos casos de irradiação de todo o corpo ou das gônadas, órgãos hematopoiéticos e cristalino. Para outras zonas isoladas do corpo, as doses máximas permissíveis são superiores. Assim, para as mãos, antebraços, pés e tornozelos, é de 20 Rem por ano.

Para pessoas não expostas profissionalmente, que podem permanecer em zonas submetidas a irradiação, a dose máxima permissível anual é de 1,5 Rem para corpo inteiro, gônadas, órgãos hematopoiéticos e cristalino e de 7,5 Rem para as mãos e pés. Para membros da população, não submetidos a controle algum, estas doses se reduzem a 0,5 e 3 Rem, respectivamente.

Por ultimo, para efeitos de repercussões genéticas, considera-se que a população em geral não deve receber uma dose superior a 5 Rem durante um período de 30 anos (dose genética).

II.8.2 IRRADIAÇÃO INTERNA

Quando o material radioativo encontra-se no interior do organismo, o grau de periculosidade é inverso, isto é, o risco é maior para partículas alfa e menor para os raios gama. Isto pelo fato das partículas alfa dissiparem toda sua energia em poucos milímetros de percurso, enquanto que os raios gama perdem energia em percursos maiores, escapando frequentemente do interior do organismo. As partículas beta ocupam uma posição intermediária.

As regras de segurança em Radioproteção são bem distintas em ambos casos. Quando se trata de uma fonte externa, é fácil proteger-se contra as radiações emitidas utilizando-se blindagens adequadas, mantendo-se afastado das mesmas ou reduzindo o tempo de exposição. Ao contrário, quando o material radioativo é ingerido pelo organismo, nada se pode fazer para modificar a situação criada, senão esperar que a atividade do radioisótopo diminua por desintegração e por eliminação biológica.

Com relação à radiação interna, as normas de proteção determinam para os diferentes radioisótopos na água e ar, as concentrações máximas permissíveis que podem ser ingeridas pelas pessoas durante o período do ano. Estas grandezas, para os radioisótopos de uso mais freqüente em hidrologia são mostradas na tabela V. As atividades máximas que podem ser ingeridas por ano foram obtidas a partir das concentrações máximas permissíveis, tomando-se 800 litros como sendo o volume de água ingerido anualmente, por pessoa.

T A B E L A V

CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS PERMISSÍVEIS PARA RADIOISÓTOPOS DE INTERESSE HIDROLÓGICO EM ÁGUA E AR
E ATIVIDADE MÁXIMA QUE PODE SER INGERIDA OU INALADA DURANTE UM ANO.

ISÓTOPOS	ORGÃO CRÍTICO		CONCENTRAÇÃO MÁXIMA PERMISSÍVEL ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)		ATIVIDADE MÁXIMA ASSIMILADA POR ANO (μCi)	
			ÁGUA	AR	ÁGUA	AR
^3H	TODOS	SOL.	$*3 \times 10^{-3}$	$*2 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$
^{14}C	TODOS	SOL.	8×10^{-4}	10^{-7}	6×10^2	6×10^2
^{24}Na	INT. G. I.	INSOL.	3×10^{-5}	5×10^{-9}	$2,2 \times 10$	$3,6 \times 10$
	INT. G. S.	SOL.	2×10^{-4}	4×10^{-8}	$1,5 \times 10^2$	$3,1 \times 10^2$
^{32}P	OSSOS	SOL.	2×10^{-5}	2×10^{-9}	$1,5 \times 10$	$1,8 \times 10$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	2×10^{-5}	3×10^{-9}	$1,8 \times 10$	$2,0 \times 10$
^{35}S	GÔNADAS	SOL.	$*6 \times 10^{-5}$	$*9 \times 10^{-9}$	$5,0 \times 10$	$6,8 \times 10$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	3×10^{-4}	9×10^{-9}	$2,2 \times 10^{-2}$	$6,3 \times 10$
^{45}Sc	INT. G. I. FÍGADO	SOL.	4×10^{-5}	8×10^{-9}	$3,0 \times 10$	$6,1 \times 10$ $6,0 \times 10$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	4×10^{-5}	8×10^{-10}	$3,0 \times 10$	$6,0$
^{51}Cr	INT. G. I. TODOS	SOL.	2×10^{-3}	$*4 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^3$	$2,6 \times 10^3$ $2,7 \times 10^3$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	2×10^{-3}	8×10^{-8}	$1,2 \times 10^3$	$5,6 \times 10^2$
^{59}Fe	TODOS, BACO, SANGUE	SOL.	6×10^{-5}	5×10^{-9}	$5,7 \times 10$	$2,7 \times 10$
	PULMÃO, INT. G. I.	INSOL.	5×10^{-5}	2×10^{-9}	5×10	$1,7 \times 10$

CONTINUAÇÃO TABELA V

^{58}Co	TODOS, INT. G. I.	SOL.	10^{-4}	$*3 \times 10^{-8}$	$7,6 \times 10$	2×10^2
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	9×10^{-5}	2×10^{-9}	10^2	$1,7 \times 10$
^{60}Co	INT. G. I. TODOS	SOL.	5×10^{-5}	$* 10^{-8}$	$3,9 \times 10$	$8,0 \times 10$ $8,7 \times 10$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	3×10^{-5}	3×10^{-10}	$2,8 \times 10$	$2,2$
^{65}Zn	TODOS PRÓSTATA FÍGADO	SOL.	$* 10^{-4}$	$*4 \times 10^{-9}$	$7,9 \times 10$ $9,6 \times 10$ $1,0 \times 10^2$	$2,6 \times 10$ $3,2 \times 10$ —
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	2×10^{-4}	2×10^{-9}	$1,4 \times 10^2$	$1,5 \times 10$
^{82}Br	TODOS INT. G. S.	SOL.	3×10^{-4}	4×10^{-8}	$2,1 \times 10^2$ $2,2 \times 10^2$	$2,8 \times 10^2$ —
	INT. G. I.	INSOL.	4×10^{-5}	6×10^{-9}	$3,0 \times 10$	$4,7 \times 10$
^{86}Rb	TODOS PÂNCREAS FÍGADO	SOL.	$*7 \times 10^{-5}$	$* 10^{-8}$	$5,4 \times 10$ $5,4 \times 10$ —	$7,1 \times 10$ $7,1 \times 10$ $1,0 \times 10^2$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	2×10^{-5}	2×10^{-9}	$1,9 \times 10$	$1,7 \times 10$
^{85}Sr	TODOS	SOL.	$* 10^{-4}$	8×10^{-9}	$7,6 \times 10$	$5,8 \times 10$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	2×10^{-4}	4×10^{-9}	$1,4 \times 10^2$	$2,6 \times 10$
^{89}Sr	OSSO	SOL.	10^{-5}	10^{-9}	$7,6$	$8,5$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	3×10^{-5}	10^{-9}	$2,8 \times 10$	$8,5$

CONTINUAÇÃO TABELA V

^{90}Sr	OSSO	SOL.	$* 10^{-7}$	10^{-11}	$3,2 \times 10^{-1}$	$2,9 \times 10^{-1}$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	4×10^{-5}	2×10^{-10}	— $2,8 \times 10$	1,4 —
^{95}Zr	TODOS	SOL.	6×10^{-5}	$*4 \times 10^{-9}$	$5,7 \times 10$	$3,4 \times 10$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	6×10^{-5}	10^{-9}	$5,7 \times 10$	8,5
^{103}Ru	RIM	SOL.	8×10^{-5}	2×10^{-8}	6×10	$1,3 \times 10^2$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	8×10^{-5}	3×10^{-9}	6×10	$2,5 \times 10$
^{109}Cd	FÍGADO	SOL.	2×10^{-4}	2×10^{-9}	$1,5 \times 10^2$	$1,7 \times 10$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	2×10^{-4}	3×10^{-9}	$1,5 \times 10^2$	$2,5 \times 10$
^{110}Ag	RIM	SOL.	3×10^{-5}	7×10^{-9}	$2,8 \times 10$	6×10
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	3×10^{-5}	3×10^{-10}	$2,8 \times 10$	2,5
^{124}Sb	OSSO	SOL.	2×10^{-5}	5×10^{-9}	$1,7 \times 10$	$2,7 \times 10$
	INT. G. I.	INSOL.	2×10^{-5}	7×10^{-10}	$1,7 \times 10$	5,5
^{131}I	TIRÓIDES	SOL.	2×10^{-6}	3×10^{-10}	1,6	2,1
	INT. G. I. PULMÃO	INSOL.	6×10^{-5}	10^{-9}	$5,1 \times 10$ —	$8,0 \times 10$ $8,0 \times 10$

CONTINUAÇÃO TABELA V

^{137}Cs	TODOS FÍGADO BAÇO MÚSCULO	SOL.	$*2 \times 10^{-5}$	2×10^{-9}	$1,2 \times 10$ $1,4 \times 10$ $1,8 \times 10$ $1,9 \times 10$	$1,6 \times 10$ — — —
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	4×10^{-5}	5×10^{-10}	— $3,5 \times 10$	3,6 —
^{140}Ba	OSSO	SOL.	3×10^{-5}	4×10^{-9}	$2,8 \times 10$	$3,4 \times 10$
	INT. G. I.	INSOL.	2×10^{-5}	10^{-9}	$1,7 \times 10$	8,5
^{192}Ir	INT. G. I. RIM BAÇO	SOL.	4×10^{-5}	4×10^{-9}	$3,4 \times 10$	$3,4 \times 10$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	4×10^{-5}	9×10^{-10}	$3,4 \times 10$	7,8
^{198}Au	INT. G. I.	SOL.	5×10^{-5}	10^{-8}	$4,1 \times 10$	$8,0 \times 10$
	INT. G. I.	INSOL.	5×10^{-5}	8×10^{-9}	$3,7 \times 10$	$5,9 \times 10$
^{222}Rn	PULMÃO	—	—	10^{-8}	—	$6,5 \times 10$
^{226}Ra	OSSO	SOL.	10^{-8}	10^{-12}	$7,6 \times 10^{-3}$	$8,5 \times 10^{-3}$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	3×10^{-5}	6×10^{-9}	$2,8 \times 10$	5×10
^{232}Th	OSSO	SOL.	2×10^{-6}	7×10^{-14}	1,5	$5,5 \times 10^{-4}$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	4×10^{-5}	4×10^{-13}	$3,4 \times 10$	$3,4 \times 10^{-3}$

CONTINUAÇÃO TABELA V

^{238}U	OSSO	SOL.	4×10^{-5}	3×10^{-12}	$3,4 \times 10$	$2,5 \times 10^{-2}$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	4×10^{-5}	5×10^{-12}	$3,4 \times 10$	3×10^{-2}
^{239}Pu	OSSO	SOL.	5×10^{-6}	6×10^{-14}	5	5×10^{-14}
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	3×10^{-5}	10^{-12}	$2,8 \times 10$ 3,0	$8,5 \times 10^{-3}$
^{241}Am	RIM OSSO	SOL.	4×10^{-6}	2×10^{-13}	—	$1,5 \times 10^{-3}$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	3×10^{-5}	4×10^{-12}	$2,2 \times 10$	$2,6 \times 10^{-2}$
^{252}Cf	OSSO	SOL.	7×10^{-6}	2×10^{-13}	6	$1,7 \times 10^{-3}$
	PULMÃO INT. G. I.	INSOL.	7×10^{-6}	10^{-12}	6	$8,5 \times 10^{-3}$

OBSERVAÇÃO:- OS VALORES PRECEDIDOS DE ASTERISCO SÃO DADOS PARA TODO O CORPO E GÔNODAS.

ABREVIACÕES:- SOL. = RADIOISÓTOPOS DISSOLVIDOS EM ÁGUA.

INSOL. = RADIOISÓTOPOS EM FORMA NÃO SOLÚVEL FIXADO, POR EXEMPLO, NOS MATERIAIS SÓLIDOS TRANSPORTADOS PELA ÁGUA.

TODOS = TODO O CORPO.

INT.C.I. = INTISTINO GROSSO INFERIOR.

INT.C.S. = INTESTINO GROSSO SUPERIOR.

II.8.3 RISCOS POTENCIAIS DAS TÉCNICAS ISOTÓPICAS UTILIZADAS

Para uma orientação sobre os riscos potenciais das técnicas isotópicas utilizadas em hidrologia, vamos considerar três grupos:

1. Técnicas baseadas nos isótopos naturais do meio. O risco para estas técnicas é nulo, pois não se adiciona radioatividade alguma ao meio em estudo e porque os níveis de radioatividade existentes são extremamente baixos.
2. Técnicas baseadas no emprêgo de equipamentos portadores de fontes radioativas seladas. Por tratar-se de fontes seladas, o risco que estes equipamentos podem apresentar é somente de irradiação externa, pois a possibilidade de ingestão por membros da população é praticamente nula. Sendo maior o risco de contaminação externa para as pessoas que fazem uso dos equipamentos, elas podem tomar precauções oportunas em cada caso. Como os equipamentos são comercialmente acessíveis, os fabricantes devem dotá-los de meios de proteção exigidos pelas normas vigentes.
3. Técnicas baseadas no emprego de traçadores adicionados ao meio. Este tipo de técnica pode oferecer riscos, não somente para as pessoas que realizam o trabalho, mas também para a população em geral. Levando-se em conta o risco de irradiação externa da população em geral, ele será nulo, pois a atividade adicionada ao meio se distribui em um volume muito grande e as radiações emitidas, em sua maioria, ficam autoabsorvidas. Os profissionais que manuseiam os radioisótopos conhecem muito

bem as normas e por isto se protegem com o uso de recipientes de chumbo, manipulação à distância, contrôle do tempo de exposição, etc.

Vamos considerar as possibilidades de irradiação interna. Nos casos onde existem probabilidades do material radioativo injetado em determinado local, ser ingerido por membros da população, torna-se necessário que as concentrações dos radioisótopos adicionados ao meio não sejam superiores às máximas permissíveis. Deve-se também levar em conta que:

1. na maioria dos casos, utilizam-se traçadores radioativos de meia vida curta, e por isto o meio estudado fica isento de contaminação após um período relativamente pequeno. A meia vida do isótopo escolhido deve sempre ser compatível com a duração dos trabalhos. Assim, terminadas as medições, a concentração do traçador radioativo na água será tão pequena, que sua contaminação é considerada desprezível;
2. a elevada sensibilidade dos detetores de radiação disponíveis permite medir concentrações muito inferiores à concentração máxima permissível;
3. normalmente o traçador é incorporado em grandes volumes de água ou em sedimentos transportados pela mesma, com diluição e difusão turbulenta, que ocasionam redução progressiva da sua concentração. Na maioria dos casos, em tempo relativamente curto, a concentração do traçador injetado no meio alcança níveis bem inferiores aos máximos permissíveis;
4. as experiências realizadas com traçadores incorporados ao meio podem ser de tipo local, significando que o alcance da contaminação é limitado e facilmente controlável.

Como conclusão, devemos dizer que as normas de proteção contra as radiações regulam qualquer tipo de aplicação de materiais radioativos com finalidades hidrológicas. Trabalhando-se dentro destas normas, os riscos de perigo para a saúde do pessoal técnico e população em geral serão nulos.

CAPITULO III

MEDIDAS DE VAZÃO

III.1 MÉTODOS CONVENCIONAIS

As medições de vazão de fluidos, em engenharia e hidrologia, são realizadas com técnicas e instrumental de eficiência limitadas pelas características físicas e químicas dos fluidos, do tipo de conduto, canalização, leito e intervalo ou escala de medição.

Muitos projetos de investigação e processos industriais dependem das medidas de vazão, para a análise de dados. As vezes torna-se necessário boa precisão nas medidas, enquanto que em alguns casos tolera-se medidas menos precisas. A seleção dos instrumentos próprios para uma aplicação em particular, depende de vários fatores, entre eles o preço.

Dentre as diversas técnicas convencionais de medidas de vazão (volume do fluido que escoar por unidade de tempo), podemos citar:

1. medida direta

Consiste em verificar qual o tempo necessário para acumular determinado volume em um reservatório natural ou artificial, sem descarga de saída. A razão entre este volume e o tempo necessário para atingi-lo, determina a vazão de enchimento.

2. medida a partir do nível de água

Para se partir, simplesmente, do conhecimento do nível da água, usa-se um dos tipos de dispositivos seguintes:

- calhas medidoras - qualquer dispositivo que provoque a passagem do escoamento do fluido de um regime fluvial a um torrencial serve para

esse tipo de medida. A mudança de regime obriga a existência de profundidade crítica dentro da instalação. A vazão será função dessa profundidade e das características do medidor. Há a formação de um ressalto a jusante se o escoamento fôr fluvial em condições naturais. Como exemplo de instalações padronizadas deste tipo, pode-se citar a calha Parshall.

- vertedores - conhecendo-se a espessura da lâmina de água sobre um vertedor, pode-se determinar a descarga através de tabelas e gráficos, desde que se proceda, previamente, à calibração da instalação. Existem também vertedores padronizados que dispensam a calibração como o tipo Thompson e Scimeni.

As duas instalações causam um represamento a montante que corresponde ao consumo de uma vazão por acumulação e que não está sendo medida. Isto só deve ser levado em consideração quando representar uma quantidade apreciável frente às grandezas em jogo. Um vertedor tem a desvantagem de elevar mais o nível da água que a calha, sendo que esta permite mais facilmente, a passagem dos materiais arrastados pelo rio.

3. medidores de velocidade

Temos o tipo turbina ou molinete como por exemplo o Price, Woitman, etc. O número de rotações é proporcional à velocidade da corrente, ficando os resultados dependentes do estado mecânico dos mesmos. Os molinetes são aparelhos que permitem, desde que bem aferidos, o cálculo da velocidade, mediante a medida do tempo necessário para uma hélice ou concha girar certo número de rotações. Por meio de um sistema elétrico, o molinete envia um sinal luminoso ou sonoro ao operador em cada número de voltas realizadas (5, 10, 20 ou mais). Marca-se o tempo decorrido entre alguns toques para se obter o número de rotações por se

gundo (n). Cada molinete, quando aferido, recebe sua curva $V=an+b$, onde n tem o significado visto acima e a e b são constantes do aparelho, permitindo o cálculo da velocidade V (m/s) em cada ponto considerado. A precisão da medição depende do número de molinetes e da posição dos mesmos na seção de medição. Estes equipamentos também são afetados por redemoinhos, trocas de direção de corrente, etc. A velocidade do molinete é função de sua posição na seção, pois como se sabe, existe um gradiente vertical e outro horizontal de velocidades. A velocidade média está compreendida entre 0,2 e 0,8 da altura (zero para o nível superior e um para o fundo). Não obstante os inconvenientes mencionados, estes dois tipos de medidores são insubstituíveis, quando se deseja medições em forma contínua. Os medidores tipo Venturi, Pitot, etc., têm como base manômetros diferenciais que controlam a perda de carga ou pressão estática e dinâmica entre a entrada e a saída do cone redutor. São usados geralmente em tubulações.

4. medidores do nível da água

São os linímetros ou escalas verticais graduadas, dispostas de tal forma que uma parte da mesma esta permanentemente imersa na água. Estes equipamentos, colocados geralmente nas estações de medição de vazão, podem estar equipados com registradores gráficos ligados a flutuadores. Neste caso a vazão depende da seção transversal, e das características topográficas do talvegue, a montante e a jusante das estações de medição. Nestas condições a vazão é função de:

$$Q = f (h, t, S), \quad \text{onde}$$

Q é a vazão

h é a altura medida sobre o linímetro

t é um fator de correção (função do talvegue a montante e jusante da estação de medição)

S é a seção do rio ou estação de medição

5. medidas com traçadores químicos

De modo geral a técnica consiste em injetar certa quantidade de traçador em um ponto da corrente e medir sua concentração em estações à jusante. Entre esse traçadores temos os considerados químicos incolores (cloreto de sódio, fenóis, ácido bórico, detergentes, etc.) e os colorantes (fluoresceína, dicromato de potássio, rodamina B, eosina, roxo do Congo, azul de metileno, anilina, etc.). Todos eles tem inconvenientes quando usados para medir grandes vazões, ou .. meios contaminados com substâncias poluentes. Por exemplo, para medições da ordem de $1\text{m}^3/\text{s}$ com dicromato, deve-se injetar quantidade não inferior a 1 Kg deste material. Para vazões superiores a $50\text{m}^3/\text{s}$, torna-se necessário injetar grandes quantidades de dicromato, o que é desvantajoso. O mesmo ocorre com os traçadores convencionais não colorimétricos.

III.2 DISTÂNCIA MÍNIMA DE HOMOGENEIZAÇÃO

As partículas marcadas com um traçador ideal obedecem às mesmas leis de movimento que as partículas não marcadas. A este enfoque do problema deve se acrescentar o fato de não haver perdas por absorção físico-química, troca iônica, etc.

Desde o instante em que o traçador é injetado no meio estudado, ele deve participar da dinâmica do sistema. Fenômenos de difusão molecular e turbulenta contribuem para dis

persã-lo quando, em forma de solução, é injetado em meio aquoso. Nestas condições durante um período relativamente curto, estabelece-se um regime transitório, responsável por grandes variações de concentração. Depois de homogeneizado com o meio aquoso, a concentração do traçador deve ser constante em cada ponto ao longo do tempo. Começa então um regime permanente, em que a concentração é independente das condições em que o traçador foi injetado. (Figura 3)

O traçador homogeneiza-se mais facilmente com o fluido no sentido longitudinal do escoamento e em profundidade, do que no sentido lateral. Este fato é que praticamente determina, na maioria dos casos, a distância mínima de homogeneização do traçador com o meio aquoso.

Estas condições são válidas, se durante o período que compreende o tempo transcorrido entre a injeção do traçador e sua passagem pelo ponto de medição, o regime de fluxo for constante ou estacionário. Quando a velocidade for função apenas do ponto, o regime é permanente, e se no mesmo ponto variar com o tempo o movimento deixa de ser permanente.

A distância de homogeneização depende de vários fatores, entre eles:

1. da velocidade do fluido e por conseguinte do tipo de movimento, laminar ou turbulento. O movimento turbulento facilita a homogeneização. (figura 4). Passa-se do regime laminar ao regime turbulento quando o movimento do meio estudado ultrapassar a velocidade crítica superior. Ao contrário, passa-se do regime turbulento ao laminar, quando se atinge a velocidade crítica inferior. O regime entre estas duas velocidades limites é laminar instável ou turbulento instável.

- em canais ou tubulações - Considerando-se o número de Reynolds (Re) definido pela equação

$$Re = V_m d \rho / \mu \quad , \quad \text{onde} \quad (5)$$

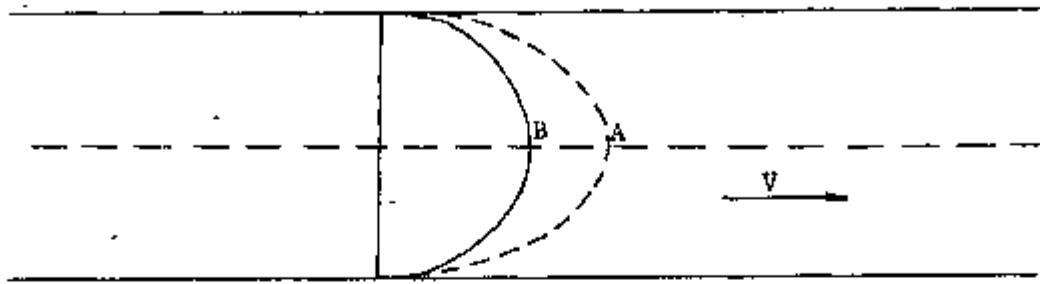


FIGURA 3 - Diagrama de velocidades com vazão constante em regime laminar (A) e turbulento (B).

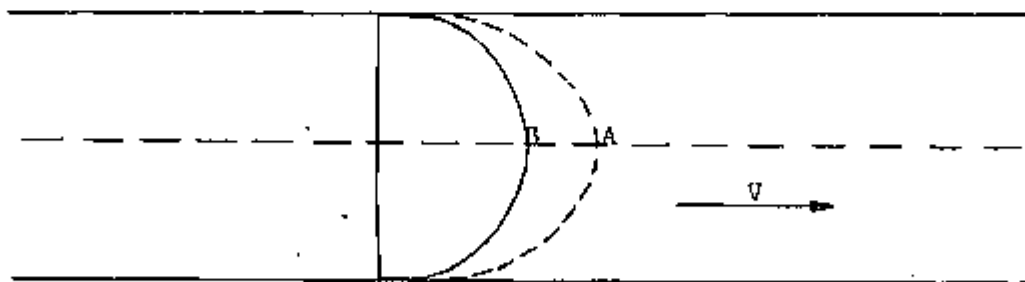


FIGURA 4- Diagrama de velocidades com vazão constante em superfície lisa (A) e rugosa (B).

V_m é a velocidade média
 μ é a viscosidade dinâmica (g/cm.s)
 ρ é a densidade (g/cm³)
 d é o diâmetro da tubulação (cm),

temos que para $Re < 1000$ o movimento é laminar estável, para $Re > 1000$ o movimento é turbulento instável. Como limite frequente sintetiza-se $Re = 2000$.

- em rios - Pode-se escolher um critério similar.
- em águas subterrâneas - O limite superior de validade das expressões que definem as velocidades do fluido em meios porosos está definido, para $1 < Re < 10$, ainda que se tenha encontrado, também, movimento laminar para $1 < Re < 700$, utilizando-se

$$Re = \frac{V_m \rho d}{\mu}, \text{ onde} \quad (6)$$

d é o diâmetro das partículas.

2. da rugosidade das paredes, superfície do leito no caso de rios, granulometria ou natureza do meio em águas subterrâneas, etc. Na prática utilizam-se as seguintes expressões para fixar as distâncias mínimas de homogeneização:

- em tubulações ou condutos sob pressão (com injeção no centro do conduto)

$$L_{\text{mín}} > 75d \quad (7)$$

Quando as instalações permitirem é conveniente acrescentar um fator de segurança, particularmente nos casos em que a velocidade média é pequena, tendendo para o movimento laminar.

- em canais ou rios - Existem várias fórmulas em

píricas e entre elas podemos citar:

Fórmula de CREC

$$L_{\min} > 9,5 \cdot nh = 9,5 \cdot 0,32 \cdot K \cdot R^{1/6} \cdot h = 3 \cdot h \cdot K \cdot R^{1/6} \quad (8)$$

Fórmula de RIMMAR

$$L_{\min} > 0,13 \cdot N \cdot b^2/h, \text{ sendo } N = C \cdot (0,7C+6)/g \quad (9)$$

Fórmula de HULL

$$L_{\min} = a \cdot Q^{1/3} \quad (10)$$

onde:

L_{\min} é a distância mínima de homogeneização

d é o diâmetro da tubulação (m)

h é a altura de água (m)

K é o coeficiente de rugosidade de Strickler

R é o raio hidráulico

n é a relação entre a velocidade média e a velocidade de flotação

b é a largura média da seção de medição (m)

c é o coeficiente de Chézy (15 ~~20~~)

g é a aceleração da gravidade (m/s^2)

Q é a vazão estimada (m^3/s)

a é um coeficiente igual a 50 com injeção central e igual a 200 com injeção lateral do traçador.

III.3 VERIFICAÇÃO DA HOMOGENEIZAÇÃO (LATERAL)

As expressões anteriores foram calculadas ou verificadas para um grau de homogeneização inferior a 1%. Significa que se tomarmos simultaneamente três amostras, sendo duas la-

terais (margem esquerda e margem direita) e uma central, o grau de homogeneização G (%) será definido por:

$$G (\%) = \frac{1 - \frac{(N_e - N_m) + (N_c - N_m) + (N_d - N_m)}{3N_m}}{3} , \text{ onde (11)}$$

N_e é a contagem total da amostra, tomada na margem esquerda

N_d é a contagem total da amostra, tomada na margem direita

N_c é a contagem total da amostra, tomada no centro do caudal

N_m é a contagem média, ou seja $N_m = \frac{N_e + N_d + N_c}{3}$

O valor de G deve ser inferior a 1% para se alcançar a homogeneização acima referida.

III.4 TEMPO DE PASSAGEM DA "ONDA RADIOATIVA"

Quando se realiza injeção instantânea (figura 5) em um conduto ou canal, deve transcorrer um tempo T para que 99,9% da atividade injetada passe por uma seção distante x metros do ponto de lançamento. O valor de T pode ser calculado pela equação

$$T (s) = 9,3 \sqrt{\frac{m x}{n V_m^2}} , \text{ onde (12)}$$

m é o coeficiente adimensional de dispersão longitudinal (7,3 para canais e 10,1 para condutos sob pressão)

V_m é a velocidade média (m/s)

Em rios é difícil prever este tempo, pois necessita-se conhecer os coeficientes médios de dispersão turbulenta longitudinal. É prudente começar as medições imediatamente após o lançamento do traçador e terminar a operação quando a atividade natural de fundo for restabelecida, isto é, nas

atividade específica
ou concentração

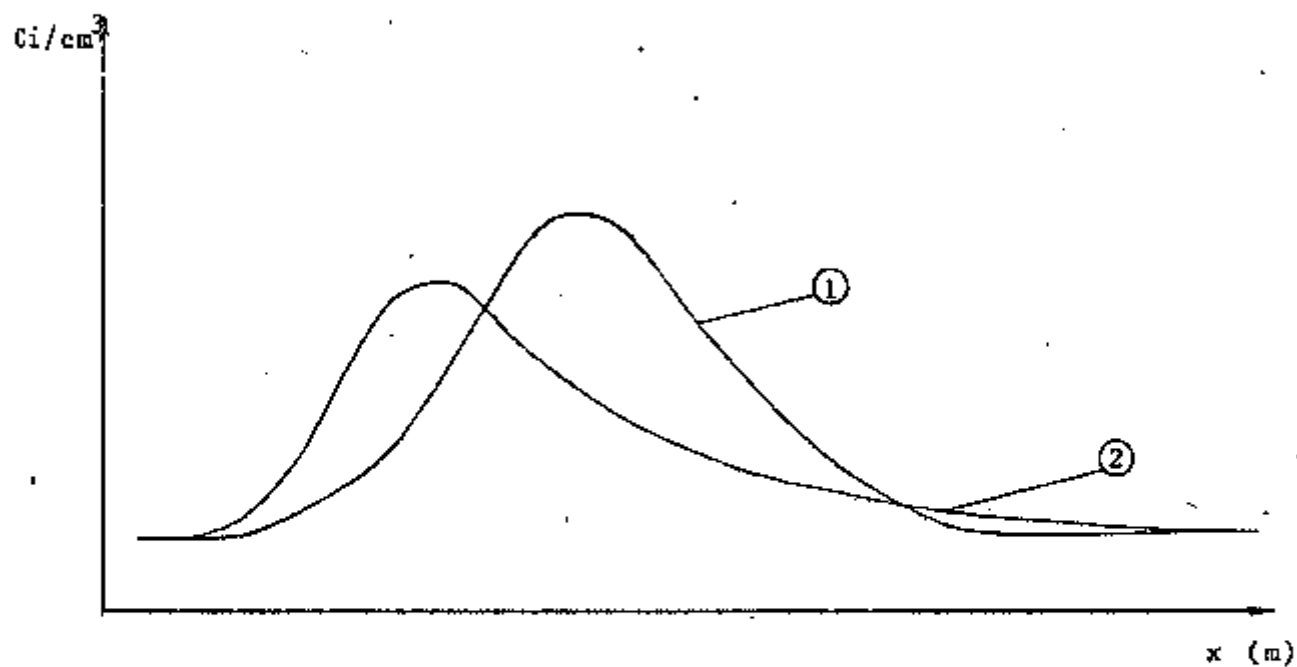


FIGURA 5 - Concentração do traçador em uma seção qualquer, à jusante do ponto de injeção, com injeção instantânea.

① - movimento turbulento

② - movimento laminar

mesmas condições que existiam antes da injeção (figura 6).

III.5 MÉTODOS RADIOISOTÓPICOS

III.5.1 MÉTODO DOS DOIS PICOS

Este método, só é aplicável em condutos de seção ou perímetro molhado conhecido. Consiste em injetar o traçador, em forma instantânea e puntiforme, em uma seção do conduto, e medir sua passagem a jusante, com dois detetores, que podem estar submersos ou nas imediações da tubulação ou leito (figura 7).

Para reduzir o erro, é conveniente que a distância entre o ponto de injeção e o primeiro detetor seja superior à distância mínima de homogeneização. A distância entre os detetores deve ser superior à distância de interferência dos dois picos, que é função da dispersão longitudinal do traçador (figura 8).

A vazão Q (m^3/s) de acordo com a definição é dada por:

$$Q = \iint_S V_d S = V_m S, \quad \text{onde} \quad (13)$$

V é a velocidade instantânea

S é a seção de medição

Quando a distância entre detetores (Δl) for constante, a velocidade média V_m é calculada por

$$V_m = \frac{\Delta l}{n} \sum_i \left(\frac{1}{\Delta t} \right)_i = \Delta l \left(\frac{1}{\Delta t} \right)_m, \quad \text{onde} \quad (14)$$

n é o número de partículas em movimento.

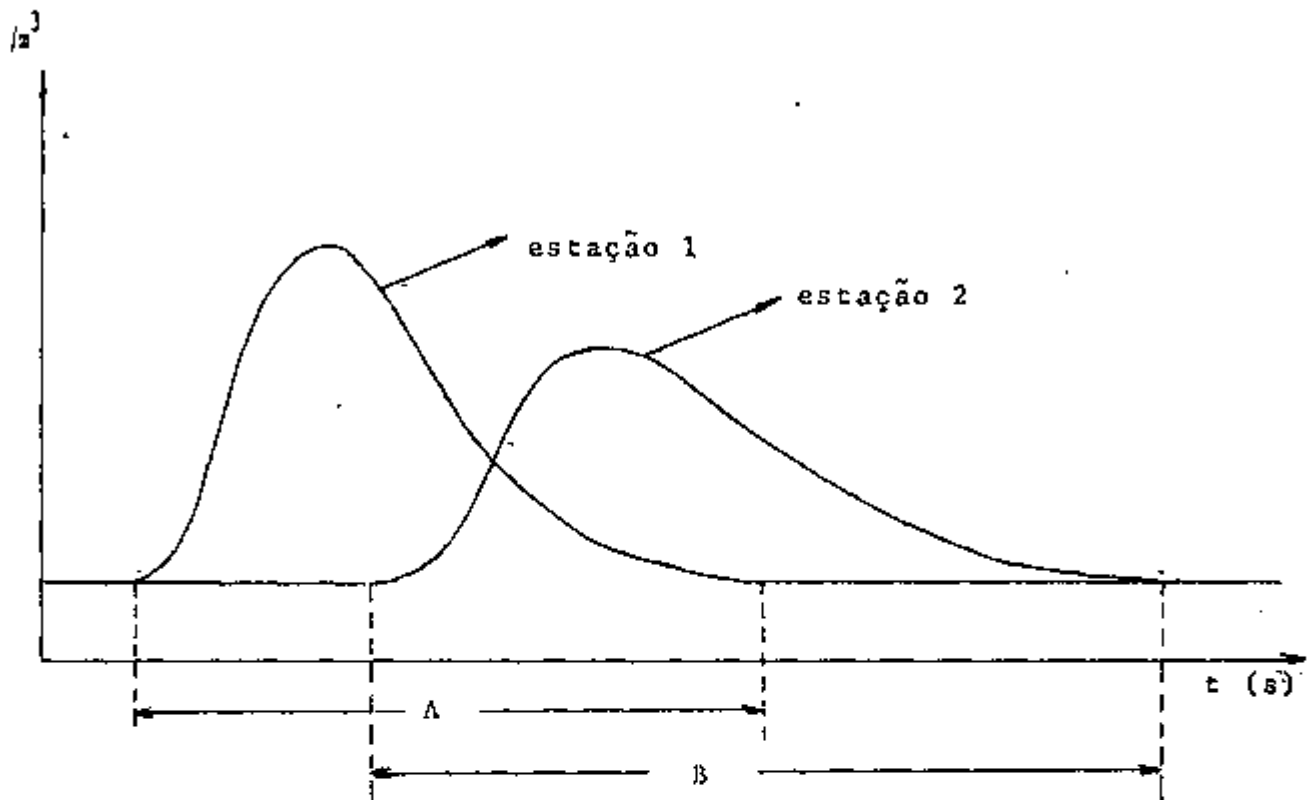


FIGURA 6 - Intervalo de tempo necessário para a medição de toda a onda radioativa, sendo A o intervalo necessário para a medição na estação 1 (mais próxima ao ponto de injeção da solução traçadora) e B o intervalo necessário para a estação 2, situada à jusante da anterior

Observa-se pela figura 9 que a velocidade do centro de gravidade da nuvem radioativa (V_g), é representada pela relação entre a vazão medida (Q medida) e a seção (S):

$$Q \text{ medido} = V_g S = \Delta l \left(\frac{1}{\Delta t_m} \right) S \quad (15)$$

Por outro lado, a vazão medida será igual à vazão real quando

$$V_g = V_m \therefore \frac{1}{\Delta t_m} = \frac{1}{\Delta t} \quad (16)$$

Quando o movimento for turbulento pode-se dizer que, a velocidade do centro de gravidade da "nuvem radioativa" é praticamente igual à velocidade média das partículas:

$$V_g = V_m; 1 < V_g/V_m < 1,05 \quad (17)$$

A medida que o movimento se aproxima do regime laminar, ou que a dispersão longitudinal aumenta, a relação anterior também aumenta.

O método deve ser aplicado nas seguintes condições:

- a vazão não deve variar durante o período de medição, isto é, entre a injeção e a passagem do traçador pelo segundo detetor;
- a seção deve ser constante entre os dois pontos de detecção da radiação;
- a radiação natural de fundo (background) não deve variar durante o período de medição;
- não houver ganho ou perda de vazão entre as seções de medição.

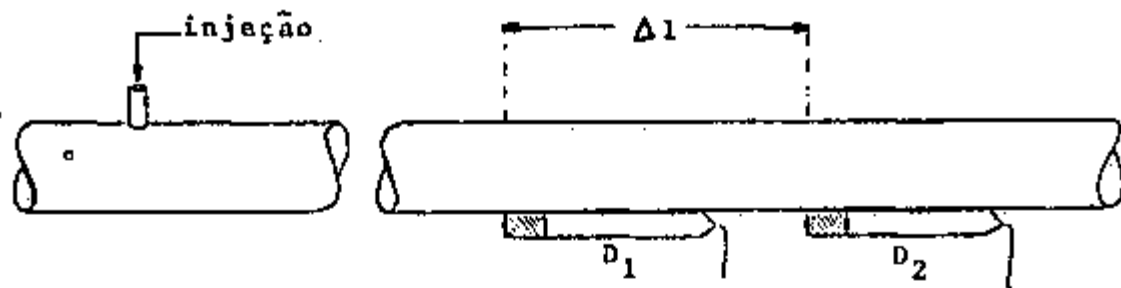


FIGURA 7 - Disposição dos detetores (D_1 e D_2) no local de medição para cálculo da vazão pelo método dos Dois Picos.

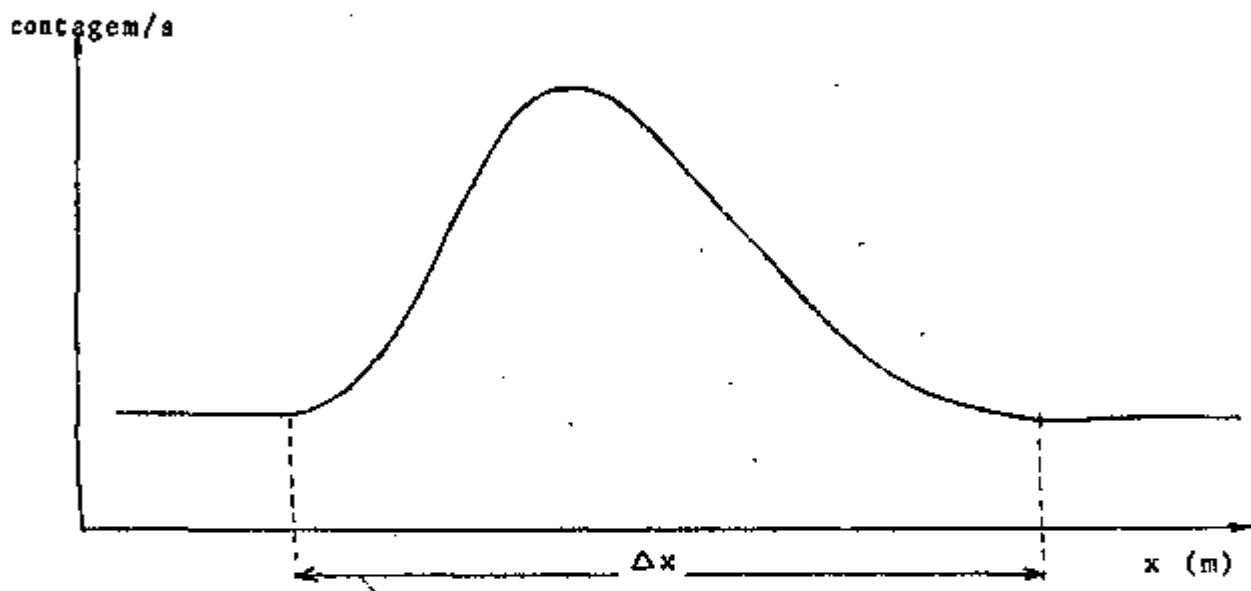


FIGURA 8 - Dispersão longitudinal da nuvem radioativa (Δx).

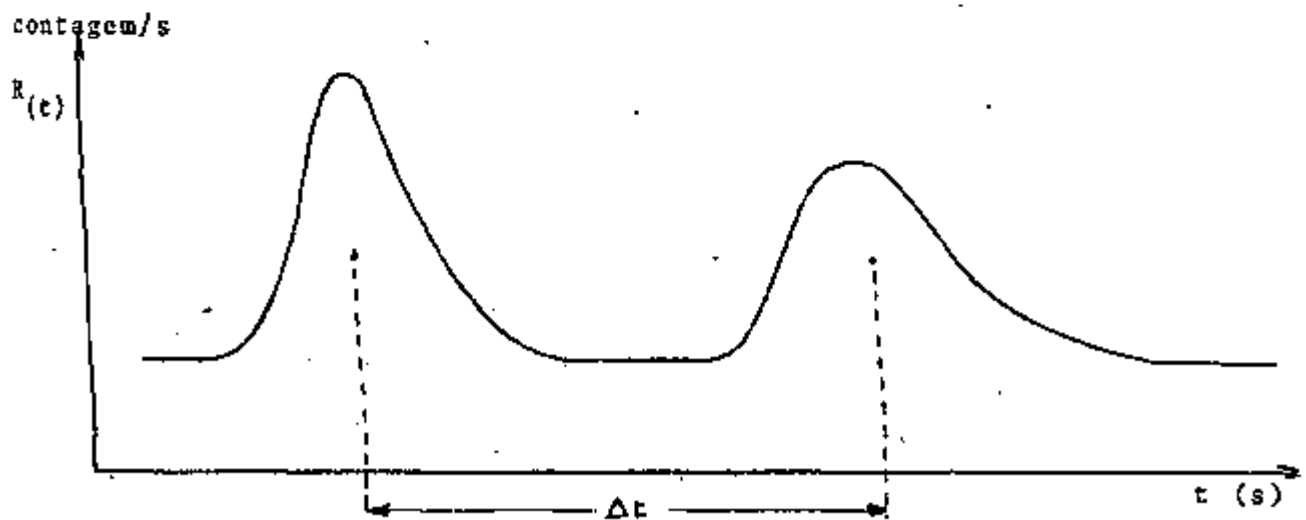


FIGURA 9 - Tempo decorrido entre os baricentros das curvas para cálculo da vazão utilizando o método dos Dois Picos.

O melhor instrumental para medir vazões com este método consta de dois detetores, fontes de tensão, integrador e registrador gráfico.

Em virtude do cálculo do tempo de medição entre os baricentros das duas curvas registradas graficamente, com base na distância existente entre eles, é aconselhável verificar se a velocidade nominal do registrador corresponde à real.

$$Q_{\text{medido}} = V_g S = \Delta l \left(\frac{1}{\Delta t_g} \right) S \quad (18)$$

A velocidade do papel do registrador é dada por

$$\begin{aligned} l &= v \times t \\ v &= \frac{l}{t} \quad t = \frac{l}{v} \\ V_{\text{papel}} &= \Delta t_g / \Delta l_g \therefore \Delta t_g = \Delta l_g / V_{\text{papel}} \quad (19) \end{aligned}$$

substituindo (19) em (18), temos:

$$Q_{\text{medido}} \text{ (m}^3/\text{s)} = \frac{\Delta l}{\Delta l_g / V_{\text{papel}}} S, \text{ onde} \quad (20)$$

Δl é a distância entre os detetores (m)

Δl_g é a distância entre os baricentros das curvas no papel registrador gráfico (cm).

V_{papel} é a velocidade do papel registrador gráfico (cm/s).

S é a seção da tubulação entre os pontos de medição (m²).

Entre as técnicas radioisotópicas este método é considerado pouco preciso porque, o que realmente medimos é a velocidade e não vazão.

III.5.2 MÉTODO DA CONTAGEM TOTAL

Este método foi desenvolvido por D. E. Hull (1957), e seu uso já foi adaptado para medições de vazão de gases ou líquidos em tubulações, canalizações e rios. Ele é particularmente útil na medição de vazão de rios turbulentos ou com grandes caudais, já que a atividade injetada em cada medição é relativamente pequena.

A técnica consiste em um lançamento instantâneo e puntiforme de traçador radioativo com atividade conhecida. Em uma seção, a jusante da de lançamento mede-se a variação da concentração do traçador, durante sua passagem pela seção de detecção (figura 10).

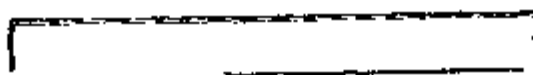
Sendo a vazão Q constante (regime permanente), a concentração na seção de medição varia somente em função do tempo de passagem da nuvem radioativa.

As vantagens deste método em relação ao método dos "Dois Picos" são:

1. não se necessita conhecer a seção do escoamento a medir;
2. a aparelhagem de medição é mais simples;
3. mede-se realmente a vazão e não velocidade.

Admitindo-se que as respostas do detetor R_t (contagem/s), é linear com respeito à concentração C_t ($\mu\text{Ci}/\text{m}^3$), tem-se:

$$R_t \text{ (contagem/s)} = F \left(\frac{\text{contagem/s}}{\mu \text{ Ci/m}^3} \right) C_t \text{ (}\mu\text{Ci/m}^3\text{)} \quad (21)$$



A contagem total na seção de medição durante a passagem da nuvem radioativa será (figura 10)

$$N = \int_{t(a)}^{t(b)} R_t dt \therefore N = F \int_{t(a)}^{t(b)} C_t dt \quad (22)$$

onde N é a contagem total da radioatividade entre os instantes $t(a)$ e $t(b)$.

O valor $F \frac{(\text{contagem/s})}{\text{Ci/m}^3}$ é denominado constante

de calibração e, como será visto, depende das características do detetor, geometria de detecção e radioisótopo utilizado.

Por definição a vazão Q (m^3/s) constante durante a experiência, é definida por:

$$Q = dv/dt \therefore dt = dv/Q \quad (23)$$

Substituindo (23) em (22)

$$N = F/Q \cdot \int_{t(a)}^{t(b)} C_{(t)} dV \quad (24)$$

A integral da expressão (24) é a atividade A (μCi), injetada no escoamento

$$\int_{t(a)}^{t(b)} C_{(t)} dV = A \quad (25)$$

onde dV é o volume elementar do meio homogêneo e isotrópico marcado, que é exposto ao detetor.

A contagem total registrada entre $t(a)$ e $t(b)$ é

representada por:

$$N = F.A/Q \quad ; \quad Q = FA/N \quad (26)$$

Este desenvolvimento só é válido se:

1. a atividade A injetada chegar ao ponto de medição sem perdas no caminho, por absorção, troca iônica, etc.;
2. a concentração $C(t)$ (atividade por unidade de volume) em um instante dado, for a mesma em qualquer ponto da seção de medição. Se a distância entre o ponto de injeção e o de medição superar a distância mínima de homogeneização, a condição

$$\int_{t(a)}^{t(b)} C(t) dt = \text{constante}$$

será cumprida;

3. a constante F for determinada nas mesmas condições das medições "in situ";
4. a constante F e a medição de vazão são determinadas em um intervalo onde é linear a resposta do detetor $R(t)$, com respeito a concentração $C(t)$;
5. a radiação natural de fundo (background) no ponto de detecção não variar durante o período de medição;

6. a meia vida do radioisótopo for compatível com o tempo gasto na experiência. Quando é usado isótopo de meia vida curta, a contagem obtida deve ser corrigida para o mesmo instante em que se medir o fator de calibração;
7. o tempo ou intervalo de contagem ($t_{(a)} - t_{(b)}$) for superior ao tempo de passagem da nuvem radioativa.

O valor de N , na equação (26), refere-se à contagem líquida, ou seja, só considera a radioatividade proveniente da nuvem radioativa. Significa que da contagem total deve se subtrair a contagem proveniente da radiação natural de fundo N_F , acumulada durante o tempo de medição.

O método também é válido para qualquer tipo de indicador, bastando para isto substituímos na equação (25) a atividade A pela massa M do novo traçador e a concentração $C(t)$ referir-se a esta massa. Portanto

$$M = \int_{t(a)}^{t(b)} C(t) \, dV \therefore \int_{t(a)}^{t(b)} C(t) \, Q \, dt = Q \int_{t(a)}^{t(b)} C(t) \, dt$$

$$Q = M / \int_{t(a)}^{t(b)} C(t) \, dt \quad (27)$$

III.5.2.1 VARIANTES DO MÉTODO

O método da Contagem Total é indicado para medir perdas de diversos fluidos e sólidos. A detecção da atividade pode ser contínua (sonda submersa, semisubmersa ou encostada nas tubulações) ou descontínua, por extração de amostras periodicamente.

Quando a altura d'água na seção de medição é inferior a $7 X'_{1/2}$, nos casos em que o rio arrasta pedras ou seixos ou ainda se o regime for de altíssima turbulência é aconselhável não introduzir o detetor no escoamento. Nestas condições extrai-se durante o período de medição, uma vazão Q' constante, fazendo-a passar por um recipiente "ad-hoc", no centro do qual se coloca o detetor. Neste caso, a constante de calibração deve ser determinada no mesmo recipiente, para que a geometria seja idêntica.

Quando a medição se realiza com extração periódica de amostras, deve-se levar em conta que

$$Q = \frac{A}{\int_{t(a)}^{t(b)} C dt} = \frac{A}{C_m \cdot (t(a) - t(b))} \quad (28)$$

Este método permite calcular a concentração durante um período maior ou igual a $(t(a) - t(b))$, e assim melhorar a estatística de contagem.

Guizerix e outros (1962) preconizaram o uso de uma variante deste método de amostragem, que consiste em recolher da corrente principal uma vazão constante Q' , e armazená-la em um recipiente para depois medir a concentração média.

$$Q / Q' = A / a \quad e \quad a / A_c = N / n_c \cdot t \quad (29)$$

onde

Q' é a vazão constante desviada para o recipiente - de medição (m^3/s)

A é a atividade desviada da corrente principal (μCi) e armazenada no recipiente.

A_c é a atividade usada na calibração (μCi)

n_c é a atividade medida na calibração (contagem/s)

t é o tempo de contagem da atividade recolhida no rio (s)

A vazão é calculada a partir da equação

$$Q = Q'A/a \quad (30)$$

ou substituindo (29) em (30), temos

$$Q = \frac{A \cdot n_c \cdot Q' t}{A_c \cdot N} \quad (31)$$

A atividade A a ser injetada é calculada pela equação (30).

Fixa-se, a priori, o valor Q' em função do tempo estimado de passagem da onda radioativa, ou por cálculo de acordo com a equação (31).

Fixando-se o volume do recipiente em 18 litros, tem-se:

$$Q' = 18 / t_{(a)} - t_{(b)} \quad (\text{litros/s}) \quad (32)$$

Escolhe-se este volume de 18 litros levando-se em conta transporte, portabilidade aos lugares de medição, etc. Sem dúvida, um volume ótimo para emissores gama de alta energia deve ser consideravelmente maior se quisermos medir

com volume "infinito".

Estes métodos de amostragem contínuos ou descontínuos tem a vantagem de permitir uma contagem total N , tal que o erro estatístico fique reduzido a uma expressão mínima. Por outro lado, pode-se tomar amostras em uma margem ou no centro da corrente principal permitindo reduzir o erro ou comprovar a homogeneização do traçador com o meio estudado.

Este método é recomendável para medição de vazão utilizando o trítio como traçador.

III.5.2.2 SISTEMAS DE INJEÇÃO

Pode se utilizar qualquer dispositivo que permita injetar a solução traçadora preferencialmente no centro da canalização, rio ou tubulação em tempo relativamente curto.

III.5.2.3 CORRENTES DIVERGENTES

A medição de vazão Q de uma canalização, rio ou tubulação pode ser feita em efluente ou subsidiário, sempre que a distância entre o ponto de injeção e o ponto de divergência seja superior à distância mínima de homogeneização (figura 11).

Se o subsidiário leva a fração xQ do caudal principal Q , também levará uma fração xA da atividade injetada, e por isso tem-se

$$N = xA.F/xQ = A.F/Q \quad (33)$$

Significa que se pode medir a vazão no efluente do principal, desde que seja cumprida a condição de homogeneidade antes da divergência.

Esta vantagem do método pode ser útil nos casos de canalizações principais inacessíveis ou rios com margens de difícil acesso.

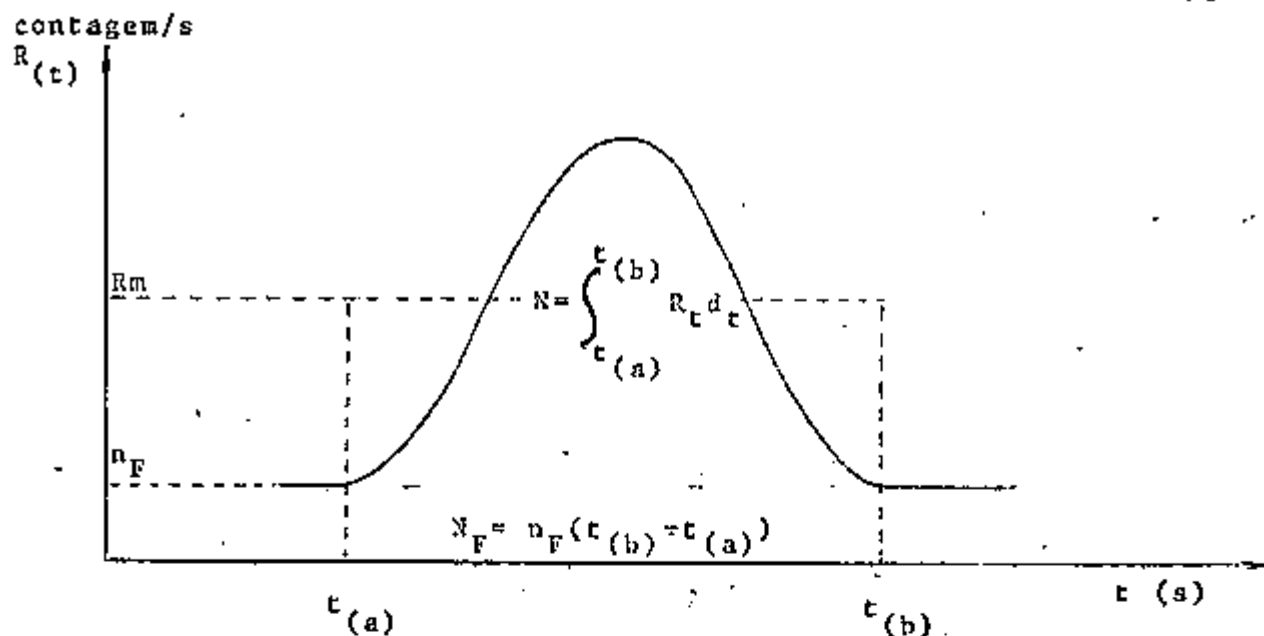


FIGURA 10 - Representação da curva de variação da concentração do traçador radioativo, em função do tempo no método da Contagem Total.

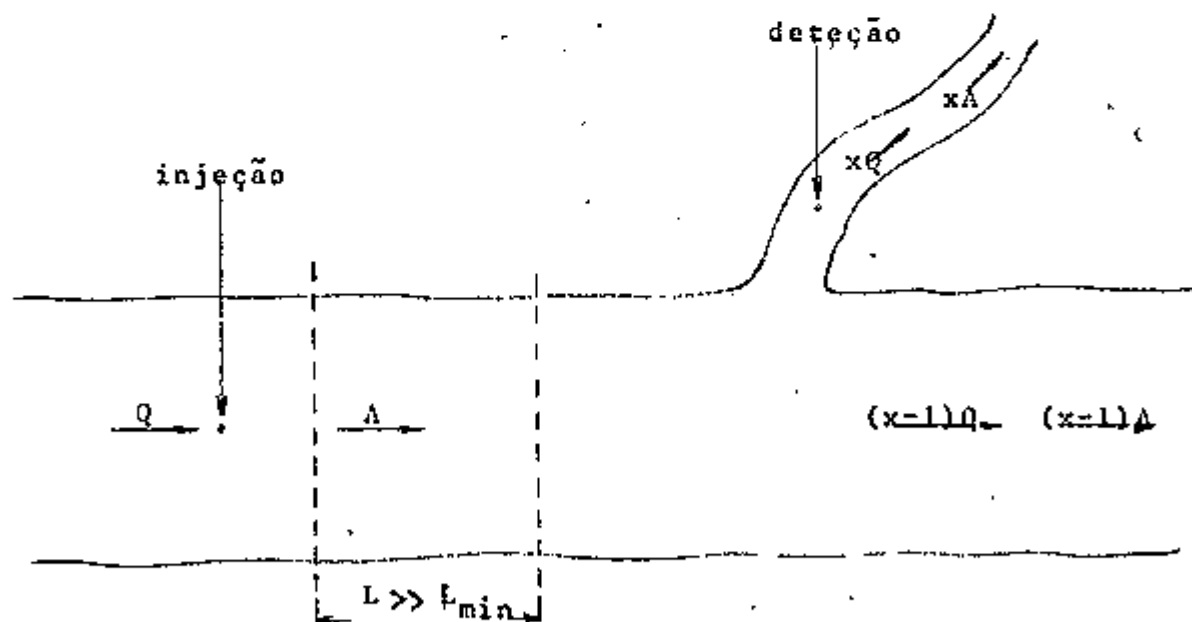


FIGURA 11 - Possibilidades de medição com correntes divergentes pelo método da Contagem Total.

III.5.2.4 CONSTANTE DE PROPORCIONALIDADE OU DE CALIBRAÇÃO

É a resposta N_c (contagem/s), do detetor e instrumental associado, na presença de determinada concentração de traçador radioativo

$$C = A_c/V_c \text{ (} \mu\text{Ci/m}^3\text{) } \therefore F = \frac{N_c}{A_c/V_c} \left(\frac{\text{contagem/s}}{\mu\text{Ci/m}^3} \right) \quad (34)$$

onde

N_c é a resposta do detetor (contagem/s)

A_c é a atividade usada na calibração (μ Ci)

V_c é o volume do recipiente de calibração (m^3)

Ela também é dependente do instrumental de medição, do radioisótopo utilizado e da geometria de detecção; daí a necessidade de determiná-la em condições similares às de medição "in situ".

Quando o detetor estiver submerso no rio e o volume de água que o rodeia for superior ao volume sensível de detecção, a calibração deverá ser realizada em um recipiente com dimensões maiores ou iguais a de uma esfera com raio superior a sete vezes o valor de $X'_{1/2}$, onde

$$X'_{1/2} = 1/\mu_{o1}; \quad X'_\infty > 7 X'_{1/2} \quad (35)$$

sendo μ_{o1} o coeficiente de atenuação linear em água (cm^{-1}).

Para a maioria dos radioisótopos usados em hidrologia determinaram-se valores de $X'_{1/2}$, os quais estão na tabela I.

Quando se trata de medir vazões em tubulações com detetor enconstado à sua superfície, determina-se a constante de calibração utilizando-se um pedaço da tubulação convenientemente escolhido, de maneira que o "volume visto" pelo detetor seja similar ao real.

Neste tipo de calibração estática é importante conhecer a atividade e o volume marcado com boa precisão, já que o erro se propagará nas medições de vazão. É aconselhável utilizar na calibração uma alíquota da atividade injetada no escoamento, para compensar os possíveis erros de determinação da atividade absoluta. No caso de se usar uma alíquota (f) da atividade injetada teremos pela expressão (34).

$$F = \frac{N_c}{f A/V_c} \quad \left(\frac{\text{contagem/s}}{\mu \text{ Ci/m}^3} \right)$$

substituindo (34) em (26)

$$Q = N_c / f.A. A/N . V_c = N_c . V_c / f.N \quad (36)$$

Assim se reduzem os erros, já que as atividades A e A_c provêm de dois fracionamentos distintos, nos quais é possível esperar, em alguns casos, erros de $\pm 5\%$. A propagação desses erros na expressão (36) afetaria consideravelmente a precisão com que é medida a vazão Q. Ao contrário, se usarmos uma alíquota, a calibração de atividade não influi e somente os erros de medição de volumes e massas devem ser considerados.

É preciso notar que a ordem de magnitude de A com respeito a A_c difere de um fator quatro a cinco vezes, para uma vazão da ordem de 20 m³/s.

A calibração estática poderá ser substituída por uma calibração dinâmica nos casos em que se conhece a vazão com suficiente precisão, utilizando-se a expressão (26)

$$Q = F.A./N \therefore F = Q.N/A \quad (37)$$

A constante de proporcionalidade F , assim determinada, pode ser usada na medição de outros caudais, sempre que o detetor, instrumental associado, radioisótopo e geometria de medição sejam as mesmas.

III.5.2.5. CÁLCULO DA ATIVIDADE A INJETAR

Esta variável é determinada geralmente em bases semiempíricas, levando-se em conta os seguintes fatores:

1. precisão requerida na medição do parâmetro investigado;
2. diluição estimada do traçador no ponto de observação;
3. eficiência de detecção;
4. tempo disponível para as medições.

É sabido que todas as medições de radioatividade são inevitavelmente acompanhadas de uma imprecisão devida a natureza estatística do processo radioativo.

A contagem líquida total registrada (N), depende da atividade injetada, da vazão e da constante de calibração, de acordo com a equação

$$N = F.A/Q \quad (38)$$

O desvio padrão relativo δ_N/N é representado por

$$\delta_N/N = 1/N \cdot \sqrt{(N + N_F) + N_F} = 1/N \cdot \sqrt{N + 2N_F}$$

$$100 \cdot \delta_N/N = \sqrt{N/N^2 + 2N_f/N^2} = P \quad (\%) \quad (39)$$

sendo P a precisão porcentual que se obtém na medição da variação. Substituindo (38) em (39) tem-se:

$$\delta_N/N = \sqrt{Q/FA + 2N_f \cdot t \cdot Q^2/F^2 A^2} = P/100 \quad (40)$$

$$P^2/100^2 = Q/FA + 2N_f \cdot t \cdot Q^2/F^2 A^2$$

multiplicando-se a expressão (40) por A^2 e igualando a zero, vem

$$P^2 A^2/100^2 - QA/F - 2N_f \cdot t \cdot Q^2/F^2 = 0 \quad (41)$$

A solução desta equação de segundo grau em A é:

$$\frac{Q/F \pm \sqrt{Q^2/F^2 + 8P^2/100^2 \cdot N_f \cdot t \cdot Q^2/F^2}}{2P^2/100^2} = \frac{Q/F \pm Q/F \sqrt{1 + 8P^2/100^2 \cdot N_f \cdot t}}{2P^2/100^2}$$

$$A = Q/F \left(\frac{100^2 \pm 100^2 \sqrt{\frac{100^2 + 8P^2 N_f t}{100^2}}}{2 P^2} \right) = \left(\frac{100^2 \pm 100 \sqrt{100^2 + 8P N_f t}}{2 P^2} \right) \cdot Q/F$$

(42)

onde

A é a atividade a injetar (μCi)

Q é a vazão estimada (m^3/s)

F é a constante de calibração

N_f é a contagem de fundo (contagem/s)

P é a precisão desejada, tendo em conta o erro estatístico (%)

t é o tempo de contagem, maior ou igual ao tempo de passagem da nuvem radioativa (s).

Por último temos que a atividade a injetar em uma medição de vazão pelo método da contagem total deve ser igual ou maior que $A_{\text{mín}}$ (μCi), para obtermos um erro estatístico - relativamente menor que P (%):

$$A_{\text{mín}} (\mu\text{Ci}) \geq Q/F \left(\frac{100^2 + 100\sqrt{100^2 + 8P^2 N_f \cdot t}}{2 P^2} \right) \quad (43)$$

III.5.3 MÉTODO DA INJEÇÃO CONTÍNUA OU DA DILUIÇÃO

Este método é mais uma variação da forma de aplicação dos conceitos do método anterior.

Ao se comparar a concentração C_1 do traçador injetado com vazão Q' constante em um escoamento de vazão Q , com a concentração C_2 que se mede à jusante, (figura 12), temos:

$$Q C_0 + Q' C_1 = (Q + Q') C_2 \quad (44)$$

onde

Q é a vazão que se deseja medir (m^3/s)

C_0 é a concentração residual do traçador que poderia estar incorporada ao escoamento antes da injeção ($\mu Ci/cm^3$)

Q' é a vazão constante injetada (m^3/s)

C_1 é a concentração do traçador injetado ($\mu Ci/cm^3$)

C_2 é a concentração do traçador medido à jusante ($\mu Ci/cm^3$)

geralmente temos

$$C_0 = 0; \quad C_1 \gg C_2 \quad \text{e} \quad Q' \ll Q$$

$$Q' C_1 = Q C_2 \quad \therefore \quad Q = Q' C_1 / C_2 \quad (45)$$

Analogamente, se as concentrações foram medidas com o mesmo instrumental de detecção, radioisótopo, geometria e se a resposta do detetor, no intervalo de concentrações assinalado, for linear, tem-se

$$Q = Q' R_1 / R_2$$

onde R_1 e R_2 são a resposta do instrumental de medição para C_1 e C_2 (contagem/s) (figura 13).

Este método também é independente da velocidade e por conseguinte aplicável nos casos de seções desconhecidas.

Esta técnica é válida quando os seguintes fatores - forem cumpridos:

1. não existir perdas de traçador por absorção, precipitação, etc., entre o ponto de injeção e o de medição;
2. a concentração C_2 na seção de medição for

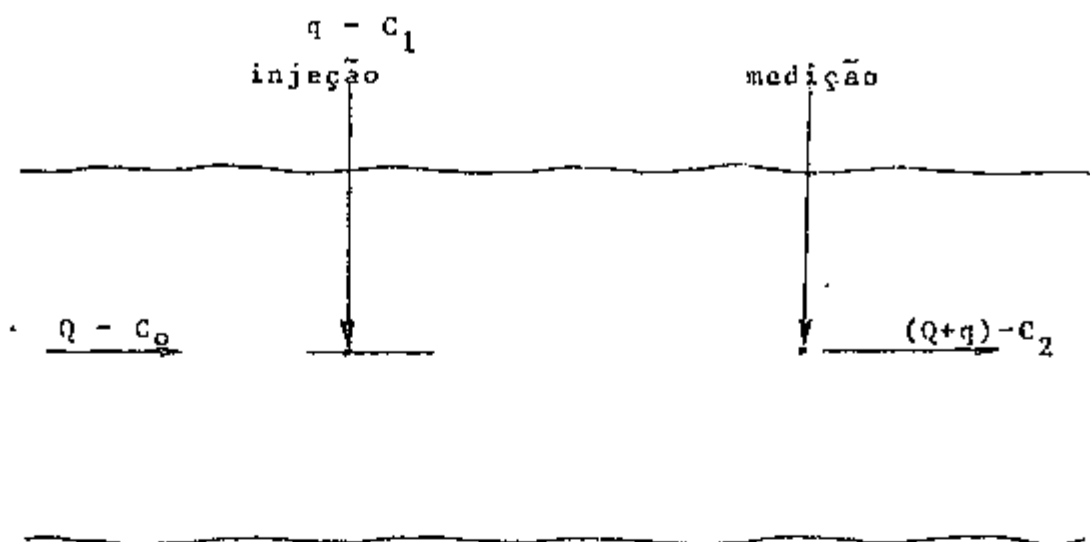


FIGURA 12 - Representação esquemática do método da Diluição ou da Injeção Contínua.

contagem/s

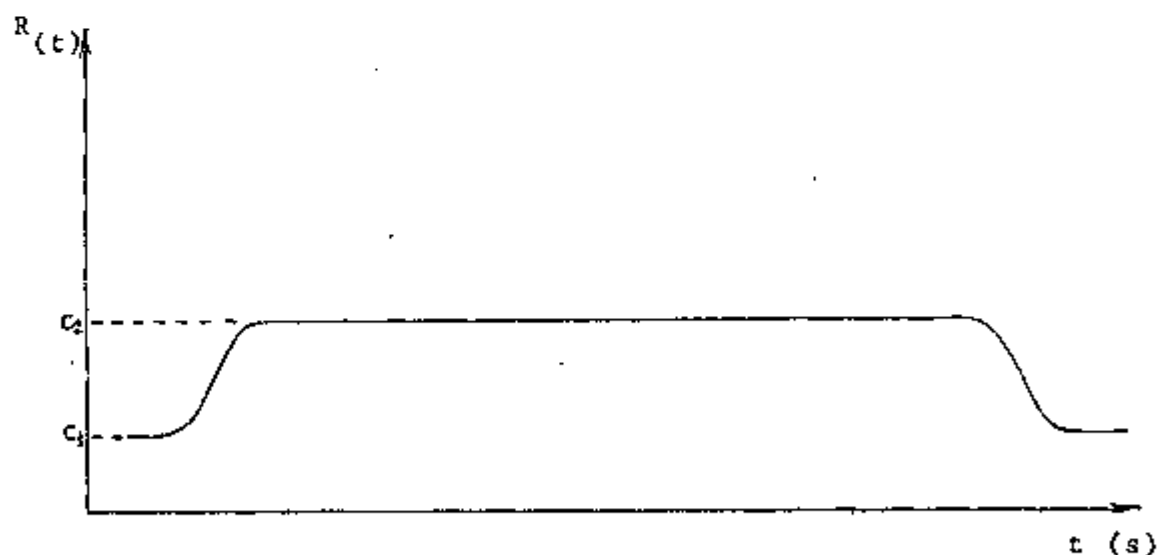


FIGURA 13 - Variação da concentração da solução radioativa em função do tempo de contagem no método da Injeção Contínua ou da Diluição.

constante. Isto quer dizer que foi alcançada a linearidade na curva $C = f(t)$ (figura 13);

3. a radiação natural de fundo (background) não variar durante a experiência;
4. regime permanente.

III.5.3.1 CÁLCULO DA ATIVIDADE A INJETAR

Analogamente, a atividade mínima a injetar é calculada de forma similar ao método da Contagem Total

$$A_{\text{mín}} \gg Q' C_1 \text{ (} \mu\text{Ci/s) = Q/F \left(\frac{100^2 + 100 \sqrt{100^2 + 8P^2 N_f t}}{2 P^2} \right) \quad (44)$$

onde

Q' é a vazão constante injetada (m^3/s)

C_1 é a concentração injetada ($\mu\text{Ci}/\text{m}^3$)

t é o tempo de contagem (com integrador $t = 2RC$)

N_f é a atividade natural de fundo (contagem/s)

P é a precisão desejada

III.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DESCRITOS

O método denominado de "dois picos" requer o uso de duas sondas detetoras e o conhecimento da seção por onde escoo o fluido. No método da Contagem Total e da Diluição necessita-se um só detetor e não é preciso conhecer-se a seção

de medição. Sem dúvida, estes dois últimos necessitam de calibrações prévias para as medições, em virtude das comparações entre as concentrações injetadas e detetadas no ponto de medição (figura 14).

As sondas detetoras usadas em campanhas de medição de vazões pelo método de Diluição ou da Contagem Total são simples, pois constam de escalímetro, uma fonte de tensão e um registrador gráfico. O mesmo pode-se dizer do sistema de injeção do traçador, ainda que para injetar uma solução com vazão constante durante certo tempo (método de Diluição) o sistema mecânico seja mais complexo e difícil de operar com condições geográficas e meteorológicas desfavoráveis.

No método da Diluição, caso Q' e Q sejam constantes, o erro relativo é dado por

$$\Delta Q/Q = \sqrt{(\Delta C_1/C_1)^2 + (\Delta C_2/C_2)^2} \quad (48)$$

No método da Contagem Total utilizando-se detector submerso no escoamento, o desvio padrão será calculado como segue:

$$\delta_1 = \left(\int_{t(a)}^{t(b)} R(t) dt \right)^{1/2} \quad (49)$$

Ao contrário, tomando amostras contínuas ou periódicas que depois são armazenadas, homogeneizadas e contadas, o desvio padrão será calculado pela equação

$$\delta_2 = \left[R_m (t(b) - t(a)) \right]^{1/2} \quad (50)$$

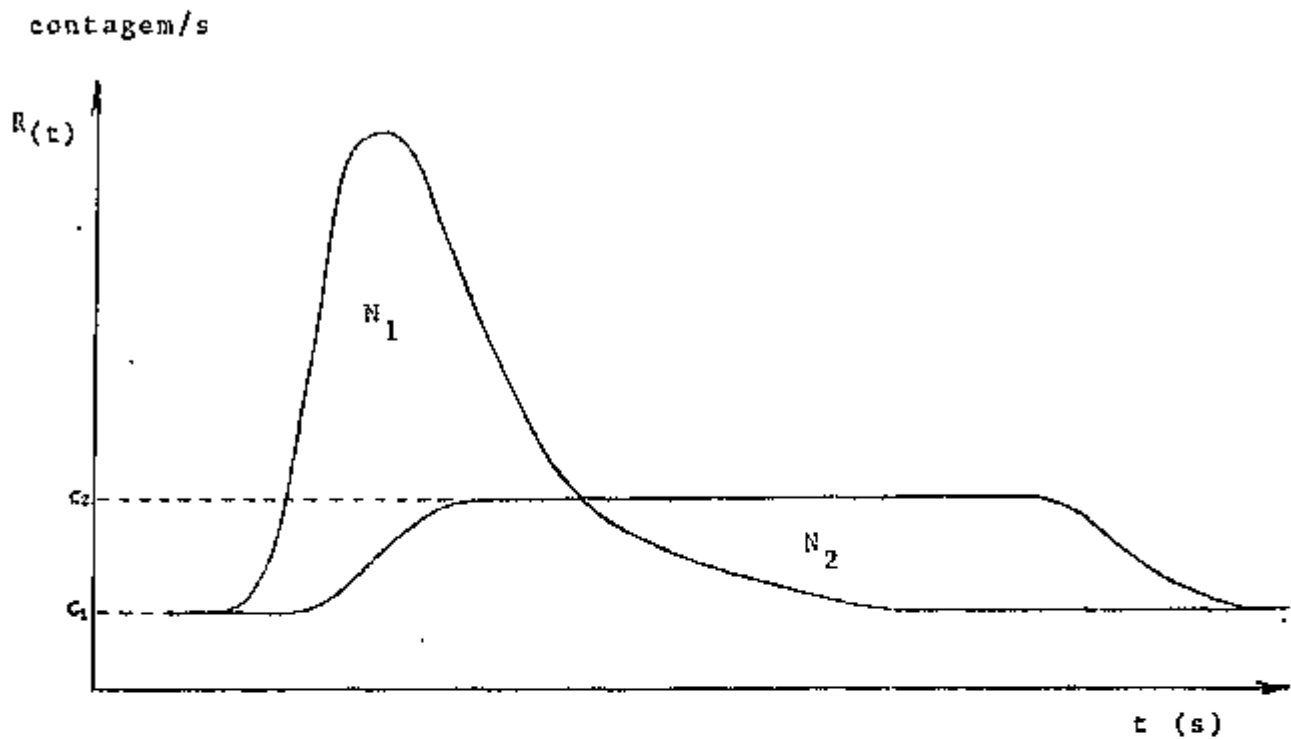


FIGURA 14 - Superposição das curvas de variação da concentração da solução radioativa em função do tempo de contagem, considerando o método da Contagem Total (N_1) e método da Injeção Contínua (N_2).

Supondo o mesmo tempo de contagem em (49) e (50), observa-se que para obter o mesmo desvio padrão em ambos os casos, necessita-se recolher um volume de água muito grande (função do volume sensível de detecção do detetor submerso).

CAPÍTULO IV

PARTE EXPERIMENTAL

Os métodos desenvolvidos no capítulo anterior, assim como a teoria exposta neste trabalho, foram experimentalmente comprovadas em laboratório e no campo.

Nas medições em tubulações utilizou-se o laboratório de hidráulica da D.A.R.E.I. (Divisão de Aplicação de Radioisótopos na Engenharia e Industria); em canalizações o canal de saída do esgoto de Santos e São Vicente, na Praia Grande e em rios o Rio Pirajussara.

IV.1. MEDIDAS DE VAZÃO EM TUBULAÇÕES

Realizaram-se estas medidas utilizando-se o método da Contagem Total e dos Dois Picos, simultaneamente, para comparar o erro relativo e aproveitar ao máximo o traçador radioativo usado em cada ensaio.

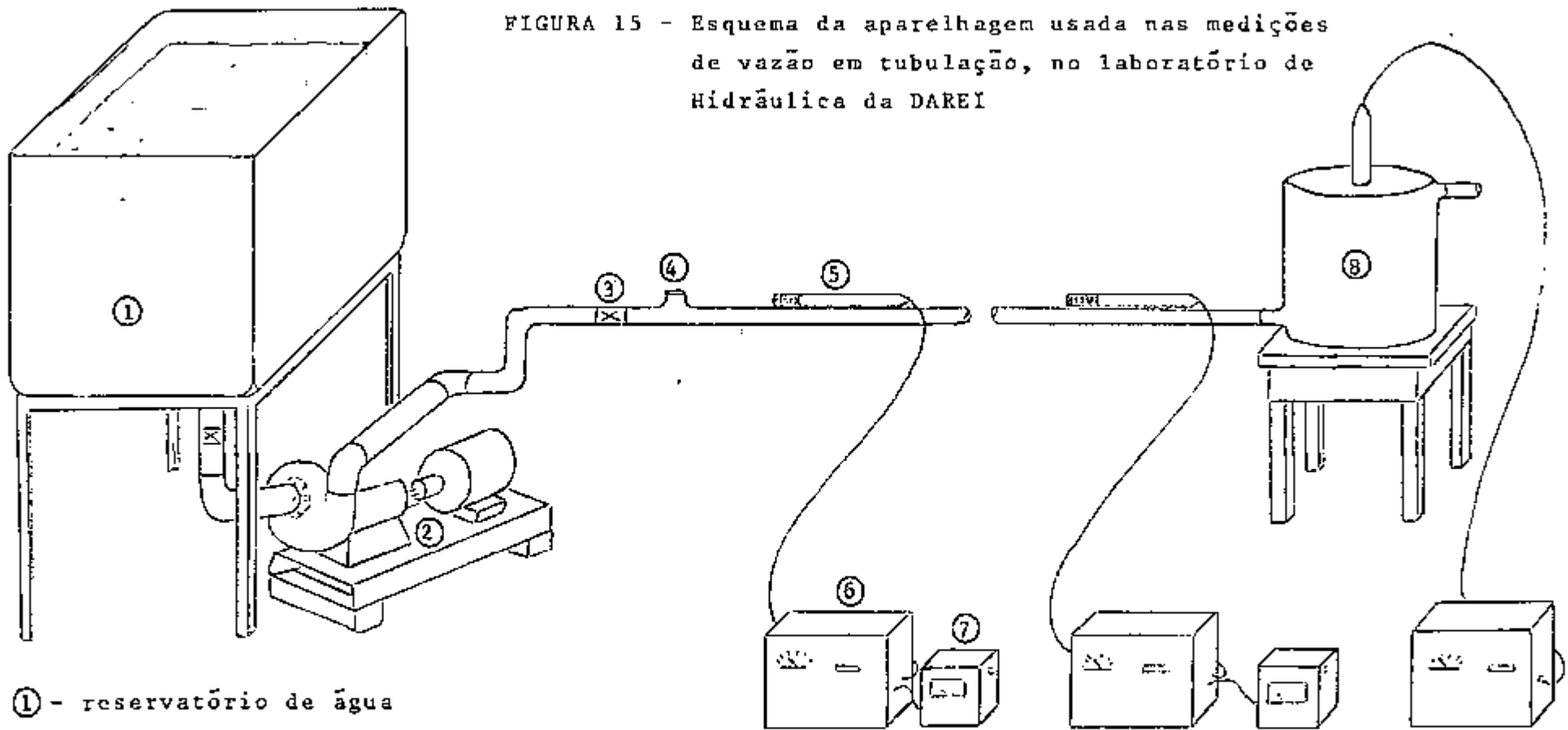
IV.1.1 MÉTODO DA CONTAGEM TOTAL

Utilizou-se o ^{131}I , escolhido por suas características apresentadas na tabela IV, e por permitir o uso de aliquotas da mesma solução durante todos os ensaios, facilitando a calibração do sistema detetor.

O conjunto experimental (figura 15) consistiu de:

- um reservatório de 1000 litros;

FIGURA 15 - Esquema da aparelhagem usada nas medições de vazão em tubulação, no laboratório de Hidráulica da DAREI



① - reservatório de água

② - bomba

③ - registro

④ - válvula para a injeção

⑤ - detetor de NaI (Tl)

⑥ - escalímetro integrador

⑦ - registrador gráfico

⑧ - tambor de medição

- uma bomba de 1/4 HP, com vazão máxima de 100 l/min;
- 20 metros de cano de 5,08 cm;
- válvula com membrana de borracha, para permitir a injeção (figura 16);
- seringa hipodérmica graduada, por onde se injetava a solução radioativa;
- tambor de medição com capacidade de 78,5 litros, em cujo centro geométrico foi colocado o detetor (figura 17);
- cintilador com cristal de NaI (Tl) de 3,8 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura;
- escalímetro e integrador BASC;
- registrador gráfico RUSTRAK.

A utilização da equação (26) exige o conhecimento da atividade absoluta, o que é difícil de ser obtido. Assim sendo optamos pela equação (36) modificada, a saber:

- retira-se uma fração f da solução traçadora, a ser injetada no sistema (pode ser em peso ou em volume). Esta fração é diluída no tambor de medição, e após homogeneização mede-se a contagem N_c (cpm) (calibração estática). O fator de calibração F é representado pela equação (34)

$$F = \frac{N_c \cdot V_c}{f \cdot A}$$

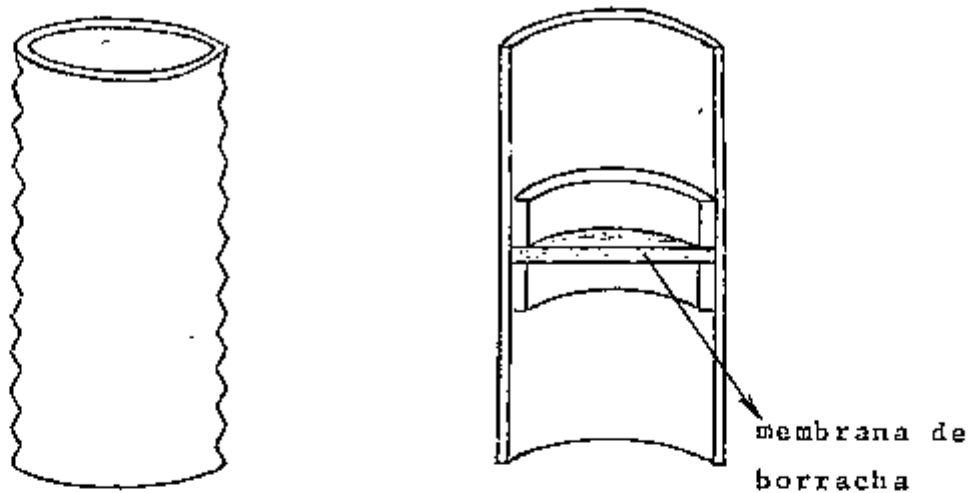


FIGURA 16 - Vãlvula para a injeção do traçador

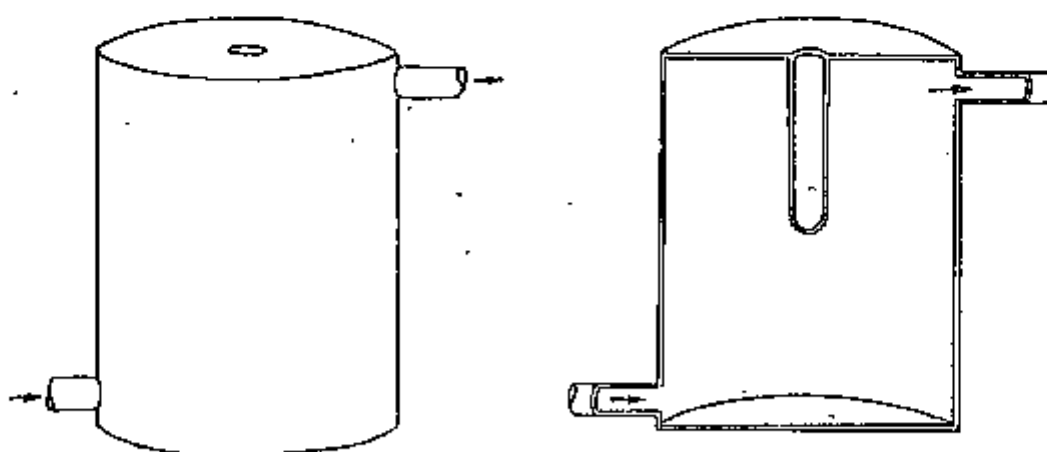


FIGURA 17 - Tambor de medição

Substituindo F na equação (26), tem-se:

$$Q = \frac{F \cdot A}{N} = \frac{N_c \cdot V_c \cdot A}{f \cdot A \cdot N} = \frac{N_c \cdot V_c}{f \cdot N} \quad (36)$$

Observa-se que a vazão volumétrica é representada - somente em função da contagem de calibração (N_c), do volume do tambor de medição (V_c), da contagem total líquida acumulada durante a medição (N) e da fração (f) da solução traçadora utilizada nas medições e calibração.

Utilizou-se esta equação, na prática, para evitar os erros sistemáticos, pois os volumes e pesos podem ser cuidadosamente medidos.

As quantidades de solução traçadora, utilizadas em cada ensaio, foram pesadas em balança analítica com precisão de até 10^{-4} gramas.

Para o cálculo de F realizaram-se seis medições estáticas, para obtenção de um valor médio dos resultados (tabela VI). Pesou-se certa fração da solução traçadora, que em seguida foi injetada no tambor de medição contendo volume conhecido de água. Introduziu-se um agitador mecânico no tambor para obtenção de uma homogeneização completa. Contou-se a solução radioativa por dez minutos e daí obteve-se a atividade em contagens por minuto (cpm), da fração contida no volume do tambor. A seguir acrescentou-se nova fração de material radioativo, e repetiu-se o procedimento anterior.

No total agregou-se tres (3) frações diferentes. Os resultados estão dispostos na tabela VI.

Ajustou-se a vazão por meio de um registro, para permitir a realização de um ensaio completo, sem que se esgotasse a água do reservatório. Assim, o "background" medido antes e depois de cada experiência era sempre o mesmo.

T A B E L A VI
CÁLCULO DE F NA MEDIÇÃO DE VAZÃO EM TUBULAÇÕES

ENSAIO Nº	Δt (min)	BG (contagem)	$C_{t,b}$ (contagem)	$C_{t,l}$ (contagem)	PÊSO DA SOL. (GRAMAS)	e^x	$C_{t,c}$ (contagem)	F (cp m/g/l)
1	750	25.012	135.885	110.873	7,2560	0,6274	176.718	1.911.847
2	760	25.720	136.639	110.919	7,2560	0,6270	176.830	1.913.059
3	790	24.952	190.450	165.498	10,8692	0,6259	264.416	1.909.676
4	800	25.676	191.129	165.453	10,8692	0,6255	264.513	1.910.377
5	820	25.967	249.857	223.890	14,7700	0,6247	358.396	1.904.813
6	830	25.360	248.925	223.565	14,7700	0,6244	358.047	1.902.958

$\bar{F} = 1.908.788$

F = FATOR DE CALIBRAÇÃO

Δt = TEMPO TRANSCORRIDO ENTRE $t=0$ E O ENSAIO

BG = "BACKGROUND" OU CONTAGEM DE FUNDO

C_t = CONTAGEM TOTAL (b=bruta, l=líquida e C=corrigida)

e^x = FATOR DE DECAIMENTO RADIOATIVO (para um $t=0$)

$$e^x = e^{-0,693 \cdot \Delta t / T_{1/2}}$$

Confirmou-se portanto que todo o traçador radioativo injetado passou pelo tambor de medição.

Todos os valores das contagens de radioatividade foram corrigidos do fator de decaimento, de acordo com a equação (4), para um tempo $t = 0$, e os resultados encontram-se na tabela VII.

IV.1.2 MÉTODO DOS DOIS PICOS

No circuito descrito anteriormente colocou-se dois cintiladores no exterior da tubulação (conforme figura 15), ligados a dois BASC e dois RUSTRAK, para obtenção do Δt entre os picos. Os registradores foram sincronizados antes de cada ensaio para determinação das suas velocidades reais.

Calculou-se a velocidade do papel registrador gráfico utilizando-se a equação (19), evitando-se erros devido à parte mecânica deles.

Para o cálculo da vazão volumétrica, de acordo com a equação (20), consideraram-se os seguintes fatores:

- distância entre o ponto de sincronização (início do ensaio) no papel e o baricentro da curva que representa o pico de atividade nas duas fitas registradoras (figura 18);
- a velocidade real medida, para cada fita, e o cálculo do intervalo de tempo transcorrido entre os dois pontos;
- o tempo de trânsito da frente radioativa entre os dois detetores;
- a velocidade do traçador no interior da tubulação.

T A B E L A VII

RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DA CONTAGEM TOTAL EM TUBULAÇÕES

ENSAIO Nº	Δt (min)	BG (contagem)	C_{cb} (contagem)	C_{ca} (contagem)	PÊSO DA SOL. (GRAMAS)	e^x	C_{cc} (contagem)	Q (l/min)
1	675	25.006	115.320	90.314	2,8007	0,9602	94.057	56,84
2	720	22.121	110.430	88.309	2,8232	0,9576	92.219	58,44
3	785	23.280	114.460	91.080	2,8440	0,9539	95.481	56,86
4	870	24.570	109.580	85.010	2,7174	0,9490	89.579	57,90
5	1.985	24.998	106.110	81.112	2,7875	0,8874	91.404	58,21
6	2.035	25.190	105.190	79.900	2,7976	0,8848	90.303	59,13
7	2.075	25.772	102.120	76.348	2,7303	0,8827	86.494	60,25

Q = VAZÃO VOLUMÉTRICA

$\bar{Q} = 58,26 \pm 1,2$

T A B E L A VII

RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DA CONTAGEM TOTAL EM TUBULAÇÕES

ENSAIO Nº	Δt (min)	SG (contagem)	C_{UD} (contagem)	C_{LR} (contagem)	PÊSO DA SOL. (GRAMAS)	e^x	C_{CC} (contagem)	Q (l/min)
1	675	25.006	115.320	90.314	2,8007	0,9602	94.057	56,84
2	720	22.121	110.430	88.309	2,8232	0,9576	92.219	58,44
3	785	23.280	114.460	91.080	2,8440	0,9539	95.481	56,86
4	870	24.570	109.580	85.010	2,7174	0,9490	89.579	57,90
5	1.985	24.998	106.110	81.112	2,7875	0,8874	91.404	58,21
6	2.035	25.190	105.190	79.900	2,7976	0,8848	90.303	59,13
7	2.075	25.772	102.120	76.348	2,7303	0,8827	86.494	60,25

Q = VAZÃO VOLUMÉTRICA

 $Q = 58,26 \pm 1,22$

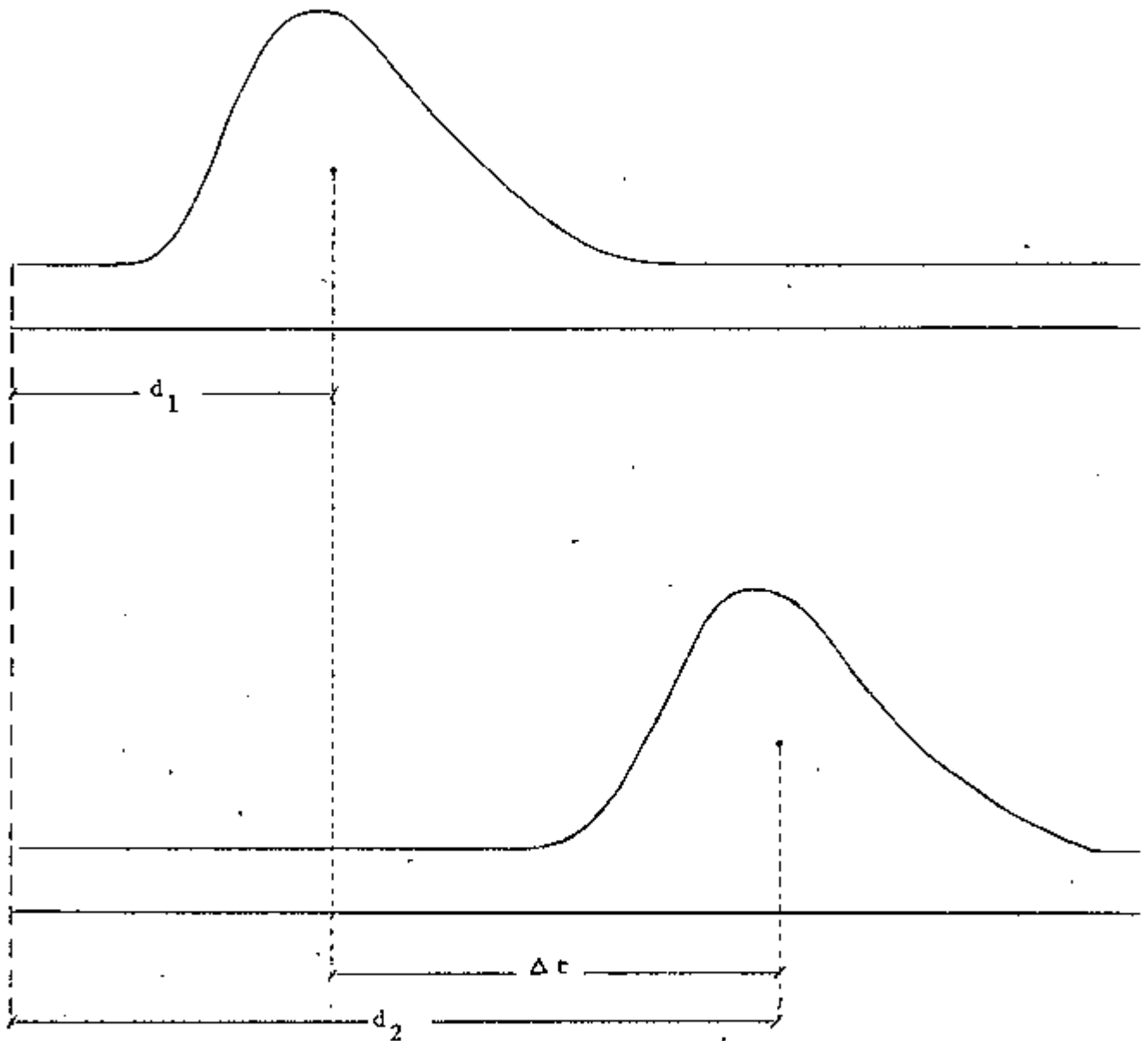


FIGURA 18 - Distância na fita do registrador gráfico entre o ponto de sincronização e o baricentro do pico de atividade.

Conhecendo-se a velocidade e a seção molhada da tubulação, calculou-se a vazão volumétrica, utilizando-se a equação (20), simplificada:

$$Q_{\text{medido}} = V.S$$

Mediu-se a seção molhada da tubulação (S) utilizando-se um paquímetro. O valor medido não correspondeu ao nominal, sendo necessário várias medições para obtermos um valor da seção média.

Os resultados obtidos estão representados na tabela VIII.

IV.1.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Com base nos resultados das tabelas VII e VIII, pode-se afirmar, levando-se em conta que o método da Contagem Total tem uma precisão intrínseca limitada a 1%, pelo número de contagens obtido e também pela reprodutibilidade do sistema de detecção utilizado, que as fontes de erro que podem ter afetado os resultados são:

- erros estatísticos de contagem, oriundos do próprio fenômeno de desintegração nuclear;
- pequenas variações de voltagem, alterando o rendimento da bomba;
- a falta de homogeneidade na seção da tubulação de plástico, que se deforma facilmente.

T A B E L A VIII

RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DOS "DOIS PICOS" EM TUBULAÇÕES

ENSAIO Nº	d_1 (cm)	t_1 (s)	d_2 (cm)	t_2 (s)	Δt (s)	V (cm/s)	Q (ℓ /min)
1	16,04	47,88	22,26	66,19	18,31	46,42	57,35
2	16,95	50,60	23,05	68,54	17,94	47,38	58,53
3	15,16	45,25	21,34	63,46	18,21	46,68	57,66
4	15,90	47,22	21,97	65,58	18,36	46,30	57,19
5	17,80	53,13	23,90	71,34	17,94	47,38	58,53
6	17,00	50,49	22,90	68,36	17,87	47,57	58,76
7	16,32	48,72	22,32	66,37	17,65	48,16	59,49
							$\bar{Q} = 58,22 \pm 0,84$

IV.2 MEDIDAS DE VAZÃO EM CANALIZAÇÕES

A oportunidade para a aplicação do método de traçadores radioativos na determinação de vazão volumétrica em canalização, surgiu com um pedido para a medição do escoamento do esgoto de Santos-São Vicente, por intermédio de um convênio entre o IEA (Instituto de Energia Atômica) e o CETESB (Centro Técnico de Saneamento Básico). A finalidade das medições era calibrar uma régua linimétrica existente na canalização, próxima à estação experimental de cloração da SBS (Saneamento da Baixada Santista).

O método escolhido foi o da Contagem Total, pois como já foi exposto anteriormente, não se necessita conhecer a seção transversal ou perímetro molhado, nem ser necessário uma geometria infinita para o sistema detetor (no caso utilizou-se o tambor de medição).

Simultaneamente a estes ensaios com traçadores radioativos, o CETESB realizou medidas com colorantes, que não proporcionaram resultados satisfatórios, pela existência de muitas partículas sólidas em suspensão tornando turva a coloração do esgoto e também por ser um meio altamente redutor.

Calculou-se a distância mínima de homogeneização de maneira a ultrapassar em dez vezes o valor que se obtém utilizando a equação (10). Com este coeficiente de segurança assegurou-se uma perfeita homogeneização.

Utilizou-se o ^{82}Br por suas características apresentadas na tabela VI e calculou-se a atividade pela equação (43).

Escolheu-se um trechoretilíneo da canalização para as medições, situado entre a estação experimental de cloração da SBS e o posto de sentinelas do Forte Itaipú (figura 19). O ponto de injeção e o ponto de medição estavam separados por aproximadamente 2000 metros.

Para a injeção da solução traçadora utilizou-se um aparelho projetado e fabricado no IEA (figura 20), para injeção instantânea, requisito indispensável de validade das equações utilizadas no cálculo da vazão volumétrica, pelo mé-

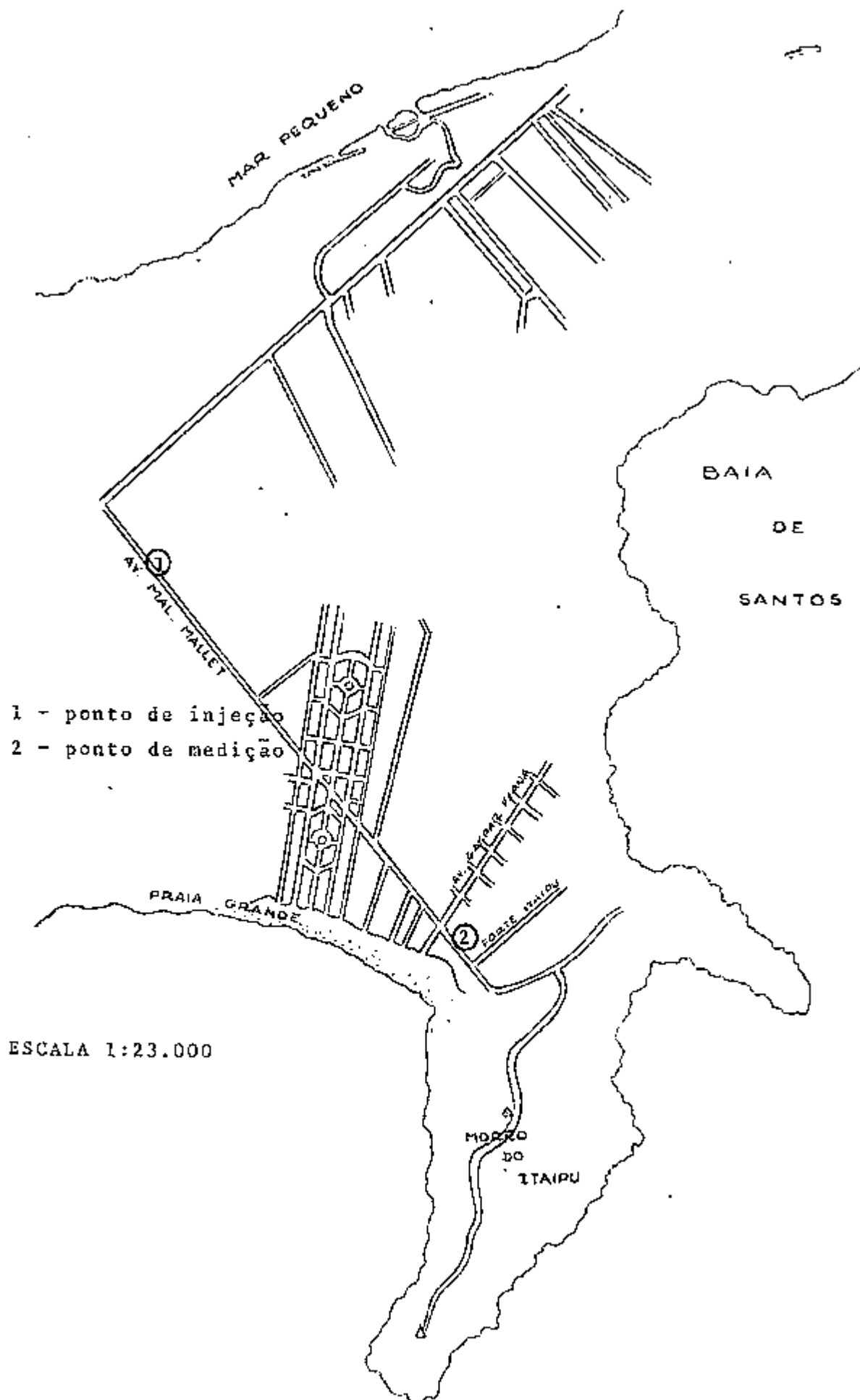


FIGURA 19 - Planta de situação do esgôto de Santos-São Vicente na canalização onde foram feitas as medidas de vazão, por métodos radioisotópicos e convencionais.

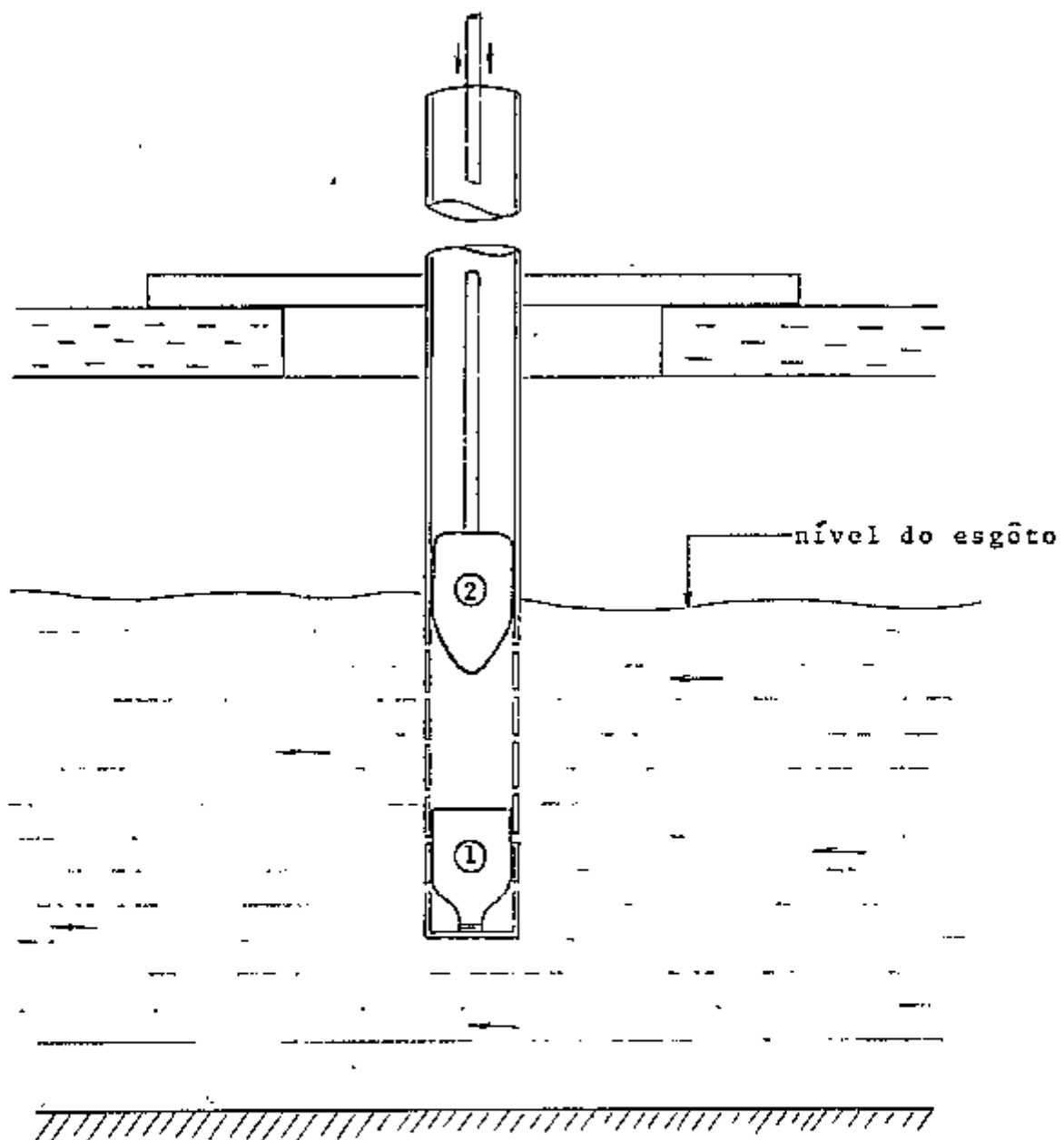


FIGURA 20 - Aparelho para injeção instantânea

- ① - frasco de vidro com solução traçadora
- ② - pistão de impacto

todo da Contagem Total.

Mediu-se a atividade do esgoto utilizando-se a técnica B, da figura 2, com um detetor de cintilação com cristal de NaI (Tl) ligado a um escalímetro integrador e a um registrador gráfico (Figura 21). Também faz parte do sistema o tambor de medição (figura 17) e uma bomba de 1/4 HP com vazão máxima de 200 l/min.

O traçador ^{82}Br foi dissolvido em solução de tiosulfato de sódio e as frações, para cada ensaio, foram acondicionadas em frascos de vidro de 10 ml.

Entre os ensaios mediu-se a taxa de "background" para verificar se o traçador radioativo não havia ficado retido no sistema em medição.

Para cada medição realizada leu-se o nível do esgoto, correspondente a vazão determinada. Os dados obtidos estão dispostos nas tabelas IX e X, sendo que a correlação entre eles esta apresentada na figura 22. Pode-se notar que existe uma concordância na forma das curvas, e a pequena variação existente entre elas pode ser atribuída a:

- oscilação do escoamento durante as medições;
- variação de tensão utilizada na bomba;
- leitura da régua na hora do ensaio (divisão mínima de 2 cm);
- sólidos, que arrastados pelo escoamento, poderiam entupir parcialmente o filtro da válvula de sucção (figura 23).

Os resultados obtidos nas medições, que constam da tabela IX, já estão corrigidos por decaimento radioativo (equação (4)) a um tempo $t = 0$.

Para o cálculo da vazão utilizou-se a equação (36).

T A B E L A IX

RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DA "CONTAGEM TOTAL" EM CANALIZAÇÕES

ENSAIO Nº	Δt (min)	C_{td} (contagem)	BG (contagem)	C_{tr} (contagem)	PÊSO DA SOL. (GRAMAS)	e^x	C_{cc} (contagem)	Q (m ³ /s)
1	1005	175.330	47.130	128.200	12,7829	0,727	176.341	0,989
2	1053	161.930	29.130	132.800	13,5872	0,716	185.475	0,999
3	1090	157.620	37.420	126.200	13,3214	0,708	178.249	1,019
4	1121	173.730	31.530	142.200	14,6991	0,701	202.853	0,988
5	1156	146.790	25.590	121.200	13,1020	0,693	174.892	1,022
6	1191	156.330	33.080	123.250	13,4910	0,685	179.927	1,023
7	1223	158.570	32.430	126.140	13,5967	0,678	186.047	0,997
8	1260	154.440	29.810	124.630	13,5630	0,670	186.015	0,995
9	1295	154.300	29.700	124.600	13,3809	0,663	187.934	0,971
10	1330	160.070	32.670	127.400	14,0099	0,656	194.207	0,984
11	1368	143.130	34.230	108.900	12,3355	0,648	168.056	1,001
12	1401	157.460	33.330	124.130	13,6427	0,641	193.651	0,961

$F = 13,64 \times 10^5 \text{ cps/g/l}$

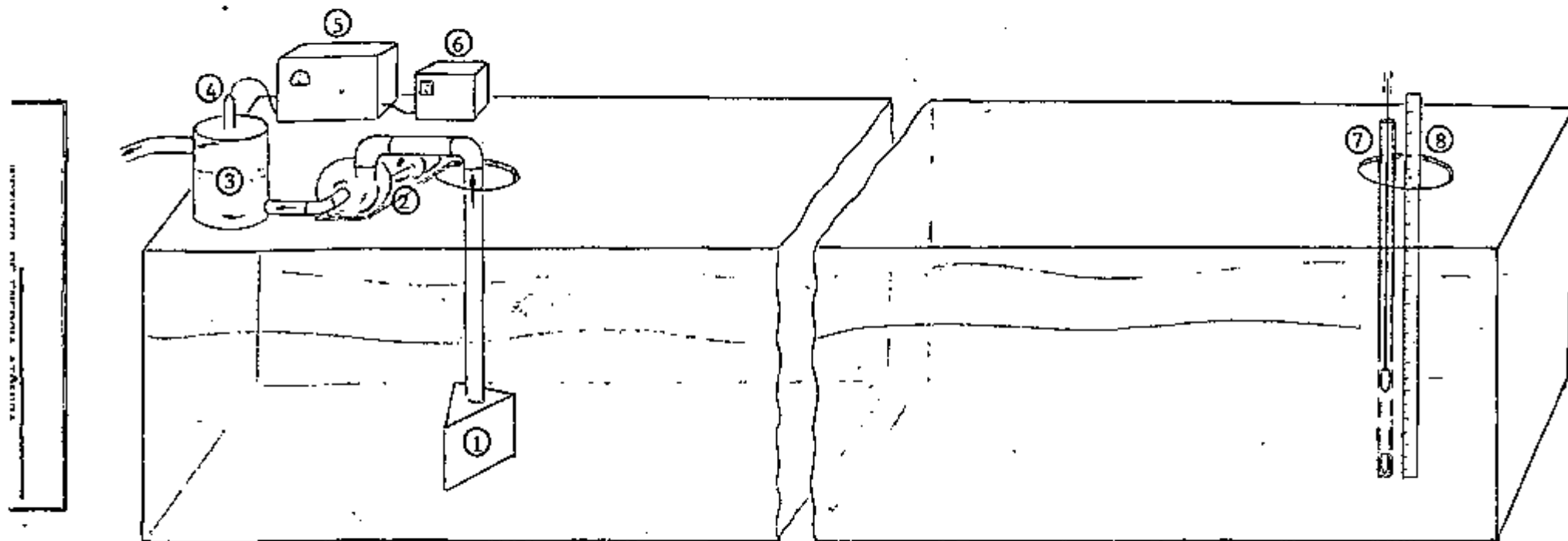
$\bar{Q} = 0,996 \pm 0,019$

T A B E L A X

NÍVEIS LIDOS NA RÉGUA QUANDO DOS ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DO ESGOTO DE SANTOS - SÃO VICENTE. E A VAZÃO CORRESPONDENTE MEDIDA PELO MÉTODO DA CONTAGEM TOTAL.

ENSAIO Nº	HORA	NÍVEL NA RÉGUA (cm)	VAZÃO MEDIDA l/s
1	9:43'	104	989
2	10:33'	106	999
3	11:10'	105	1019
4	11:41'	104	988
5	12:16'	105	1022
6	12:51'	106	1023
7	13:23'	106	997
8	14:00'	105	995
9	14:35'	105	972
10	15:10'	104	985
11	15:48'	104	1002
12	16:21'	104	961

FIGURA 21 - Esquema da aparelhagem usada na medição da vazão volumétrica da canalização do esgoto de Santos- São Vicente



① - aparelho protetor da válvula de sucção

② - bomba

③ - tambor de medição

④ - detector de cintilação

⑤ - escalímetro e integrador

⑥ - registrador

⑦ - aparelho de injeção instantânea

⑧ - régua linimétrica

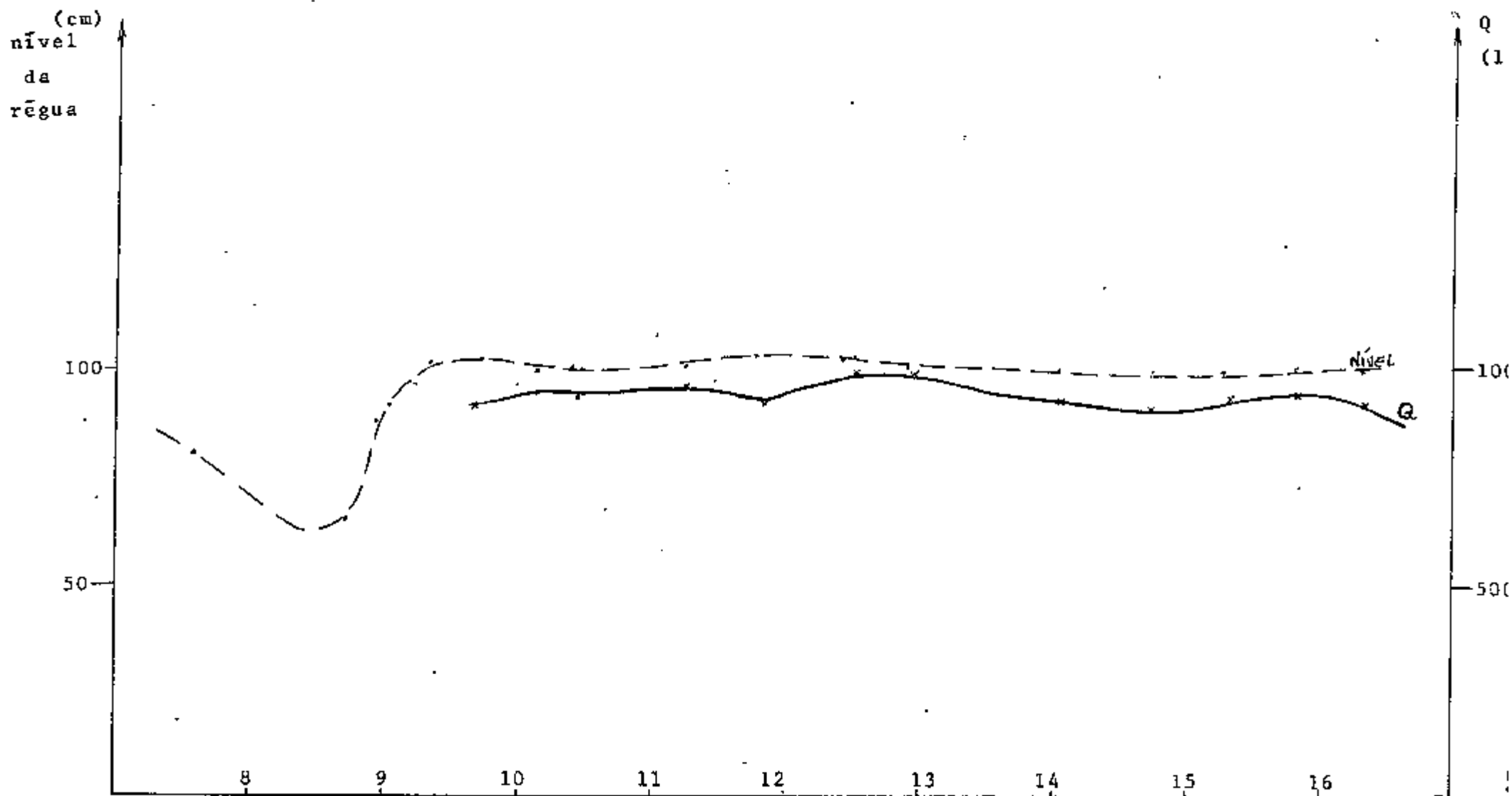


FIGURA 22 - Correlação entre as vazões medidas pelos métodos radioisotópicos e os níveis correspondentes lidos na régua linimétrica.

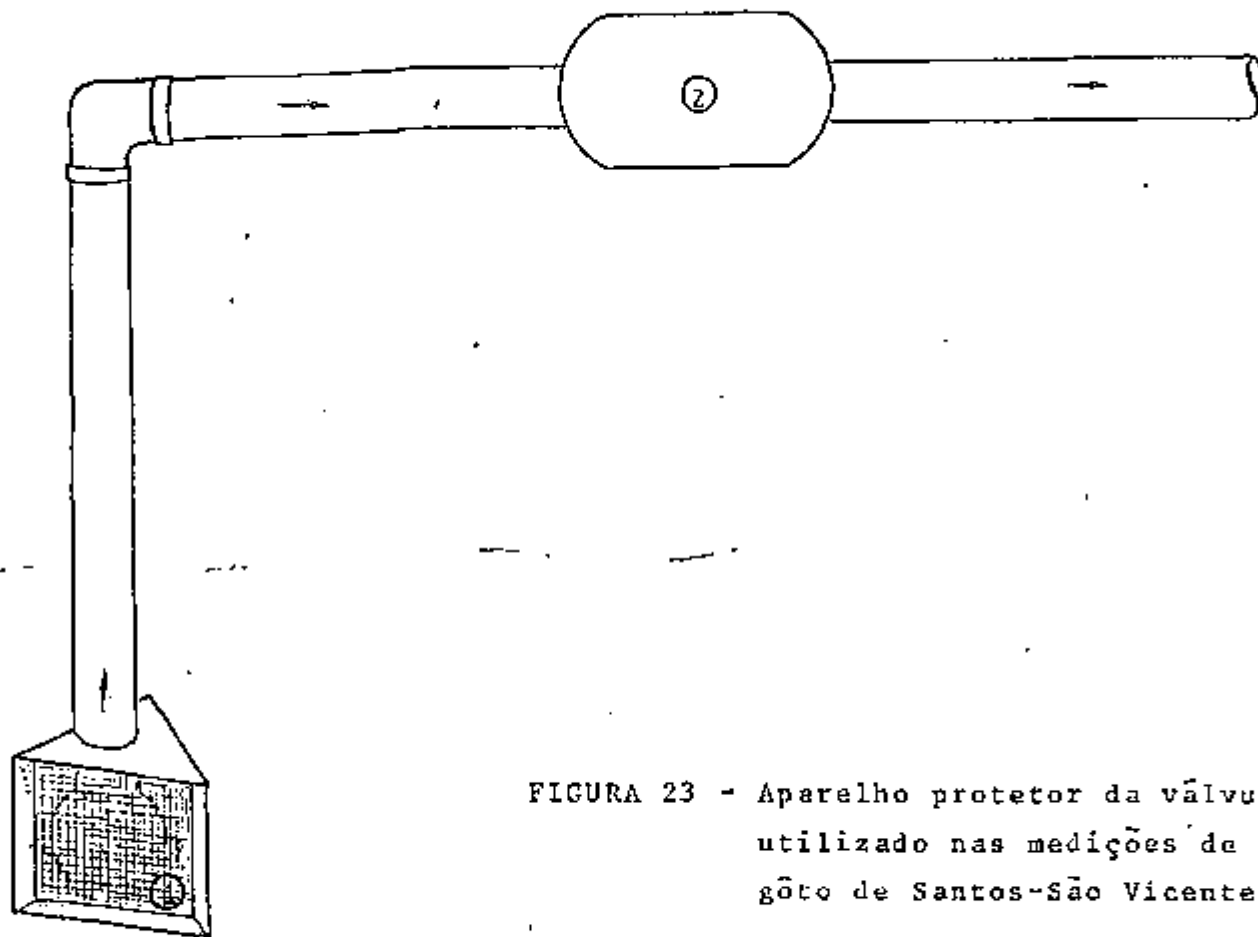


FIGURA 23 - Aparelho protetor da válvula de sucção utilizado nas medições de vazão do esgôto de Santos-São Vicente

- ① - filtro protetor da válvula de sucção
- ② - bomba

IV.3 MEDIDAS DE VAZÃO EM RIOS

Para esta experiência escolheu-se o método da Conta gem Total, por ser o mais acessível e de boa precisão. A utilização deste método em canal aberto foi originalmente empregada por Hull (1958), em um afluente de água salgada de uma refinaria para corrigir um linímetro fixo neste canal.

Para comprovar a eficiência do método de medições de vazão de pequeno porte, realizaram-se quatro ensaios no Rio Pirajussara (figura 24). A distância entre o lançamento do traçador e a estação de detecção foi de 2000 metros aproximadamente, superior em dez vezes a distância mínima de homogeneização representada pela equação (10), no caso de uma injeção lateral.

Os erros de medição que poderiam ser cometidos estavam ligados a falta de homogeneização, perda do traçador por precipitação ou adsorção pelo solo e ou algas do leito e baixa atividade do traçador injetado.

O Rio Pirajussara, no trecho escolhido para ensaio (figura 24), corre através de um canal aberto. Sua água tem fluxo laminar passando ao regime turbulento em alguns pontos, facilitando assim a dispersão e homogeneização do traçador injetado.

Lançou-se a solução traçadora em um trecho do rio onde ele está sendo canalizado e detetou-se a onda radioativa a jusante, em uma seção onde a parede do canal tinha sido solapada por infiltração secundária de água.

Calculou-se a atividade mínima a injetar pela fórmula (43), levando-se em conta a tabela V.

A solução traçadora foi o ^{82}Br (tabela IV) dissolvido em solução de tiosulfato de sódio. Parte dela foi fracionada em quatro frascos de aproximadamente 30 ml, pesados em balança analítica.

Nestas medições utilizaram-se os mesmos equipamentos descritos anteriormente, ou seja, uma bomba de 1/4 HP com vazão máxima de 100 l/min, tambor de medição (figura 17), cintilador com cristal de NaI (Tl), escalímetro integrador e

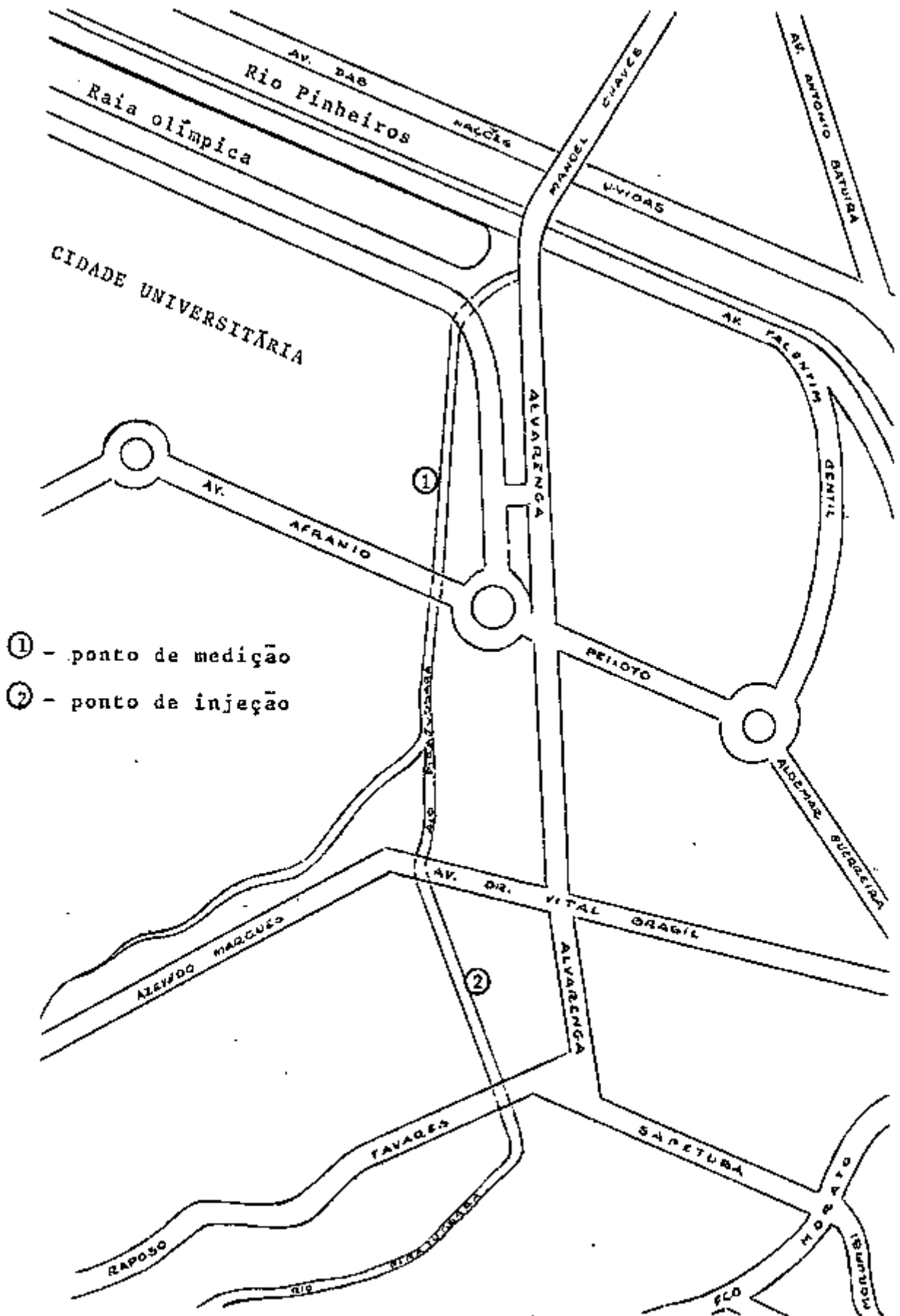
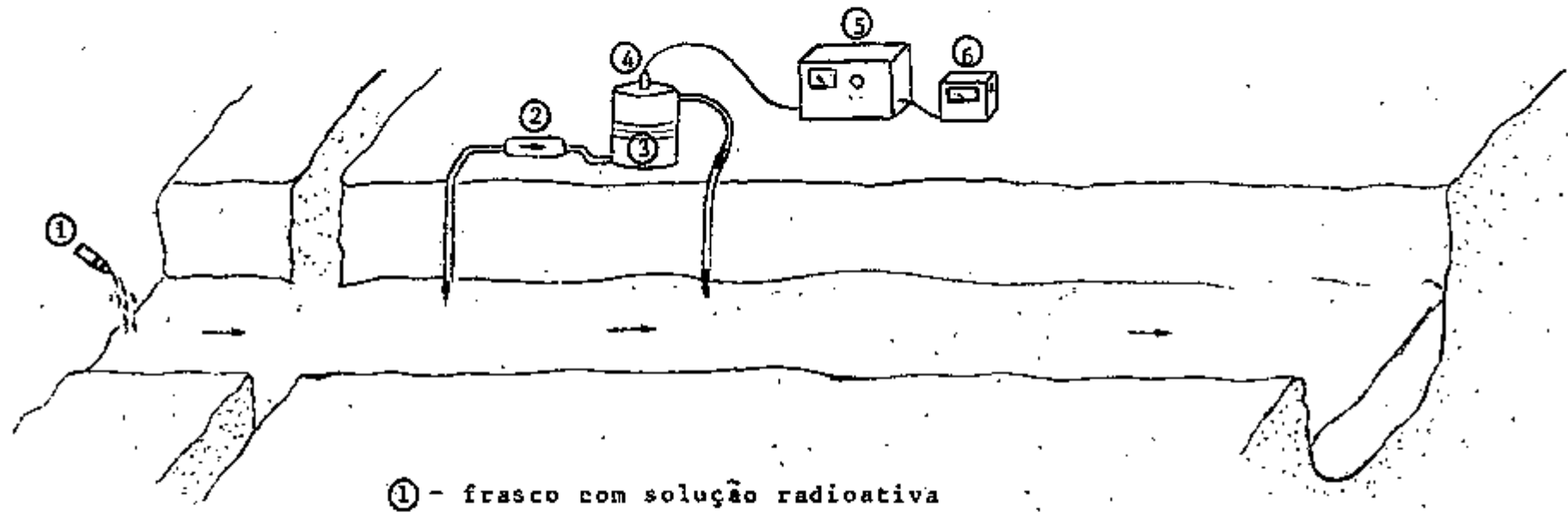


FIGURA 24 - Planta de situação do Rio Pirajussara no local onde foram realizados os ensaios de medição de vazão por método radioisotópico.

FIGURA 25 - Esquema da aparelhagem usada na medição da vazão volumétrica do Rio Pirajussara



- ① - frasco com solução radioativa
- ② - bomba
- ③ - tambor de medição
- ④ - detetor de cintilação
- ⑤ - escalímetro e integrador
- ⑥ - registrador de fita

T A B E L A X I

RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DA "CONTAGEM TOTAL" NO RIO PIRAJUSSARA EM 10 DE ABRIL DE 1973

ENSAIO Nº	Δt (min)	RG (contagem)	C_{CB} (contagem)	C_{CL} (contagem)	PÊSO DA SOL. (GRAMAS)	e^x	C_{KC} (contagem)	Q (m^3/s)
1	330	101.610	281.770	180.160	36,6821	0,899	161.916	0,850
2	290	80.920	258.280	177.360	36,8443	0,910	161.398	0,856
3	210	73.532	250.800	177.268	37,9102	0,934	165.568	0,859
4	180	84.210	253.800	169.590	36,5562	0,943	159.923	0,857

$P = 3.749.987 \text{ cps/g/l}$

$\bar{Q} = 0,856 \pm 0,0039$

registrador gráfico (figura 25).

Com o uso do registrador gráfico pode-se perceber visualmente a passagem da onda radioativa até chegar à contagem de fundo.

As contagens obtidas nos ensaios de campo (tabela XI) e as referentes a calibração do cintilador foram corrigidas por decaimento a um tempo $t = 0$.

Oteve-se o fator de calibração com o uso de uma alíquota da solução traçadora e calculou-se a vazão pela fórmula (36).

IV.4 CONCLUSÕES E OBSERVAÇÕES

Pelos resultados das experiências pode-se observar a validade dos métodos utilizados em diferentes meios. O ensaio em tubulação... foi feito com água corrente potável, o da canalização, no esgoto de Santos e o último no Rio Pirajussara.

Os dados obtidos em laboratório poderiam ser melhorados, se tivéssemos realmente um regime constante (como no caso do Rio Pirajussara) e a bomba utilizada fosse insensível às frequentes variações de tensão.

Nos ensaios em tubulação, o método da Contagem Total apresentou um desvio padrão $1/3$ superior ao do método do Dois Picos. Isto não significa que este resultado é o mais correto, mas sim o que mais se adaptou às condições da experiência. Realmente, este último método não foi atingido pelas variações de tensão, por ser o tempo de medição relativamente curto e porque somente nos interessava o intervalo de tempo transcorrido entre a passagem do "pico" pelos dois detectores.

Na canalização, o desvio padrão também foi elevado, mas se considerarmos o espaço de tempo em que ocorreram os ensaios de medição, podemos notar a causa. Durante a realização do trabalho, a vazão variou conforme constatado pela leitura da régua. Fez-se uma comparação entre cada medida e o

respectivô nível do esgoto lido na régua, de acôrdo com os dados das tabelas IX e X. Dai construíram-se as curvas da figura 22. Observa-se que de fato as duas curvas se comportam de maneira análoga, com excessão de poucos pontos. Provavelmente, foram estes os que sofreram os efeitos da variação de tensão na bomba ou ainda devido a um parcial entupimento do filtro da válvula de sucção do sistema detetor.

Nas medições realizadas no Rio Pirajussara, a bomba era nova e a eletricidade fornecida vinha direto de um poste com transformador, sendo constatado também que a vazão não se alterou durante o período de ensaios. Com isto alcançou-se um desvio padrão ótimo nos ensaios realizados, demonstrando que de fato, o método da Contagem Total proporciona boa precisão.

Uma comprovação da inoperância do método convencional de colorimetria, quando o meio não é límpido, foi mostrada quando da realização dos ensaios de medição de vazão de esgoto em Santos. Simultaneamente com os traçadores radioativos realizaram-se ensaios com Rodamina B, que não chegaram a resultados reproduzíveis, pois o meio não era o ideal ao uso deste traçador.

Nossas experiências tinham por objetivo um melhor conhecimento dos métodos descritos, muito pouco utilizados em nosso País, e das dificuldades a serem enfrentadas na prática.

Para finalizar, pode-se dizer que o uso sistemático de métodos radioisotópicos na determinação de vazões volumétricas, quando convenientemente aplicados, são relativamente simples e de baixo custo. Por isto tudo, é de se esperar que estes métodos tenham seu uso incrementado em futuro próximo.

BIBLIOGRAFIA

- ANDRÉ, H. - "Hydrométrie pratique des cours d'eau".
ENSEHRMA Section Hydraulique, Faculté des
Sciences, Grenoble, 88 p.
- BALLOFFET, Gotelli, Meoli - "Hidráulica". Ediar Soc.
Anon. Editores, seg. edição (1962).
- BAUMEISTER, Marks - "Mechanical Engineers". Interna-
tional Student Edition. McGraw-Hill-book
Company, 1958.
- CASTAGNET, A.C. - "Curso de Aplicação de Radioisóto -
pos nas Indústrias de Petróleo, Gás e
Petroquímica". Apostila no prelo.
- DANIELS, F. e R.A. Alberty "Físico Química". Ao Li-
vro Técnico, 1960.
- GARCEZ, L.N. - "Hidrologia". Editora Edgard Blucher
Ltda., 1967.
- GARDNER, R.P. and Ralph L. Ely, Jr - "Radioisotope
Measurement applications in Engineering
Reinhold Publishing Corporation, New York.
1967.
- GOMEZ, H.R. - "Aplicacion de Radioisotopos en
Hidrologia". 6º curso Regional, Univer-
sidad Nacional de Cuyó, Argentina -1970
- GUIZERIX, J., et all - "Les mesures de débits
effectueés en France a l'aide de
traceurs radioactifs por la methode d'
integration. Radioisotopes in Hydrology
(Proc.Symp.Tokyo 1963), 255-279 IAEA

Viena-1964.

- HOLMAN, J.P. - "Experimental Methods for Engenieers".
MacGraw-Hill Book Company, 1966.
- HULL, D.E: - "Dispersion and Persistence of tracer in
river flow measurements". Intern. Journal
of Applied Radiation and Isotopes, vol.13,
pp. 63.73, 1962.
- HULL, D.E. - "The Total Count Technique; a new princi-
ple in flow measurements". Int. J. Appl.Ra
diat. Isotops, vol.4, pp.1-15, 1958.
- HULL, D.E., et all - "Flow measurements by the Total
Count method". Repr. from 2nd Un Geneve
Conference.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - "Guide to the Sa-
fe Handling of Radioisotops in Hidrology".
IAEA, Viena, Safety series, num.6, 1966.
- KAPLAN, Irving - "Física Nuclear". Ediciones Aguilar S.
A. - 1962.
- KAUFMANN, W.J. e Orlob, G.T. - "An Evaluation of
Ground-Water Tracer". Trans. Am. Geophysics
Union, nº 37, 297-306, 1956.
- KORSUNSKY, M. - "The Atomic Nucleus". Foreign Languages
Publishing House - 1962. Moscow
- MASAO, Kato et all - "A study in River engineering on
the Rad. in Hydrology". Proc. of a Symp. -
Tokyo, 1962.

- MOLINARI, J. - "Les traceurs salins et fluorescentes em hidrologie". DR/SAR G/69-15/JM/MCT.
- MONDREGO, S.P. e A. Plata - "Radiaciones ionizantes" Ed. El Ateneo S.A., Barcelona - 1965.
- OHLWEILER, O. Alcides - "Introdução à Química Geral" Editôra Globo S.A. - 1967.
- PLATA, A.B. - "Isotopos en Hidrologia". Editorial Alhambra S.A. 1a. edic. - 1972.
- PUTMAN, J.L. - "Isotopes". Ed. Penguin Books Ltd. Baltimore - 1960.
- RUMYANTSEV, S. - "Industrial Radiology". Foreign Langages Publishing House - Moscow -1968.
- SIENKO, J. Michell e R.A. Plane - "Química". Ediciones Aguilar S.A. - 1966.
- SCHOELLER, H. - "Les eaux souterraines". Ed. Masson et Cie, Paris - 1962.
- SANCHEZ, Wladimyr - Tese de doutoramento - IEA -1973.
- TIMBLIN et all - "Use of rad. for open channel flow measurements". Proc. of a Symp. Tokyo - 1962.
- TOSOVAC, T. et all - "Study of the dispersion ability and some other characteristics of the Danube by nuclear techniques". SM 129/30. Symp. on the use of isotopes in Hydrology Viena - 1970.