

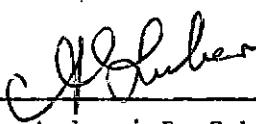
i

DISPERSÃO DE TRAÇADOR EM MEDIÇÕES DE VAZÕES
EM TUBULAÇÕES

JOÃO SÉRGIO FAJARDO ROLDÃO

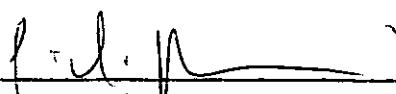
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

Aprovado por :


Prof. Andrzej B. Zuber

Presidente


Prof. Rui Carlos V. da Silva


Prof. Giulio Massarani


Prof. José de Júlio Rozenthal

RIO DE JANEIRO
ESTADO DA GUANABARA - BRASIL
JANEIRO DE 1973

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

Agradeço ao Prof. Andrzej B. Zuber a eficiente orientação nas fases de preparação, realização e interpretação das experiências realizadas.

Agradeço também ao "team" da Divisão de Aplicação de Radioisótopos do I.E.N., pela valiosa colaboração nas experiências de campo.

Agradeço a COPPE, ao BNDE e a AIEA o apoio financeiro que, direta ou indiretamente, tornou possível este trabalho.

RESUMO

Este trabalho resultou da necessidade de se medir vazões no sistema de refrigeração de uma fábrica de borracha (FABOR) e no sistema de abastecimento de água do complexo petroquímico de Duque de Caxias , Estado do Rio de Janeiro (principalmente , REDUC e FABOR).

As medições foram realizadas pelo Método Pico-a-Pico , com o auxílio de dois conjuntos de medição completamente independentes . É mostrado que uma precisão melhor que noventa e nove por cento, ou seja , erros inferiores a um por cento , pode ser facilmente obtida por este método , em determinações da velocidade média do escoamento. Em geral , a precisão da vazão depende em grande parte da precisão da área da seção transversal da tubulação.

É proposto aqui um novo e aperfeiçoado método de interpretação , bem como se apresenta um completo procedimento de medição.

Uma análise do coeficiente de dispersão experimental mostrou excelente concordância com o valor teórico , para uma tubulação reta e um considerável acréscimo deste valor para tubulações com curvas , válvulas , derivações , etc. Os valores reais obtidos para o coeficiente de dispersão estão sendo utilizados no planejamento de outros trabalhos semelhantes.

A análise das curvas de dispersão medidas (picos) parece in-

dicar que uma melhor descrição teórica é obtida quando se aplica uma nova solução da equação da dispersão.

ABSTRACT

This work resulted from a need to measure flow rates in the cooling system of a rubber factory (FABOR) and in the water supply system of whole petrochemical complex in Duque de Caxias , State of Rio de Janeiro (mainly REDUC refinery and FABOR factory).

Measurements were performed by the so-called Peak-to-Peak method with two completely independent measuring systems.

It has been shown that an accuracy better than one percent is easily obtainable by this method for the flow velocity measurement. Overall accuracy of the flow rate depends finally on the accuracy of the cross-section area of the pipeline.

A new , improved, method of interpretation has been proposed and a complete measurement procedure worked out.

Analyse of the dispersion coefficient showed a very good agreement with theoretical value for a smooth pipeline , and a considerable increase of its value for pipelines with bends, valves, etc. Obtained real values of the dispersion coefficient were already used for the planning of other similar works.

Analyse of the measured dispersion curves (peaks) seems to indicate that a better theoretical description is obtained when a new solution of the dispersion equation is applied.

I N D I C E

1 - Introdução.	.1.
2 - Dispersão de um Traçador Introduzido em um Escoamento Turbulento.	.3.
3 - Teoria do Método da Velocidade	.11.
3-1 - Método da Velocidade com um Ponto de Medição.	.14.
3-2 - Método da Velocidade com Dois Pontos de Medição. (Método Pico-a-Pico)	.21.
4 - Utilização do Método Pico-a-Pico para Determinação de Vazão em Tubulações.	.23.
4-1 - Escolha do Traçador.	.24.
4-2 - Distância de Boa Mistura.	.26.
4-3 - Arranjo Experimental.	.32.
4-4 - Análise do Erro.	.38.
4-4-1 - Precisão Esperada em uma Medição de Vazão pelo Método Pico-a-Pico.	.39.
4-4-1-1 - Influência da Precisão de Δx .	.41.
4-4-1-2 - Influência de V .	.41.
4-4-1-3 - Influência de ΔP_0 .	.43.
4-4-1-4 - Influência de D .	.48.
4-5 - Planejamento de uma Experiência de Medição de Vazão pelo Método Pico-a-Pico.	.48.
4-5-1 - Cálculo do Tamanho da Nuvem de Traçador e Outros Parâmetros dele Dependentes.	.49.
4-5-2 - Cálculo da Atividade a Ser Injetada e os Parâmetros dela Decorrentes.	.52.

5 - Determinação do Coeficiente de Dispersão Experimental.	.58.
5-1 - Método da Diferença das Variâncias.	.58.
5-2 - Método da Metade da Altura Máxima do Pico.	.62.
5-3 - Método da Metade da Concentração Associada ao Tempo de Trânsito do Escoamento.	.66.
5-3-1 - Aplicação à Solução Normal.	.67.
5-3-2 - Aplicação à Solução da Equação de Difusão Derivada por Lenda e Zuber	.70.
5-4 - Comparação entre os Métodos Anteriores.	.73.
6 - Experiências Realizadas.	.76.
6-1 - Experiências na FABOR.	.76.
6-1-1 - Descrição Geral.	.76.
6-1-2 - Resultados das Medidas de Vazões.	.84.
6-1-3 - Segurança Radiológica.	.86.
6-2 - Experiências na REDUC.	.87.
6-2-1 - Experiências na Adutora de Saracuruna.	.89.
6-2-2 - Experiência na Adutora de Registro.	.94.
6-2-3 - Experiências na Adutora Mato Grosso.	.97.
6-2-4 - Segurança Radiológica.	.100.
7 - Discussão.	.102.
8 - Conclusões.	.117.
Referências Bibliográficas.	.120.

SÍMBOLOS UTILIZADOS

LETROS LATINAS

- A = atividade (ou massa) do traçador injetado na tubulação.
- a = abundância do fóton; probabilidade de aparecimento deste fóton em cada desintegração.
- C (x,t) = concentração de traçador em um instante e ponto qualquer.
(t = t₁ = fixo.)
- C (t) = concentração de traçador em um instante t qualquer.
(x = x₁ ou x = x₂ fixos)
- C = o mesmo que C (t).
- C_{max.} = concentração máxima de traçador sob um ponto fixo.
- D = diâmetro interno da tubulação.
- e^m = espessura de parede metálica (aço ou ferro).
- e^c = espessura da parede do revestimento de concreto.
- F = fator de sensibilidade ou sensibilidade do detector de radiação.
- F_A = fator de absorção.
- F_G = fator geométrico.

- F^∞ = sensibilidade para condições infinitas.
- K = coeficiente de dispersão, válido para o trecho de tubulação injeção $\rightarrow x = x_1$.
- K_{1+2} = coeficiente de dispersão válido para o trecho entre os pontos de detecções.
- k = constante. relação entre a distância entre detectores e o comprimento da nuvem.
- M = distância associada a T' , medida diretamente no papel do registrador.
- N = comprimento da nuvem de traçador.
- P = distância medida diretamente no papel do registrador.
- P_0 = distância medida sobre o papel do registrador, associada a t_0 .
- P^i = distâncias medidas sobre o papel do registrador a t^i , onde $i = 1, 2, 3, \dots, 7$.
- $P'_{0,5}$ = distância medida no papel do registrador, associada a $t'_{0,5}$.
- $P''_{0,5}$ = distância medida no papel do registrador, associada a $t''_{0,5}$.
- $P^*_{0,5}$ = $P^*_{0,5} - P'_{0,5}$ = distância medida sobre o papel do registrador, associada a $T_{0,5}$.
- ΔP_0 = distância medida diretamente sobre o papel do registrador, associada a Δt_0 .

- $Pe_{1\frac{1}{2}}$ = número de Peclet, relativo ao escoamento que se processa entre $x = x_1$ e $x = x_2$.
- Q = vazão transitante na tubulação.
- R = taxa de contagem.
- R_{max} = taxa de contagem máxima.
- r = raio interno da tubulação.
- Re = número de Reynolds.
- S = seção transversal da tubulação.
- t = tempo decorrido, a contar do instante da injeção.
- t^1 = tempo associado ao máximo de $C(t)$.
- t_1 = tempo fixo qualquer.
- t^2 = tempo para o qual metade da atividade injetada passa pelo ponto fixo.
- t^3 = tempo definido pelo momento de 1a. ordem (média aritmética) "tempo médio de trânsito do traçador".
- t^4 = tempo definido pela média harmônica de $C(t)$.
- t^5 = tempo determinado graficamente pelo método proposto por CLAYTON e EVANS⁹.
- t^6 = tempo determinado pelo método das paralelas.
- t^7 = tempo determinado pelo método das aproximações sucessivas de LENDA e ZUBER⁷.

- $(t_0)_1$ = tempo médio de trânsito do escoamento entre o ponto de injeção e $x = x_1$.
- $(t_0)_2$ = tempo médio de trânsito do escoamento entre o ponto de injeção e $x = x_2$.
- $t'_{0,5}$ = menor tempo associado à metade da concentração máxima, ou à metade da concentração relativa a t_0 .
- $t''_{0,5}$ = maior tempo associado à metade da concentração máxima, ou à metade da concentração relativa a t_0 .
- $T_{0,5}$ = $t''_{0,5} - t'_{0,5}$ = intervalo de tempo para o qual as concentrações do traçador são maiores que a metade da concentração máxima.
- T' = tempo de trânsito da nuvem por um ponto fixo.
- Δt_0 = tempo médio de trânsito do escoamento entre os pontos fixos $x = x_1$ e $x = x_2$.
- U = velocidade média do escoamento.
- V = velocidade do papel do registrador.
- V_L = volume em que está diluída a atividade do traçador.
- U_* = velocidade de atrito ou de fricção.
- x = distância do ponto de injeção medida segundo o eixo da tubulação.
- x_1 = distância fixa - distância injeção \rightarrow la. detecção.
- \bar{x} = abcissa do eixo de simetria de $C(x)$, ou de $C(x)_{\max}$.

- x_2 = distância fixa - distância injeção \rightarrow 2a. detecção.
- Δx = distância entre os pontos fixos - distância entre os pontos de detecções.
- X = distância referida a um ponto que se move com velocidade U .

LETRAS GREGAS

- λ = coeficiente de fricção para tubulações lisas.
- μ^m = coeficiente de absorção de massa, relativo a parede metálica (ferro ou aço).
- μ^c = coeficiente de absorção de massa, relativo ao revestimento de concreto.
- ν = coeficiente de viscosidade cinemática.
- ρ = densidade absoluta do líquido.
- σ = desvio padrão.
- σ_t^2 = variância da curva $C(t)$ (dimensional).
- σ_p^2 = variância da curva $C(p)$ (dimensional).
- σ_x^2 = variância da curva $C(x)$.
- σ_t^{*2} = variância adimensional, calculada a partir da curva $C(t)$
- $\Delta \sigma_t^{*2}$ = diferença entre as variâncias adimensionais, relativas aos pontos $x = x_2$ e $x = x_1$.

SUB - ÍNDICES

- 1 indica que a grandeza é calculada para o ponto fixo
 $x = x_1$.
- 2 indica que a grandeza é calculada para o ponto fixo
 $x = x_2$.
- 1→2 indica que a grandeza está relacionada ao trecho Δx ,
situado entre $x = x_1$ e $x = x_2$.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Medições de vazões através de métodos que utilizam traçadores radioativos, estão se tornando cada vez mais importantes devido a grande precisão que pode ser atingida, e a relativa facilidade com que podem ser realizadas.

Como consequência, porém, do fato de tais métodos não possibilitem medições contínuas e do relativo alto custo, suas utilizações são indicadas para os casos de medições esporádicas onde grandes precisões são exigidas; e para certos casos especiais onde o emprego de outras técnicas é impossível ou incoveniente.

Assim, sendo, enquadram-se como situações típicas do emprego de traçadores radioativos, testes de performances de grandes máquinas hidráulicas (bombas e turbinas) e calibrações de dispositivos convencionais de medições contínuas.

O presente trabalho baseia-se em determinações de vazões realizadas no sistema de refrigeração da FABOR e no sistema adutor de Saracuruna, que abastece de água a REDUC. Ambas as indústrias petro-químicas localizam-se no município de Duque de Caxias (R.J.).

O fato das medições terem sido ocasionais e dos interessados desejarem boa precisão nas medições justificaram o emprego de métodos que utilizam traçador radioativo..

Dentre estes métodos, o escolhido foi o Método Pico-a-Pico. Sua aplicação, embora restrita aos casos em que a seção da tubulação é definida e conhecida, é feita com grande simplicidade, uma vez que a introdução do traçador no escoamento é realizada sem o uso de injetores sofisticados, e a detecção, quase totalmente automatizada, dispensa acesso ao interior da tubulação.

Este trabalho contém, além da descrição das experiências realizadas, a teoria, a análise dos erros, e o predimensionamento de uma medição de vazão pelo Método Pico-a-Pico. É feito um estudo comparativo dos vários métodos de interpretação dos dados experimentais.

Coeficientes de dispersão foram calculados para casos não descritos pela teoria e os resultados estão sendo utilizados para planejar futuras experiências.

CAPÍTULO 2

DISPERSÃO DE UM TRAÇADOR, INTRODUZIDO EM UM ESCOAMENTO TURBULENTO

A base teórica do método utilizado neste trabalho de determinação de vazões em tubulações, está relacionada com a dispersão experimentada por um solúvel, ao ser introduzido em um escoamento.

Torna-se portanto indispensável analisar o processo de dispersão, antes de considerar o método propriamente dito.

O mecanismo responsável pela dispersão observada em tubulações sujeitas a escoamentos turbulentos, é identificado como sendo fenômeno de DIFUSÃO HIDRODINÂMICA. Um dos modelos matemáticos que, macroscopicamente descrevem a dispersão longitudinal sofrida pelo traçador ao ser transportado pelo escoamento, é descrito pela equação de difusão, do tipo :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

onde,

$C = C(x,t) =$ concentração do traçador.

$K =$ coeficiente de dispersão, por hipótese constante,

$U =$ velocidade média do escoamento.

Introduzindo-se a variável

$$X = x - U t \quad (2)$$

e substituindo-a em (1) temos :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (3)$$

A equação (2) ocasiona uma mudança no sistema de referência, que se torna lagrangiano. A distância definida agora por X , está referida a um ponto que se desloca com uma velocidade igual à velocidade do escoamento.

A forma sob a qual aparece a solução da equação (3) está intimamente ligada às condições limites que definem o tipo de injeção e à geometria do meio em que a difusão se desenvolve.

No caso em estudo, admite-se que no instante da injeção, o traçador distribui-se homogeneamente por uma superfície S , transversal à tubulação cilíndrica, assim sendo,

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4)$$

onde,

$$D = \text{diâmetro interno da tubulação.}$$

No Capítulo 5-3-2, uma outra solução da equação de difusão (1) será apresentado.

A solução da equação (3), válida para o tipo teórico de injeção que caracteriza a injeção planar instantânea, conhecida e apresentada por vários autores, como GARDNER e ELY¹ e CRANK², é :

$$C(x,t) = \frac{A}{2 S \sqrt{\pi K t}} \exp \left[\frac{-x^2}{4 K t} \right] \quad (5)$$

onde,

A = quantidade total de traçador introduzido no escoamento.

Substituída a equação (2), na (5) resulta.:

$$C(x,t) = \frac{A}{2 S \sqrt{\pi K t}} \exp \left[\frac{-(x - U t)^2}{4 K t} \right] \quad (6)$$

Esta equação, além de permitir a previsão da concentração de traçador, é muito importante, pois é o ponto de partida para o cálculo da quantidade de material traçador a ser injetado e para a avaliação da possibilidade de danos à saúde causados pelo traçador.

Para tanto é necessário que se conheça o valor de K , cuja determinação pode ser feita teórica ou experimentalmente.

A determinação teórica de K , para escoamentos através de tubulações industriais, onde o número de singularidades é variável, é um problema muito intrincado, que até agora não foi resolvido satisfatoriamente. Singularidades tais como curvas, bombas, derivações e filtros, provocam uma turbulência adicional, que faz aumentar o coeficiente de dispersão. Em vista disto, o que pode ser feito é utilizar como base para os cálculos, o coeficiente de dispersão teórico, multiplicado por um certo fator de segurança.

Quando se fizer necessário, por questão de economia ou de segurança, este coeficiente pode ser obtido experimentalmente através da análise de uma experiência-piloto ou por comparação com experiências anteriores, realizadas para situações similares.

Uma determinação teórica deste coeficiente em função de parâmetros representativos da geometria do conduto e do escoamento foi obtido por TAYLOR³, em 1954.

No seu trabalho, considerado clássico, baseando-se no Princípio da Conservação da Massa, na Analogia de Reynolds e na Lei Universal da Distribuição da Velocidade, conclui TAYLOR³ a seguinte expressão teórica para K :

$$K = 10,1 r v_* \quad (7)$$

onde,

r = raio interno da tubulação,

v_* = velocidade de fricção.

Este coeficiente inclui a ação dispersora proveniente da variação do perfil radial de velocidade e da difusão turbulenta, não levando em conta a difusão molecular.

É importante ressaltar que as equações (6) e (7) foram deduzidas sob hipóteses bastante restritivas, de modo que suas aplicações simultâneas limitam-se aos casos onde as seguintes condições são preenchidas :

1. Conservação da Massa do Traçador,
2. Escoamento Permanente Uniforme,
3. Tubulação Reta e Lisa,
4. Injeção Planar Instantânea, e ,
5. Escoamento Turbulento Plenamente Desenvolvido.

De modo a facilitar a determinação de K , a equação anterior, que é básica, pode ser apresentada graficamente em função do número de Reynolds do escoamento. Para tanto, é interessante reescrevê-la sob a forma :

$$\frac{U}{v_*} = \frac{10,1 r U}{K} \quad (8)$$

Estabelecendo-se um balanço entre as forças que atuam sobre a porção de líquido compreendida entre duas seções transversais à direção do movimento, deduz-se :

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \lambda \rho U^2 \quad (9)$$

onde,

τ_0 = tensão de fricção da parede,

λ = coeficiente de fricção para tubos lisos,

ρ = densidade absoluta do líquido.

Baseando-se na definição da velocidade de atrito, v_* , e na hipótese de Prandtl relativa à tensão cizalhante, válida para o escoamento turbulento, obtém-se :

$$\frac{v_*}{U} = \frac{1}{U} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (10)$$

A equação que se segue é a conhecida "Lei Universal de Prandtl para a fricção em tubulações lisas". Sua dedução, bem como a das equações (9) e (10), são apresentadas com detalhes por SCHLICHTING⁴.

$$\frac{1}{\lambda} = 2,0 \log (\text{Re} \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (11)$$

onde,

Re = Número de Reynolds.

O Número de Reynolds, indicador do regime de escoamento, é dado por :

$$\text{Re} = \frac{U D}{v} \quad (12)$$

onde,

v = coeficiente de viscosidade cinemática do líquido.

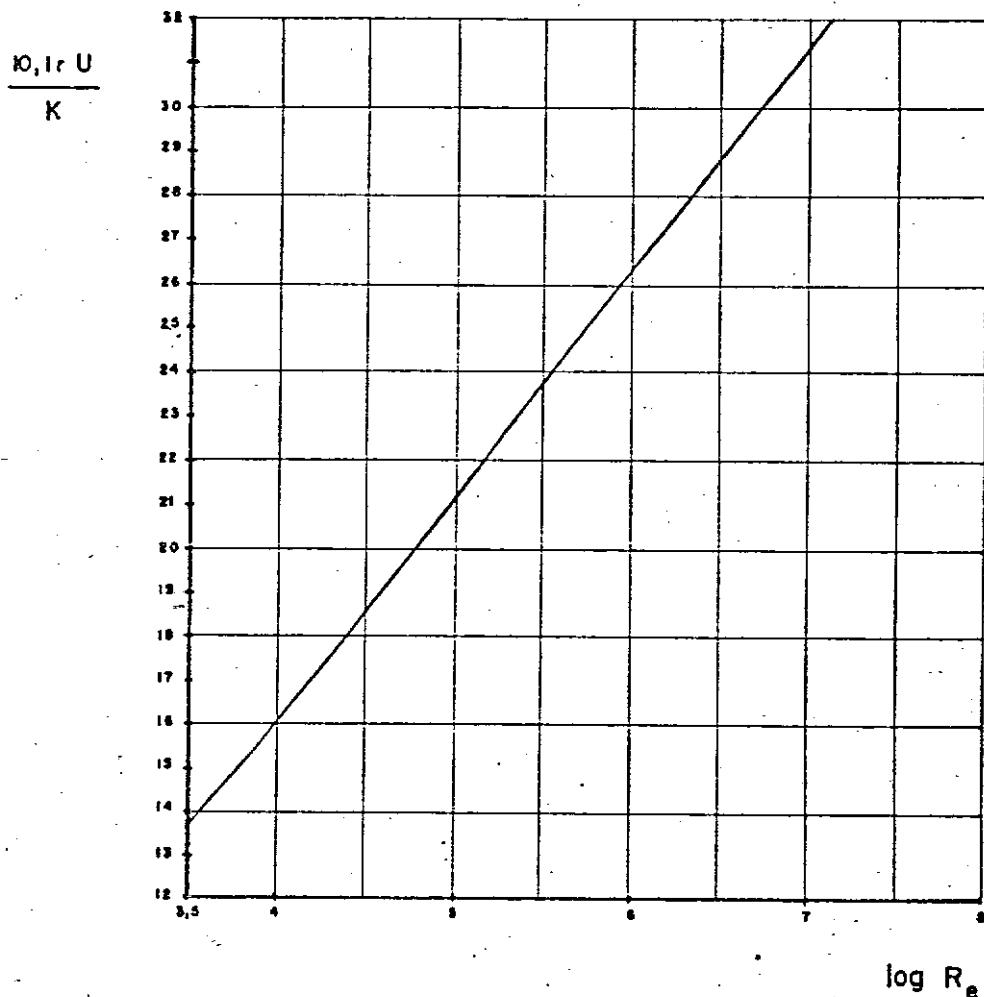
Pela substituição de (9) em (10) obtém-se imediatamente :

$$\frac{v_*}{U} = \sqrt{\frac{1}{8} \lambda} \quad (13)$$

Combinando-se as equações (11) e (13) consegue-se que :

$$\frac{U}{v_*} = - 5,66 \log \frac{U}{v_*} + 5,66 \log \text{Re} + 0,29 \quad (14)$$

Com o objetivo de facilitar o cálculo do coeficiente de dispersão teórico, a equação (14) foi tabelada. Tendo em vista a relação (8) os valores então obtidos foram plotados, obtendo-se assim o gráfico apresentado na FIGURA 1.

FIGURA 1

Relação gráfica entre o coeficiente de difusão e o número de Reynolds.

Através da utilização do gráfico anterior, torna-se simples a determinação do valor teórico do coeficiente de difusão, em função de parâmetros representativos da geometria e do regime de escoamento.

CAPÍTULO 3

TEORIA DO MÉTODO DA VELOCIDADE

O desenvolvimento analítico que se segue, tem por objetivo apresentar os fundamentos do Método da Velocidade.

Este método permite calcular a velocidade média do escoamento, através do estudo da dispersão sofrida pelo material utilizado como traçador.

Partindo-se da hipótese de que o traçador pode ser observado em um tempo fixo qualquer, para a qual

$$t = t_1 \quad (15)$$

a equação (6) que descreve a variação longitudinal da concentração toma a forma

$$C(x) = \frac{A}{2 S \sqrt{\pi K t_1}} \exp. \left[\frac{-(x - U t_1)^2}{4 K t_1} \right] \quad (16)$$

Pelo fato desta função ser uma função normal (Gauss), conclui-se que a curva desenhada por ela, é simétrica em relação a um ponto $x = \bar{x}$.

Como consequência, este ponto de simetria está associado ao máximo da função $C(x)$, além de dividir a área sob a curva representativa desta função em duas partes iguais. Estas propriedades, assim como a da $x = \bar{x}$ representar a abcissa do centro de gravidade da área sob a mesma curva, podem ser expressadas matematicamente por :

$$\bar{x} = x(C_{\max}) , \quad (17)$$

$$0,5 = \frac{\int_{-\infty}^{\bar{x}} C(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} C(x) dx} , \quad (18)$$

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x C(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} C(x) dx} . \quad (19)$$

No capítulo 3-1 serão apresentados outros métodos que podem também ser utilizados com o objetivo de identificar \bar{x} .

Em decorrência da função descrita pela equação (16) ser gaussiana, consegue-se que a concentração máxima ocorre para $x = U t_1$, onde,

$$x(C_{\max}) = U t_1 \quad (20)$$

Comparando-se as equações (17) e (20) obtém-se :

$$\bar{x} = U t_1 \quad (21)$$

Normalizando-se a equação (16) obtém-se :

$$\frac{C(x) S \bar{x}}{A} = \frac{1}{\sqrt{4 \pi \frac{K}{U \bar{x}}}} \exp \left[\frac{-\left[\frac{\bar{x}}{x} - 1 \right]^2}{4 \frac{K}{U \bar{x}}} \right] \quad (22)$$

O gráfico desta equação é apresentado na FIGURA 2, que se segue

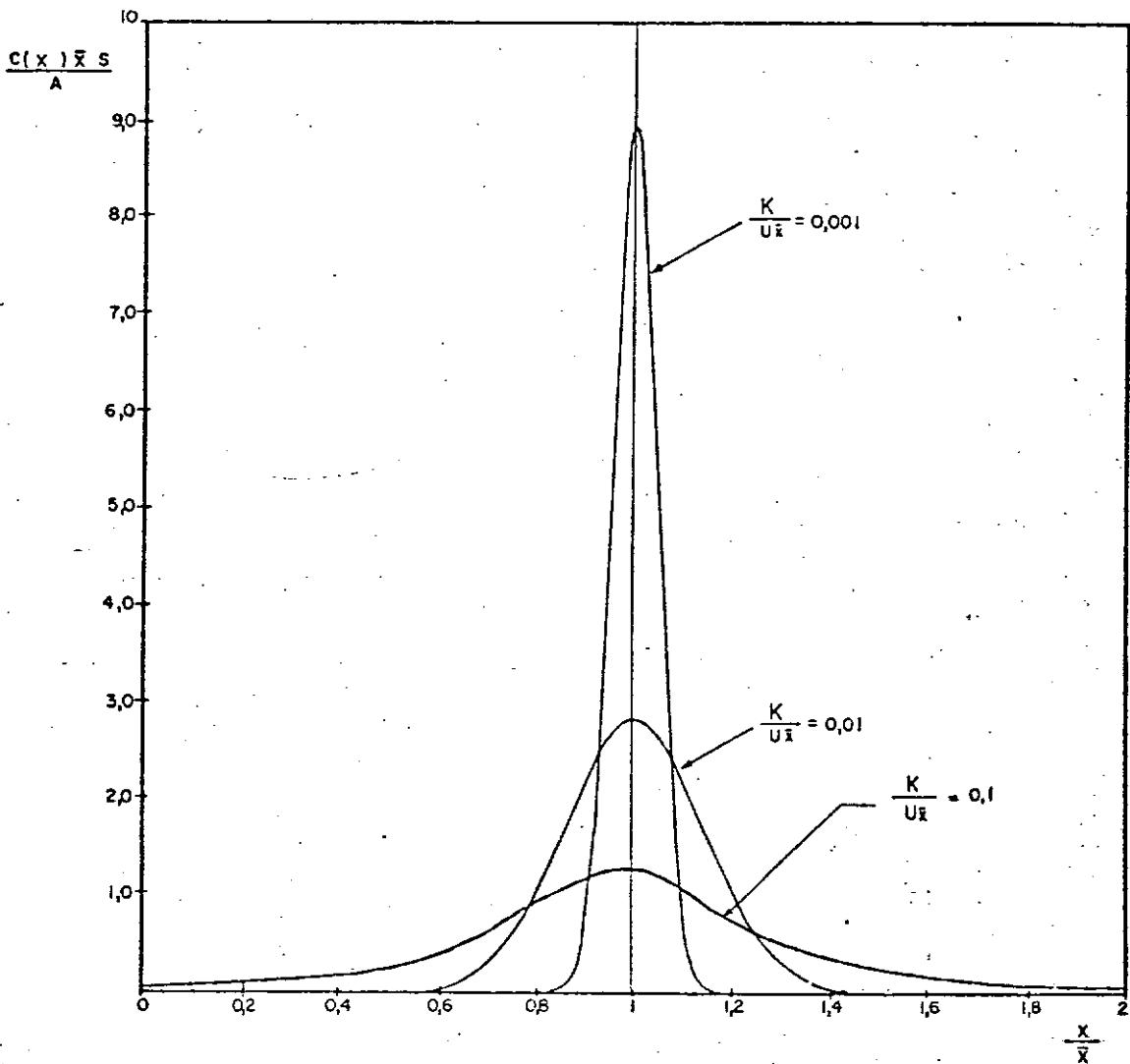


FIGURA 2

Variação longitudinal da concentração de traçador após um tempo $t = t_1$ - equação (22).

Conhecida, pois, a variação longitudinal das concentrações de traçador, em um determinado instante $t = t_1$, o valor do parâmetro \bar{x} , pode ser obtido, tendo como ponto de partida uma das equações (17), (18) ou (19), donde calcula-se a velocidade média do escoamento pela equação (21).

3-1 Método da Velocidade com um Ponto de Medição.

Na prática, a obtenção experimental da curva $C(x)$ é geralmente muito difícil, a não ser em casos especiais em que o traçador desloca-se com velocidade reduzida. Tal fato ocorre no estudo da movimentação de sedimentos (veja por exemplo COURTOIS⁵) e da diluição de um poluente (descrito por HANSEN⁶).

Nas determinações de vazões em tubulações industriais em que, normalmente, as velocidades de escoamento são relativamente grandes, o problema pode ser contornado pelo registro da passagem do traçador sob um ponto fixo.

Neste caso, a variação temporal da concentração do traçador para $x = x_1$ é expressa por :

$$C(t) = \frac{A}{2 S \sqrt{\pi K t}} \exp. \left[\frac{-(x_1 - U t)^2}{4 K t} \right] \quad (23)$$

Assim, um parâmetro adicional pode ser definido como

$$t_0 = \frac{x_1}{U} \quad (24)$$

Este parâmetro, conhecido como tempo médio de trânsito do escoamento é fundamental, pois permite o cálculo da velocidade média do escoamento, através da relação :

$$U = \frac{x_1}{t_0} \quad (25)$$

De modo a facilitar o conhecimento de t_0 , procura-se então identificar este parâmetro, que é relativo ao fluido marcado, com algum outro relacionado com o movimento do traçador.

Frequentemente, é suposto que t_0 identifica-se com t^1 , que está associado à passagem da concentração máxima do traçador sob o ponto x_1 . O erro decorrente de tal aproximação pode ser deduzido do desenvolvimento que se segue.

Normalizando-se a equação (23) obtém-se :

$$\frac{C(t) S x_1}{A} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4 \pi K}{U x_1} \frac{t}{t_0}}} \exp. \left[- \frac{(1 - \frac{t}{t_0})^2}{\frac{4 K}{U x_1} \frac{t}{t_0}} \right] \quad (26)$$

Na FIGURA 3, que se segue, é apresentado o gráfico da equação anterior :

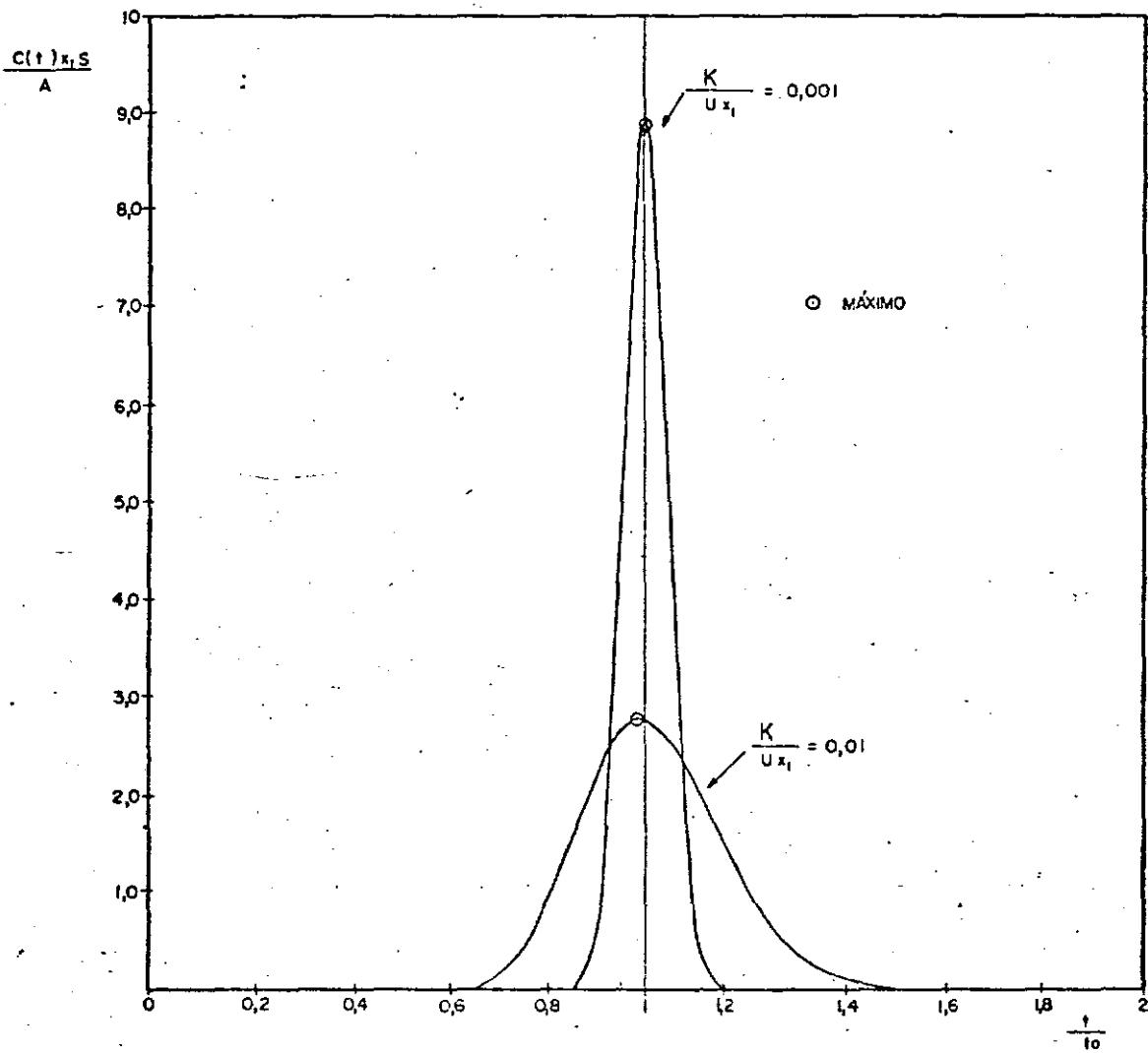


FIGURA 3 Curva normalizada da variação temporal da concentração de traçador sob um ponto fixo, $x = x_1$ - equação (26).

Definindo-se t^1 , através de uma equação similar à equação (17) obtém-se :

$$t^1 = t (C_{\max}) \quad (27)$$

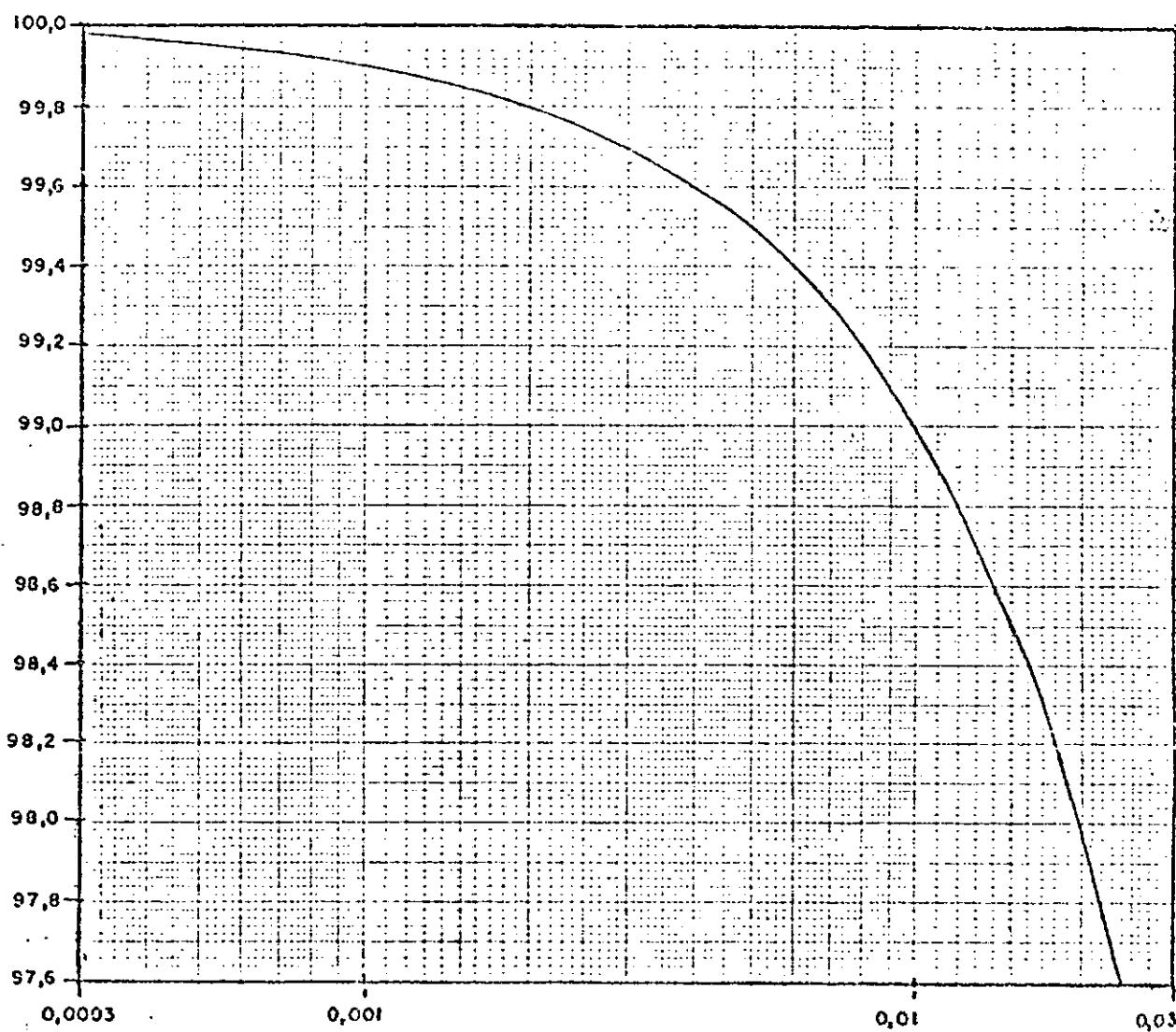
O cálculo do máximo da função definida pela equação (26) leva a seguinte relação :

$$\frac{K}{Ux_1} = \frac{1 - (\frac{t^1}{t_0})^2}{2 (\frac{t^1}{t_0})} \quad (28)$$

Esta relação pode ser escrita sob a forma

$$\frac{t^1}{t_0} = \sqrt{1 + \left[\frac{K}{Ux_1} \right]^2} - \frac{K}{Ux_1} \quad (29)$$

Para melhor visualizar o erro que se comete ao identificar t_0 por t^1 , a equação (29) está plotada na FIGURA 4 para um intervalo de valores de $\frac{K}{Ux_1}$, que normalmente ocorre em tubulações industriais.



$$\frac{k}{Ux_1}$$

FIGURA 4 Variação da relação $\frac{t_1}{t_0}$ em função do parâmetro $\frac{K}{Ux_1}$.
- equação (29) -

Analizando-se o gráfico apresentado na FIGURA 2, observa-se que, para grandes valores do parâmetro $\frac{K}{U \bar{x}}$, correspondem valores finitos de $C(x) \text{ S } \frac{\bar{x}}{A}$

que o traçador, dispersando-se no sentido contrário ao do escoamento, ultrapassa o ponto de injeção, o que nunca ocorre em tubulações industriais. Não obstante, a utilização da equação (6) ainda é válida, sob a condição de que

$$\frac{K}{U \bar{x}} \ll 1 \quad (30)$$

Esta condição foi indiretamente fixada por TAYLOR³ como necessária na obtenção de uma curva de variação de concentração aproximadamente simétrica.

LEND⁴ e ZUBER⁷ apresentam a equação (30) como a condição de aplicabilidade da equação (23), que sob esta restrição apresenta boa aproximação.

É comum também identificar-se o tempo médio de trânsito do escoamento com os tempos t^2 e t^3 definidos por :

$$0,5 = \frac{\int_0^{t^2} C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (31)$$

$$t^3 = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (32)$$

Estas relações, similares às (18) e (19), caracterizam os tempos t^2 e t^3 , associados respectivamente ao "centro da área" sob a curva $C(t)$ e ao centro de gravidade da mesma. O parâmetro t^3 é também conhecido como tempo médio de trânsito do traçador.

Na realidade várias tentativas de identificar t_0 foram feitas.

KORBEL⁸ introduziu uma outra forma de avaliar o tempo médio de trânsito do escoamento através da expressão da média harmônica.

$$t^4 = \frac{\int_0^\infty C(t) dt}{\int_0^\infty \frac{1}{C(t)} dt} \quad (33)$$

CLAYTON e EVANS⁹, por sua vez, propuseram um método gráfico de identificação de t_0 , através do tempo definido pelo ponto médio do segmento determinado pela curva de variação de concentrações e por uma reta paralela ao eixo das abscissas, que passa pelo terço inferior da amplitude das concentrações. Este tempo será representado por t^5 .

Um novo método, que leva a definição do parâmetro t^6 , foi utilizado na interpretação dos resultados obtidos na série de experimentos realizados. Trata-se de uma generalização do método anterior, onde o t_0 é identificado como a média dos valores médios dos segmentos determinados pela curva de variação de concentrações e um feixe de paralelas ao eixo dos tempos.

Teoricamente o tempo t^i , $i = 1, 2, \dots, 5, 6$ determinado pelos métodos antes descritos, variam muito pouco entre si. Não obstante, quando utilizados na identificação de t_0 , a partir de curvas experimentais de variação de concentrações, alguns podem conduzir a maiores precisões que outros.

As condições sob as quais tais afirmações se verificam, serão discutidas mais tarde.

3-2 Método da Velocidade com Dois Pontos de Medição. (Pico a Pico)

As dificuldades de se conseguir uma injeção planar, de caracterizar o exato instante em que o traçador é introduzido no escoamento, e a necessidade de minimizar o erro decorrente da determinação de t_0 , deram origem ao Método da Velocidade Pico a Pico.

Neste método, idealizado por ARIS¹⁰ e descrito também por BISHOFF e LEVENSPIEL¹¹, o que se determina é o tempo de trânsito entre dois pontos fixos $x = x_1$ e $x = x_2$ e não entre o ponto de injeção e o ponto $x = x_1$.

Partindo-se da definição do tempo de trânsito entre a injeção e cada um dos pontos fixos $x = x_1$ e $x = x_2$, obtém-se :

$$(t_0)_1 = \frac{x_1}{\bar{U}} \quad (34)$$

$$(t_0)_2 = \frac{x_2}{\bar{U}} \quad (35)$$

Os sub-índices, 1 e 2, indicam que as grandezas foram calculadas nos pontos $x = x_1$ e $x = x_2$ respectivamente.

Das relações (34) e (35) obtém-se :

$$\bar{U} = \frac{x_2 - x_1}{(t_0)_2 - (t_0)_1} \quad (36)$$

Nesta relação, o cálculo da velocidade média do escoamento, independe do conhecimento do instante da injeção, e o erro cometido na identificação do tempo médio de trânsito do escoamento é sensivelmente diminuído, já que tanto $(t_0)_1$ e $(t_0)_2$ estão afetados de defasagem no mesmo sentido, o que pode ser verificado diretamente na FIGURA 3.

CLAYTON e outros¹², através de análise numérica das equações (31) e (32), mostraram que, teoricamente, a identificação de t_0 com t_2 e t_3 conduz a valores de velocidade média diferentes entre si de 0,05% , quando se utiliza o Método Pico-a-Pico. Tal diferença pode ser considerada desprezível, o que nos leva a concluir que o problema de identificação de t_0 quando do uso deste método, carece de maior importância.

Esta conclusão, somada à anterior, sugere que todos os métodos utilizados para identificar t_0 são igualmente bons.

Quando se trata porém de determinar o tempo de trânsito do escoamento a partir de curvas experimentais , alguns se mostram ser mais precisos, sob determinadas condições.

Para que a aplicação do Método Pico-a-Pico se faça com êxito, é necessário, entretanto, que se assegure uma distância entre o ponto de injeção e a primeira detecção, tal que a "boa mistura" do traçador, seja atingida. Estes dois problemas serão considerados novamente com maiores detalhes.

CAPÍTULO 4

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PICO-A-PICO PARA DETERMINAÇÃO DE VAZÃO EM TUBULAÇÕES

Neste capítulo será considerada e comentada a utilização, em situações práticas, da teoria anteriormente apresentada.

Esta teoria é geral, sendo válida para qualquer tipo de traçador, inativo ou radioativo. Ocorre porém que, o emprego de traçadores inativos, tais como corantes e sais, em tubulações industriais é bastante restrito.

O fato de tais tubulações, muitas vezes, transportarem sob altas pressões líquidos contendo compostos químicos em altas concentrações, dificulta a instalação dos detetores ou impõe a necessidade de injeção de grandes quantidades de traçador.

Com a utilização de um traçador radioativo tais dificuldades são superadas pois o volume de traçador é pequeno e o número de acessos ao interior da tubulação é reduzido de três para um ou de dois para zero se a injeção for feita na entrada do sistema.

Nos itens que se seguem trataremos especificamente da utilização de traçadores radioativos em medições de vazões pelo Método Pico-a-Pico, muito embora algumas observações sejam também válidas para outros traçadores.

4-1 Escolha do Traçador Radioativo

Normalmente seleciona-se uma substância que encerra um isótopo radioativo emissor de fotons γ (gama).

Devido a alta penetrabilidade desta radiação na matéria e sua fácil detectabilidade, torna-se possível acompanhar o movimento do traçador, mesmo quando entre este e o detector interpõem-se grossas paredes. Estas propriedades fazem do radiosótopo o traçador ideal para medições de vazões em tubulações industriais, pois o equipamento de detecção, não necessitando acesso ao interior da tubulação, não introduz perturbações no escoamento.

A substância utilizada como traçador deve possuir as seguintes propriedades :

1. Boa Solubilidade e Estabilidade,
2. Não Adsorção pelas Paredes,
3. Meia-vida Apropriada,
4. Baixa Toxidez Química,
5. Alta C.M.P. (*),
6. Disponibilidade e Baixo Custo,
7. Conservar as Características do Escoamento.

(*)C.M.P. - concentração máxima permitida em água potável, cujo valor é fixado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, C.N.E.N.¹³

O sucesso de uma experiência em que se utiliza um traçador radioativo, depende em grande parte da escolha da substância radioativa que melhor preencha os requisitos anteriores.

Na Tabela 1, estão apresentados os elementos radioativos mais adequados para serem utilizados como traçadores radioativos em medições de vazões em tubulações que transportam água.

Radioisótopo	Meia-Vida	Energias (MeV)	Abundância Total	C.M.P. ($\mu\text{Ci}/\text{m}^3$)	Forma Química
^{24}Na	15 h	$\gamma = 1,37$ $\gamma = 2,75$	200%	200	Na_2CO_3
^{82}Br	35,5 h	Principais variam entre $\gamma = 0,55$ $\gamma = 1,47$	329%	300	NH_4Br ou KBr

Tabela 1. Características dos principais traçadores radioativos utilizados em medições de vazões em tubulações.
(Fonte - WEAST¹⁴)

A escolha do melhor traçador, dentre os dois anteriores, é função do tempo total da experiência, que inclue o tempo gasto na experiência propriamente dita e o necessário para se transportar o isótopo do centro de produção ao local da experiência.

4-2

Distância de Boa Mistura

Devido à impossibilidade de se conseguir uma injeção planar, normalmente, em situações experimentais, o traçador é introduzido no escoamento junto à parede, no centro da tubulação, ou em outros pontos.

Imediatamente após, o traçador começa a diluir-se, dispersando-se progressivamente segundo a direção radial e longitudinal.

Depois de percorrer uma certa distância, a distribuição radial de concentrações torna-se homogênea, cessando o processo de dispersão radial.

A distância do ponto de injeção para a qual tal fenômeno ocorre é conhecida como "distância de boa mistura" do traçador.

Até que se atinja esta distância, o traçador desloca-se com uma velocidade média diferente da velocidade média do líquido marcado. A velocidade é mais baixa que a média, porém acelerada, se a injeção for executada junto a parede; e mais alta e desacelerada, se for executada no centro da tubulação.

A jusante do ponto onde existe a boa mistura do traçador, este movimenta-se com velocidade média igual à velocidade média do escoamento.

Assim sendo, a velocidade média do escoamento só pode ser determinada, com precisão, através da fórmula (36), se os pontos $x = x_1$ e $x = x_2$ estiverem a jusante do ponto onde o bom misturamento do traçador é alcançado.

A distância de boa mistura do traçador foi estudada, teórica e experimentalmente, por CLAYTON e outros¹⁵, para o caso em que o traçador é introduzido continuamente no escoamento através de diversos tipos de injetores.

Nesse estudo a distância de boa mistura foi redefinida de um modo mais amplo, como sendo a distância para qual a variação das concentrações radiais em relação a concentração média (variação esta dada pelo desvio padrão das concentrações observadas) é menor que certos valores impostos.

Deste modo foram determinadas relações ligando a distância de boa mistura com o Número de Reynolds do escoamento, para diversos tipos de injetores.

Várias conclusões gerais que interessam também ao Método Pico-a-Pico foram obtidas :

1. A distância de boa mistura é função do tipo de injeção,
2. A distância de boa mistura cresce com o Número de Reynolds,
3. Quanto menor a precisão esperada na medição da velocidade média do escoamento, menor a distância de bom misturamento.

Tais conclusões podem ser verificadas a partir das curvas apresentadas nas FIGURAS 5 e 6.

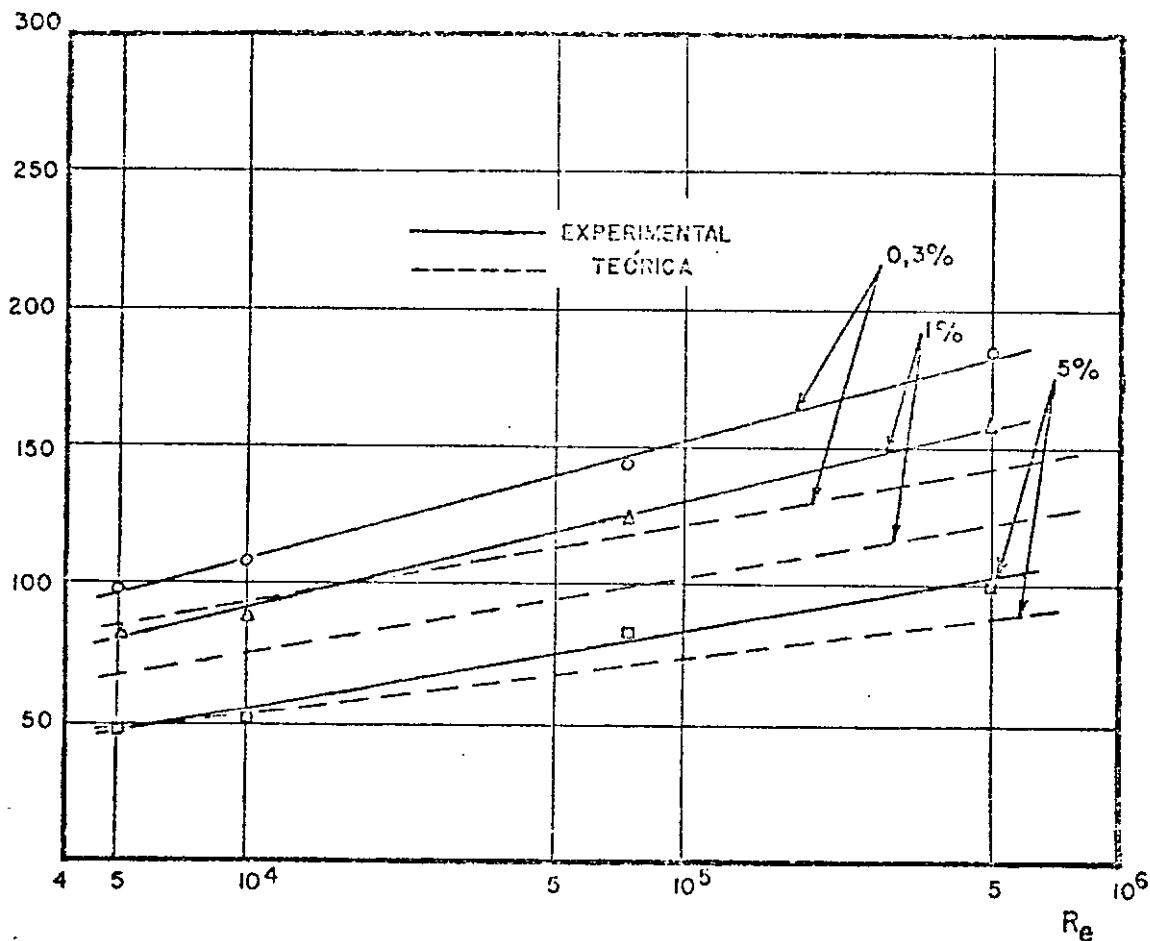


FIGURA 5 Variação da distância de boa mistura, em função do número de Reynolds, para uma INJEÇÃO CENTRAL.
(segundo CLAYTON¹⁵).

Erros admitidos na boa mistura : 5%, 1% e 0,3%.

Dos dados experimentais obtidos por CLAYTON¹⁵, para uma injeção na parede, foram construídas as curvas apresentadas na FIGURA 6.

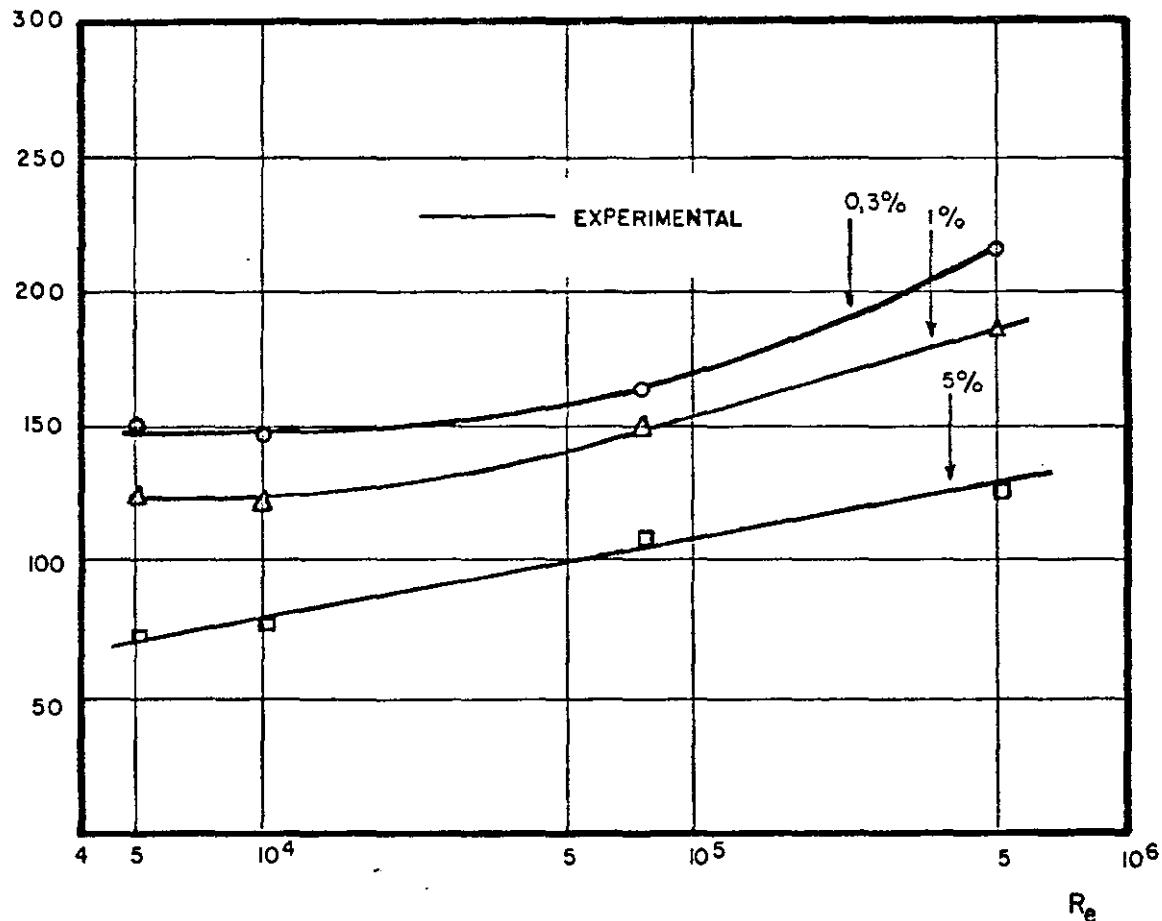


FIGURA 6 Variação experimental da distância de boa mistura em função do número de Reynolds, para uma INJEÇÃO NA PAREDE da tubulação.

Erros admitidos na boa mistura : 5%, 1% e 0,3%

As curvas apresentadas na FIGURA 6 devem ser encaradas como qualitativas, pois as variações de declividades que se notam, não estão de acordo com o aspecto geral das curvas experimentais e teóricas. Os motivos de tais variações não puderam ser determinados.

É importante ressaltar que, nas experiências realizadas por CLAYTON¹⁵, a determinação da variação radial das concentrações foi obtida através da comparação de concentrações de amostras discretas, tomadas em diferentes pontos da seção transversal.

Para os casos em que o total misturamento não é alcançado, o autor recomenda tomar a média das concentrações como representativa da concentração homogênea procurada, como medida de diminuir os erros do misturamento incompleto.

Tal média é melhor realizada, quando se mede concentrações através de um detector de radiação, uma vez que esta média é obtida não para vários pontos da seção transversal, mas para uma região dela, que é função do "raio infinito" do traçador radioativo e da sensibilidade do detector.

Como objetivo de diminuir a distância necessária ao bom misturamento do traçador, várias técnicas tem sido experimentadas.

CLAYTON¹⁵ mostrou que a utilização de injetores capazes de executar, simultaneamente, injeções em quatro pontos situados sobre a parede (diametralmente opostos dois a dois) obtem-se uma distância de boa mistura bastante menor que a associada a uma injeção central. Uma redução ainda maior pode ser conseguida se os quatro pontos estiverem afastados do centro da tubulação de uma distância igual a dois terços do raio.

Embora estes injetores sejam muito eficientes, suas aplicações são limitadas devido as dificuldades de instalações.

É também utilizado, em certos casos, a técnica de injetar o traçador através de um jato dirigido contra o escoamento.

Tal procedimento produz um misturamento mais rápido, mas a pressão exterior necessária à execução deste tipo de injeção pode produzir distorções no escoamento e limitar a precisão da medição.

Nos casos em que se dispõem de bombas, a montante do local de medição, CLAYTON¹⁶, afirma que a injeção do traçador na tubulação de sucção da bomba reduz grandemente o comprimento de boa mistura.

Embora este recurso encerre um grande poder de misturamento, torna-se difícil avaliá-lo quantitativamente, pois é função dos detalhes construtivos da propria bomba.

Como não se conhece até agora uma relação correta entre o erro na avaliação da distancia de boa mistura e a precisão do Método Pico-a-Pico, o que se faz na prática, é evitar este problema pela adoção de uma distancia que garanta o bom misturamento.

Para tanto, pode-se utilizar as curvas experimentais apresentadas por CLAYTON¹⁵, que superestimam as distancias de boa mistura, pois, não levam em consideração a existencia de rugosidades, curvas, válvulas, etc., que aceleram o misturamento.

Se a distancia mínima de $x = x_1$, assim calculada, for muito grande em relação ao comprimento de tubulação disponível, deve-se aplicar um dos artifícios anteriormente descritos, de modo a reduzir a distancia de boa mistura.

Sempre que possível, deve-se fazer a injeção na tubulação de sucção da bomba pela facilidade e pela eficiência.

4-3

Arranjo Experimental

Quando se utiliza um material radioativo como traçador, normalmente, a concentração refere-se, não a massa do traçador, mas a sua Atividade, por unidade de volume. A determinação das variações temporais das concentrações de traçador radioativo em dois pontos fixos, pode ser feita fácil e rapidamente, através da utilização de equipamento capaz de medir radiações, bastando que se conheça o valor de um certo fator F definido por :

$$F = \frac{R}{C} \quad (37)$$

onde,

F = fator de sensibilidade

R = taxa de contagens = número de radiações contadas,
por unidade de tempo.

Sabendo-se que a concentração de material radioativo é dada por

$$C = \frac{A}{V_L} \quad (38)$$

onde,

V_L = volume em que a atividade está diluída,

a determinação do valor F pode ser feita experimentalmente através da medição de taxa de contagem relativa a uma atividade conhecida diluída em um volume estático conhecido.

Para que F assim obtido, seja válido para calcular diretamente concentrações que variam com o tempo, através da relação, (37) é necessário que se utilize o mesmo equipamento e que a geometria das situações de medições estáticas e dinâmicas sejam iguais.

A determinação do fator de sensibilidade pode ser também feita analiticamente, cujo assunto será abordado, suscintamente, no Capítulo 4-5.

É interessante ressaltar que nos casos onde a medição de concentrações é feita através de um detector de radiação, fica definido, implicitamente, um "volume de medição", que depende, entre outras coisas, das propriedades do isótopo, do equipamento de medição, do tipo de colimador e da posição relativa entre o traçador e o equipamento de medição.

Basicamente o equipamento eletrônico de medição de radiações compõe-se de duas peças principais.

A primeira, encerra um detector especial que transforma as radiações recebidas em pulsos elétricos, os quais são enviados a segunda parte que se encarrega de contá-los.

Esta parte é, pois, um contador, cuja resposta é proporcional ao número de pulsos contados por unidade de tempo, ou seja ao número de radiações detectadas por unidade de tempo. Frequentemente as operações de detecção e contagem de radiações são feitas em separado por questão de facilidade operacional.

Neste caso, o detector de radiação, denominado simplesmente como sonda, é conectado por um cabo ao contador, comumente conhecido por "ratemeter". O conjunto formado pela sonda e pelo "ratemeter" é denominado simplesmente "conjunto de medição".

Com o objetivo de se conseguir maior automatização nas operações no campo e de facilitar uma análise mais cuidadosa dos dados, normalmente, as sonda e os "ratemeters", referentes a dois pontos de medição são conectados a um registrador gráfico.

Uma das montagens mais simples dos equipamentos eletrônicos capazes de detectar, medir e registrar as variações nos pontos fixos - $x = x_1$ e $x = x_2$ é mostrada na FIGURA 7, que segue.

A- COLIMATOR
B- SONDA
C- RATEMETER
D- REGISTRADOR

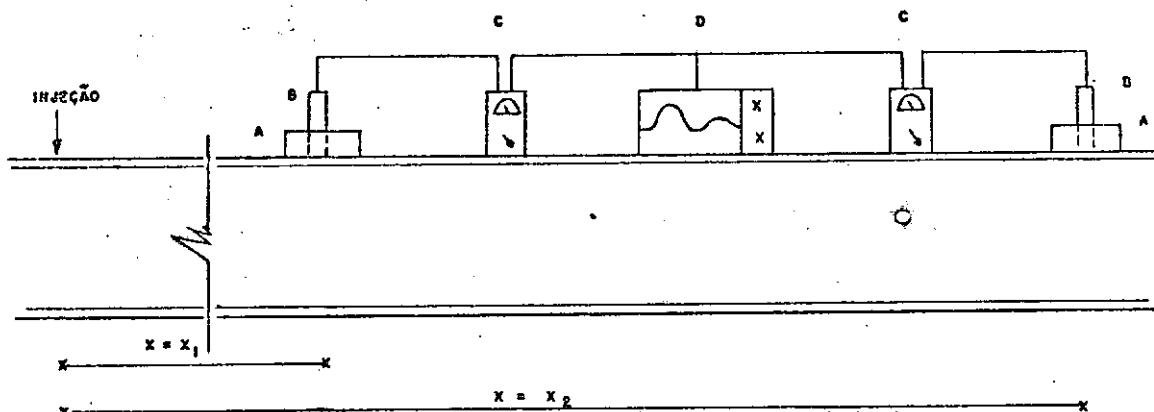


FIGURA 7 Montagem típica dos equipamentos de detecção, medição e registro da variação da concentração de traçador radioativo - Método Pico-a-Pico.

A utilização de idênticos colimadores, feitos de chumbo, tornam idênticas as geometrias dos dois pontos de detecção. Esta precaução garante a coincidência a posição "física" e a "de medição" dos detectores para ambos pontos fixos, o que pode, em certos casos, levar a maior precisão na medição.

A ligação em série dos cabos que conectam os "ratemeters", objetiva também simplificar registro da passagem da "nuvem" do traçador pelos pontos de detecção, mas só deve ser usada quando a distância entre os detectores é maior que o comprimento da nuvem. Quando isto não ocorrer, para se evitar superposição e distorções dos picos, deve-se lançar mão de outros recursos, tais como, a utilização de um registrador com dois canais independentes, dois registradores, ou uma chave seletora das correntes elétricas que chegam ao registrador.

Neste último caso, o registro dos picos é incompleto, mas ainda assim a análise das curvas obtidas pode ser feita satisfatoriamente.

O arranjo experimental, visto na FIGURA 7, não conduz a determinações diretas de variações de concentrações, a menos que se conheça, com exatidão, o valor do coeficiente de sensibilidade F .

Analizando-se as fórmulas (27), (31), (32), (35), bem o método de determinação de t^6 , observa-se que os métodos que objetivam a identificação de $(t_0)_i$, não se baseiam no conhecimento de valores absolutos de concentração do traçador, mas na configuração das curvas que apresentam as variações de concentrações.

Baseando-se, na relação (37), que estabelece proporcionalidade entre concentrações e taxas de contagens conclui-se que as determinações de tempos de trânsito do escoamento podem ser feitas a partir da curva de variações de taxas de contagens, medida e registrada diretamente através de uma montagem de equipamentos, tal como a mostrada na FIGURA 8.

Portanto, a interpretação dos resultados independe do conhecimento de F , que passa a ser necessário somente na fase de planejamento da experiência, quando se deseja conhecer a atividade necessária na injeção.

Como consequência da montagem dos equipamentos de medição, a curva, devido ao traçador, aparece superposta a soma dos "backgrounds" medidos nos pontos $x = x_1$ e $x = x_2$.

Neste caso, entende-se por background (radioativo), BKG, a taxa de contagem medida sem a presença do traçador.

Voltando a equação (36) podemos reescrever-la sob a forma :

$$U = \frac{\Delta x}{\Delta t_0} \quad (40)$$

onde,

$\Delta x = (x_2 - x_1) =$ distância entre os pontos de detecção

$\Delta t_0 = (t_0)_2 - (t_0)_1 =$ tempo de trânsito entre os pontos de detecção

Quando as variações das taxas de contagens medidas nos dois pontos de detecção são plotadas continuamente no papel do registrador, que movimenta-se com velocidade uniforme, a velocidade média do escoamento pode ser determinada através da relação.

$$U = \frac{\Delta x}{\Delta P_0} \cdot V \quad (41)$$

onde,

$\Delta P_0 =$ distância medida no papel do registrador associada ao tempo de trânsito do escoamento entre os pontos de detecção

$V =$ velocidade do papel do registrador

Fica caracterizada, implicitamente uma relação de transformação de tempo em distância medida no papel do registrador dada por :

$$t = \frac{P}{V} \quad (42)$$

A fórmula (41) é a "fórmula de trabalho" de medição da velocidade média do escoamento através do Método Pico-a-Pico.

Uma vez determinada a velocidade média do escoamento através da interpretação dos picos registrados, a vazão transitante na tubulação é dada pela relação

$$Q = \frac{\Delta x \cdot S \cdot V}{\Delta P_0} \quad (43)$$

onde,

$$Q = U S = \text{vazão transitante na tubulação.}$$

Outro importante componente do conjunto de equipamentos necessários para a realização de uma experiência de medição de vazão em tubulações é o injetor. Alguns tipos especiais, tais como os descritos no Capítulo 4-3, só devem ser usados quando necessários, pois sempre que possível devem ser substituídos por injetores mais simples.

Como consequência do emprego do Método Pico-a-Pico, não há necessidade de que a forma da injeção seja conhecida e instantânea, bastando que seja rápida. Além desta qualidade, o injetor deve ser projetado de modo a evitar exposições dos operadores a radiação, impedir contaminações e possibilitar múltiplas injeções.

Devido a grande variedade de formas de acesso ao interior de tubulações, existe também um grande número de tipos de injetores.

Nas experiências realizadas foram utilizados cinco diferentes tipos de injetores, que serão descritos posteriormente.

4-4

Análise do erro

Na análise que se segue é suposto que a ocorrência de erros sérios (falhas) em medições e cálculos seja completamente evitada quando estes forem realizados e verificados cuidadosamente.

A adoção de técnicas e artifícios que permitem corrigir ou minimizar os erros sistemáticos, faz com que os resultados envolvam, somente erros acidentais.

Estes, pelo fato de serem aleatórios, podem ser tratados estatisticamente de modo simples se forem supostos obedecer a uma função de distribuição do tipo normal.

Como foram realizados somente um pequeno número de experimentos, o tratamento estatístico dos resultados, obedece a técnica apropriada a pequeno número de amostra, apresentada por CROW e outros¹².

Com a intenção de evitar ambiguidades no entendimento do que é discutido nesta seção, é importante estabelecer o que aqui se chama de PRECISÃO e REPRODUCIBILIDADE.

O termo PRECISÃO ou exatidão (geralmente denominado em Ingles como "accuracy") é definido como sendo o grau de correção com que um método de medição fornece o valor verdadeiro de uma quantidade medida.

Se erros sistemáticos não estão envolvidos, a precisão (ou exatidão) é expressa pelo desvio padrão em relação ao valor verdadeiro ou assumido como verdadeiro.

Reproducibilidade (geralmente denominada em Ingles, como "precision" ou "reproducibility"), é a capacidade de um instrumento ou método, de reproduzir a mesma medida anterior. É expressa quantitativamente como sendo o desvio padrão em relação a média obtida de repetidas medições.

4-4-1 Precisão esperada em uma Medição de Vazão pelo Método Pico-a-Pico

A abordagem do cálculo da precisão por um processo em que o resultado da medição é comparado diretamente com o valor verdadeiro (ou assumido como verdadeiro), não é possível para o Método Pico-a-Pico, pois, este método determina diretamente velocidades médias, ao passo que a grandeza cujo valor verdadeiro pode ser conhecido é a vazão.

Para isto emprega-se o chamado Método Volumétrico, de difícil aplicação para grandes vazões, cujo resultado assume-se ser o verdadeiro.

A determinação direta da precisão, só é então possível, em situações em que as variações no diâmetro da tubulação forem suficientemente pequenas de modo a justificar a consideração da seção como sendo uma constante.

Isto, porém, só se verifica em ensaios de laboratório, de vez que tubulações industriais apresentam sensíveis variações de seção devido ao próprio processo de fabricação e a fenômenos de abrasão ou incrustação que normalmente ocorrem durante a vida útil de certas tubulações.

A determinação da precisão de uma grandeza pode também ser obtida através da composição dos erros inerentes aos parâmetros em que esta grandeza pode ser expressa.

De modo a exprimir a vazão Q , em função dos parâmetros mais simples, é necessário compor as relações (4), (43), de modo a obter

$$Q = \frac{\pi}{4} \frac{\Delta x \cdot D^2 \cdot v}{\Delta P_0} \quad (44)$$

Este tipo de análise, baseia-se na aplicação da Lei de Propagação do Erro, deduzida por GAUSS.

Para uma grandeza Y , definida por

$$Y = f(y_1, y_2, y_3, \dots) \quad (45)$$

onde,

$y_1, y_2, y_3 \dots$ são variáveis independentes entre si, a precisão inerente a Y , é calculada através da Lei de Propagação do Erro, dada por

$$\sigma^2 Y = \left[\frac{\partial f}{\partial y_1} \right]^2 \sigma^2 y_1 + \left[\frac{\partial f}{\partial y_2} \right]^2 \sigma^2 y_2 + \left[\frac{\partial f}{\partial y_3} \right]^2 \sigma^2 y_3 + \dots \quad (46)$$

Estabelecendo-se uma igualdade entre as relações (44) e (45) obtém-se

$$\left[\frac{\sigma Q}{Q} \right]^2 = \left[\frac{\sigma \Delta x}{\Delta x} \right]^2 + \left[\frac{\sigma V}{V} \right]^2 + \left[\frac{\sigma \Delta P_0}{\Delta P_0} \right]^2 + 2 \left[\frac{\sigma D}{D} \right]^2 \quad (47)$$

onde, o erro inerente a cada parâmetro é definido como o seu desvio padrão relativo.

Passando ao exame da precisão inerente a cada parcela da relação (47), defronta-se com a dificuldade de determinação do valor verdadeiro de cada um dos parâmetros intervenientes em (44).

Não obstante é possível, sob certas hipóteses, estimar a precisão esperada para cada um dos parâmetros de modo a se obter uma estimativa da precisão envolvida na medição de vazão.

4-4-1-1 Influencia da Precisão Δx

Supondo-se que, com a utilização de uma trena de boa qualidade, através de medições cuidadosas, é possível evitar desvios maiores que 20 cm para cada 100 m, consegue-se que a precisão estimada para o parâmetro Δx , e de $\frac{\sigma_{\Delta x}}{\Delta x} = 0,002 = 0,2\%$

4-4-1-2 Influencia de V

A precisão que se pode esperar para a velocidade do papel do registrador normalmente depende da qualidade e de certos detalhes construtivos, tal como a alimentação, deste equipamento.

Nas experiências realizadas, foram utilizados dois diferentes tipos de registradores, ambos de alta qualidade.

O fabricante SAPHYMO-SRAT, que produz o registrador ETP - 3, alimentado por bateria, afirma que a precisão própria do equipamento é melhor que 0,001. Não está claramente dito aque tipo de erro este valor se refere, mas pode-se supor, a favor da segurança, que se trata do desvio padrão relativo.

Testes objetivando controlar em "condições de campo" a estabilidade e precisão de V, para este registrador, confirmaram plenamente a precisão especificada.

Assim sendo, pode-se estimar a precisão deste registrador francês como sendo $\left[\frac{\sigma_V}{V} \right]_{ETP-3} = 0,001 = 0,1\%$

Para outro tipo de registrador utilizado, o Modelo 7100-B da HEWLETT-PACKARD, a estimativa da precisão, não é tão simples. Pelo fato da tração do papel ser feita por intermédio de um motor síncrono, a velocidade do papel fica sujeita as flutuações da fonte de alimentação.

Nos locais de experiencias, onde não foi possivel conectar este registrador com a rede de energia elétrica, tornou-se necessário utilizar um gerador portátil, e o utilizado foi um HONDA, Modelo E-III-300.

Cronometragens de distancias fixas no papel do registrador, e feituadas simultaneamente a cada experiencia, permitiram concluir que, para dois diferentes dias de experiencias as velocidades calculadas do registrador apresentaram sensiveis desvios em relação aos valores nominais.

Sobre estes desvios, possivelmente decorrentes de diferentes regulagens do gerador e de efeitos de temperatura, se sobrepuzeram cujo desvio-padrão máximo relativo, foi de 0,38%.

$$\text{Assim sendo é justo estimar } \left[\frac{\sigma V}{V} \right]_{\text{HP-gerador}} = 0,004 = 0,4\%$$

como sendo a precisão esperada para a velocidade do papel do registrador conectado ao gerador.

Em outra série anterior de experiencias, em que 4 medições foram realizadas, o registrador HP foi alimentado diretamente da rede de distribuição de energia.

Por falta de um acessório elétrico (posteriormente construido) que facilitasse a marcação simples (exata) da distancia do papel a ser cronometrada, e por inexperiencia dos operadores, duas verificações de V foram perdidas, e as restantes apresentaram pequenas flutuações em torno do valor nominal.

Para confirmá-las foram realizadas, no laboratório, outras experiencias, sendo que do total estimou-se uma precisão de -

$$\left[\frac{\sigma V}{V} \right]_{\text{HP-rede pública}} = 0,002 = 0,2\%$$

4-4-1-3 Influência de ΔP_0

Tendo como ponto de partida a seção 4-2, onde foi discutido o problema da boa mistura do traçador, e a relação (42), não é difícil compreender a existência de uma ligação entre o posicionamento do ponto de medição, em face da distância de boa mistura, e o parâmetro ΔP_0 .

Quando um ou mais pontos de medição localizam-se à montante do ponto onde a boa mistura é atingida, ocorre um afastamento ou aproximação entre os picos, dependendo da circunstância da injeção ter sido feita no centro ou na parede da tubulação.

Como não se conhece uma relação quantitativa entre o erro do misturamento no ponto de medição e o deslocamento sofrido pelo pico, de modo a possibilitar uma correção da distância ΔP_0 , procura-se evitar o erro provocado. Para tanto basta que se posicione os dois pontos de medição, sobre ou a jusante do ponto de boa mistura, pois neste caso a concentração radial uniforme, desloca-se com a velocidade igual a velocidade média do escoamento.

Nas experiências realizadas, cuidados foram tomados de modo a garantir a observância dessa condição, o que tornou desnecessária a correção do erro sistemático de ΔP_0 , decorrente do misturamento in completo.

É evidente que o parâmetro ΔP_0 depende também da precisão com que se registra as curvas de variação de concentração, pois a ocorrência de variações na direção vertical e deformações horizontais ocasionam mudança da posição de (t_0) i , o que faz variar ΔP_0 .

Supondo-se que os erros introduzidos na escala vertical do papel do registrador como decorrência de inércia mecânica, são pequenos bastante, de modo a serem desprezados, consideram-se aqui somente as flutuações inerentes a determinação de $R(t)$ (taxa de contagem), que aparecem como consequência do processo estatístico de desintegração do radioisótopo.

Sabe-se que, mesmo para um nível constante de atividade, uma única determinação de taxa de contagem da amostra radioativa, encerra um erro, que expresso em termos do desvio-padrão relativo é :

$$\frac{\sigma_R}{R} = \frac{1}{\sqrt{2 \tau R}} \quad (48)$$

O parâmetro τ é a chamada "constante de tempo do rate-meter" que para o SPP-3, fabricado por SAPHYMO-SRAT, pode ser escolhido entre 0,12s, 0,4s, 1,2s, 4s e 12s. Considerando que o parâmetro, τ , provoca também uma deformação horizontal na curva $R(t)$, deformação esta que aumenta com o aumento de τ , é necessário que se escolha um valor ótimo para a constante de tempo, tendo em vista este fato e a relação (48), onde o erro na direção vertical é inversamente proporcional a $\sqrt{\tau}$.

A figura seguinte mostra, qualitativamente, o efeito das deformações longitudinais e flutuações verticais causadas por τ .

Nela pode ser visto que a escolha do τ ótimo, deve levar em conta que se por um lado a observância da relação $\tau \ll \Delta t_0$ diminui o efeito da deformação longitudinal, por outro lado a adoção de valores muito pequenos τ impõem a injeção de grandes atividades para que se possa reduzir as flutuações verticais.

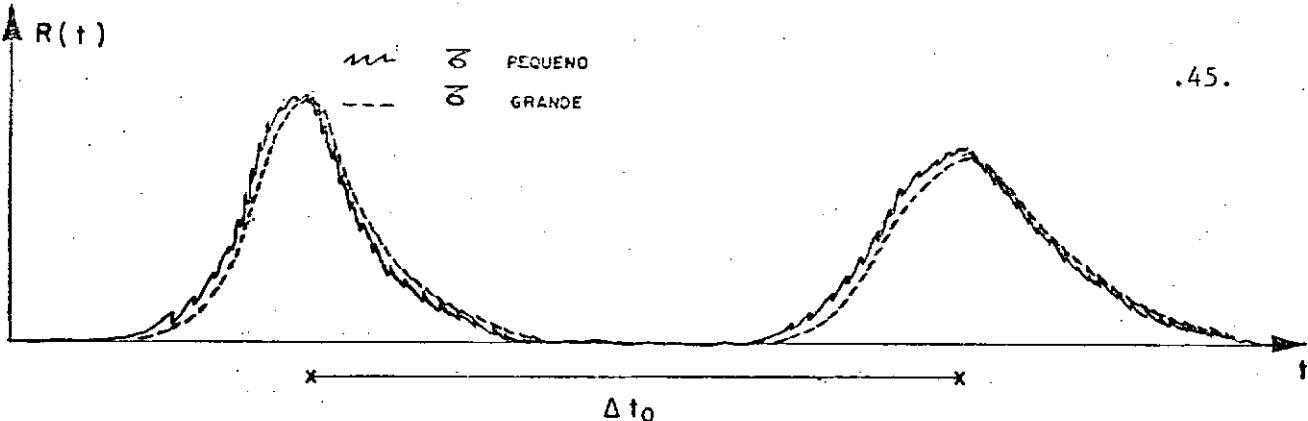


FIGURA 8 : Influência da constante de tempo no registro da curva de $C(t)$ (qualitativo).

Na prática, como não foram ainda derivadas fórmulas que permitam corrigir as variações e as deformações das curvas $R(t)$ causadas por τ , procura-se fixar valores de τ que tornem desprezível sua influência na precisão de ΔP_0 (ou Δt_0).

Para os casos em que as condições

$$\frac{\sigma R_{\max}}{R_{\max}} = 0,01 = 1\% \quad (49)$$

$$\frac{\tau}{\Delta t_0} = 0,01 = 1\% \quad (50)$$

são observadas, as contribuições de R e τ para a imprecisão de Δt_0 , podem ser desprezadas. É mesmo possível que a condição (49) possa ser abrandada, quando se emprega para identificar (P_0) um dos métodos que utilizam mais de um ponto da curva $R(P)$, pois eles produzem uma certa minimização dos desvios.

A relação (50), é também um tanto rigorosa de vez que as de formações longitudinais experimentadas pelos picos, embora diferentes, possuem o mesmo sentido.

Um estudo futuro com o objetivo de derivar fórmulas que permitem correções para os efeitos causados pela constante de tempo do -ratemeter, traria grande aperfeiçoamento ao Método Pico-a-Pico, pois isto redundaria imediatamente no emprego de menores atividades.

Sabe-se que, normalmente, a contribuição do erro inerente a determinação ΔP_0 é maior que as inerentes a Δx e V_i .

Dentre os fatores que influenciam a precisão de ΔP_0 , o mais importante é sem dúvida, o método de interpretar a curva $R(P)$ com o objetivo de determinar o parâmetro ΔP_0 .

Torna-se então necessário discutir as condições para as quais cada método pode mostrar-se mais ou menos preciso em relação aos demais.

Nos casos em que a distância entre os detectores é muito grande, os ΔP_0 determinados por diferentes métodos são tão precisos e tão próximos entre si, que todos os métodos podem ser considerados igualmente precisos.

CLAYTON¹² afirma, baseado em uma série muito grande de experiências que, quando se fixa uma distância entre pontos de medição igual a várias vezes o comprimento da nuvem. tal fato ocorre, o que torna aconselhável o uso dos métodos que fazem a identificação de (P_0) de um modo mais simples e mais rápido.

Estes requisitos são preenchidos pelos métodos que determinam t^1 , t^5 e t^6 , descritos no Capítulo 2.

Como em muitas situações de medições não é possível distanciar suficientemente os pontos de detecção entre si, certos métodos tornam-se mais precisos que outros, dependendo da exatidão com que se registram as curvas. Nas situações em que as curvas são perfeitamente registradas o parâmetro ΔP_0 é determinado com maior precisão através das relações (31), (32) e (33), fato abordado anteriormente. Se as curvas registradas apresentam falhas, a aplicação dos métodos que determinam os parâmetros P^2 e P^3 , pode ficar parcialmente - prejudicada ou mesmo impraticável.

Quando isto ocorrer uma interpretação das curvas através do Método das Paralelas poderá conduzir a resultados mais precisos - que os obtidos por outros métodos, porque além de utilizar um grande número de pontos a determinação destes pontos é feita através de paralelas ao BKG, cuidadosamente posicionadas de modo a cortar a curva registrada em locais onde não se suspeite de erros ou falhas introduzidas pelo registrador ou operador.

Nos casos em que a aplicação de todos os métodos torna-se possível, é costume tomar-se a média dos resultados parciais obtidos como o resultado total, para se alcançar maior precisão em ΔP_0 .

Do que foi dito, conclui-se que a estimativa da precisão - de ΔP_0 varia praticamente de experiência para experiência pois depende diretamente da distância entre detectores que é função do comprimento da canalização disponível.

4-1-1-4 Influência de D

Esta é, sem dúvida, a maior fonte de erro do Método Pico-a-Pico. O fato do diâmetro apresentar, normalmente, variações bem maiores que a dos outros parâmetros analisados, aliado a fato de sua influência ser dobrada, é o que realmente limita a precisão de vazões medidas pelo Método Pico-a-Pico.

Nas situações em que torna-se difícil estimar a precisão inherent ao diâmetro, como por exemplo, em tubulações que conduzem águas duras, tubulações velhas de aço ou ferro fundido não revestido, ou simplesmente tubulações em mau estado de conservação; e se deseja excelente precisão na determinação da vazão, este método deve ser substituído por outro que independa do conhecimento da seção de escoamento, tal como o Método Amostragem Contínua.

Em virtude deste parâmetro ser uma propriedade própria de cada tubulação, sua contribuição para a estimativa da precisão será analisada para cada experiência em separado.

4-5 Pre-dimensionamento de uma experiência de medição de vazão pelo Método Pico-a-Pico

Antes de mais nada, é necessário frisar que os cálculos que se seguem são aproximados, pois estão relacionados com a velocidade média do escoamento U , que por ser a incógnita do problema, é substituída no pre-dimensionamento por um valor aproximado.

Este valor, normalmente, pode ser determinado a partir de uma vazão medida por dispositivos convencionais instalados na tubulação dos dados do projeto, ou em última instância, como resultado de uma avaliação feita no local.

Uma vez conhecidos U e D , o primeiro parâmetro a ser determinado é a distância de boa mistura, tendo por base o que foi discutido na seção 4-2.

4-5-1 Cálculo do tamanho da nuvem de traçador e outros parâmetros dele dependentes

Definindo-se o comprimento da nuvem de traçador, N , como sendo a distância entre dois pontos que determinam um volume que contém 99,7% da atividade injetada; fica imediatamente definido através da relação de transformação $t = \frac{x}{U}$, um intervalo de tempo, T' , chamado "tempo de trânsito da nuvem por um ponto de detecção", o qual é dado por

$$T' = \frac{N}{U} \quad (51)$$

Quando a condição (30) é obedecida, a curva de variação de concentração com o tempo torna-se aproximadamente gaussiana, e os valores t que determinam T' , estão associados a valores de concentrações que se afastam de $\pm 3\sigma_c$ em relação a concentração máxima, como pode ser visto na figura seguinte.

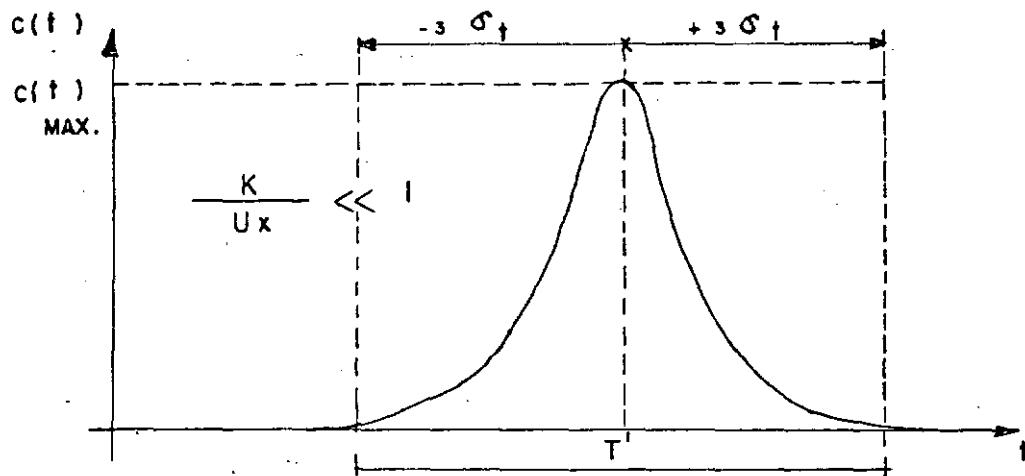


FIGURA 9 Definição gráfica do tempo de trânsito da nuvem de traçador sobre um ponto fixo (qualitativo).

Baseado nestas definições, e na comparação entre as duas fórmulas que permitem o cálculo do coeficiente de dispersão K , (7) e (63), EVANS¹⁸ deduziu a seguinte fórmula para calcular T'_i

$$T'_i = \frac{12 \sqrt{r x_i}}{U [Re]^{1/16}} \quad (52)$$

Se o número de Reynolds do escoamento estiver no intervalo $10^4 < Re < 10^6$, a fórmula anterior pode ser simplificada para

$$T'_i = \frac{6}{U} \sqrt{r x_i} \quad (53)$$

Esta relação, embora afetada de um erro aproximado de $\pm 15\%$, pode ser considerada suficientemente exata para a avaliação de T'_i .

Utilizando-se a relação (51) obtém-se

$$N_i = 6 \sqrt{r x_i} \quad (54)$$

onde podemos concluir que o comprimento da nuvem não cresce linearmente com a distância.

Tendo em mente, a recomendação feita por CLAYTON¹², a distância entre os detectores deve ser várias vezes maior que o comprimento da nuvem, de modo a aumentar a precisão de Δx e ΔP_0 .

Assim sendo

$$\Delta x = k N \quad (55)$$

O coeficiente k não deve ser exageradamente grande, ($k < 100$), pois além de não conduzir a grande aumento na precisão de Δx e ΔP_0 , torna a experiência tecnicamente mais difícil.

Nas experiências realizadas, o coeficiente k utilizado foi em geral próximo de 4 (quatro), mas em uma delas foi reduzido por questão de limitações de distância.

A velocidade nominal do papel do registrador, V , é outro parâmetro cujo pré-dimensionamento decorre de N .

Este parâmetro deve ser escolhido de modo a proporcionar picos suficientemente distantes, e suficientemente largos, de modo a aumentar a facilidade e a precisão nas identificações gráficas de ΔP_0 .

Isto relaciona-se mais diretamente com os métodos descritos pelas relações (31), (32) e (33).

Assim sendo, V pode ser fixada como sendo a velocidade nominal mais próxima do maior valor fornecido por uma das relações.

$$V = \frac{M}{T'} \quad (56)$$

$$V = \frac{\Delta P_0}{\Delta t_0} \quad (57)$$

onde,

M = distância associada a T' , medida diretamente no papel do registrador.

Os valores mínimos de M e ΔP_0 , tendo em vista o que foi exposto antes devem ser 20cm e 100cm respectivamente. É possível, que com a utilização do Método das Paralelas a mesma precisão possa ser atingida para valores de M e ΔP_0 iguais a metade dos anteriores.

4-5-2 Cálculo da atividade a ser injetada e os parâmetros dela decorrentes

Partindo-se da relação (16), observada a condição imposta - por (30), EVANS¹⁸ derivou uma fórmula que permite calcular, com um erro de aproximadamente $\pm 10\%$, a atividade a ser injetada em um escoamento cujo número de Reynolds está situado no intervalo $10^4 < Re < 10^6$

$$\hat{A} = \frac{\sqrt{x D^5} C(t)_{\max}}{0,72} \quad (58)$$

Pelo que foi visto na seção 4-4, o cálculo da atividade está intimamente ligado a precisão exigida para a determinação de U , além de, é claro, relacionado com a segurança radiológica da medição.

Quando torna-se necessário atingir uma precisão muito menor que 1% , para U , a utilização direta das relações (48), (49) e (50), conduzem a determinação de τ e R_{\max} . Se não há necessidade de tal precisão o abrandamento das condições (49) e (50) proporcionam uma redução considerável na atividade do traçador radioativo.

Para que se possa calcular o valor de A , é necessário que se conheça o fator de sensibilidade F pois este permite calcular $C(t)_{\max}$ através da relação (37).

Este coeficiente pode ser determinado de três diferentes maneiras: através de uma experiência-piloto, de uma calibração, ou por uma estimativa analítica.

O fato das medições terem sido executadas para diferentes condições e em pequeno número, a impossibilidade de se dispor de amostras das tubulações, aliados ao problema de não se contar com um transporte eficiente de traçadores radioativos dos centros de produção (São Paulo e Belo Horizonte) dificultaram e não justificaram economicamente a realização de experiências-piloto e de calibrações.

Nestas condições, a sensibilidade do detector foi obtida através de cálculos simplificados que conduzem a um valor estimativo de F .

Este coeficiente é função dos detalhes construtivos do detector das energias das radiações do radioisótopo, da geometria detector-fonte, e das interações entre a radiação e a matéria que se interpõe entre a fonte e o detector. Em geral, F , é expresso por um produto de fatores que traduzem a importância de cada parâmetro influente, tal como é apresentado por GARDNER e ELY¹.

No caso em estudo, F , foi determinado, de um modo simplificado e aproximado, como sendo

$$F = F^\infty \times F_G \times F_A \quad (59)$$

onde,

F^∞ = sensibilidade do detector imerso em um meio infinito de material radioativo,

F_G = fator geométrico,

F_A = fator de absorção.

O parâmetro F^∞ , relaciona-se a sensibilidade do detector quando totalmente mergulhado em uma solução do radioisótopo com concentração homogênea. Este parâmetro, engloba, pelo menos parcialmente, a influência da eficiência do detector, da auto-absorção e a do "scattering" da radiação na água que circunda o detector. Devido a blindagem oferecida pela própria solução às radiações que provêm de pontos mais distantes, a capacidade da sonda de detectar radiações, fica limitada a uma esfera, cujo raio é, principalmente, função do tipo e da energia da radiação e em menor grau do tipo de detector.

F^∞ é frequentemente denominado "sensibilidade para geometria infinita" ou "sensibilidade para geometria 4π " (esferoradianos).

A sensibilidade F^∞ , foi estimada como sendo $F^\infty = 2600 \text{ cps}/\mu\text{Ci}/\text{m}^3$ tendo por base experiências anteriores em que sondas idênticas foram utilizadas. Este recurso foi utilizado em virtude das sondas não terem sido calibradas anteriormente.

O fator F_G , chamado "fator geométrico", traduz a redução da sensibilidade, causada pelo fato da geometria de medição não ser uma geometria infinita (4π).

Pode ser calculado com a razão entre o ângulo sólido através do qual a sonda detecta as radiações e o ângulo sólido 4π , relativo a geometria infinita.

De modo simplificado, F_G , foi calculado com a relação entre o volume de um setor esférico, com o vértice no detector, e o volume da esfera, e o valor obtido foi $F_G = 0,146$.

O fator de absorção, F_A , traduz a redução verificada na sensibilidade, como consequência da redução do fluxo de fótons que chegam ao detector, provocada pela absorção de certas radiações por obstáculos existentes entre o isótopo e o detector.

No caso em estudo, os obstáculos são paredes metálicas da tubulação e o revestimento existente.

Para um dado fóton, monoenergético, de abundância a , oriundo de uma fonte pontual F_A é calculado pela relação

$$F_A = \exp \left[- \mu^m e^m - \mu^c e^c - \dots \right] \quad (60)$$

onde,

μ^m e μ^c = coeficientes de absorção relativos ao aço concreto e ao concreto,

e^m e e^c = espessura da parede de aço e do revestimento.

Como no caso, de medição da vazão, a solução radioativa no interior da tubulação porta-se como se fosse uma fonte espacial e o espectro de energia dos fótons γ emitidos pelo ^{82}Br , passa de discreto para contínuo em virtude do "scattering" dos fótons na própria solução, o fator F_A pode ser obtido de modo aproximado pela fórmula

$$F_A = \frac{\sum [a_j \exp. \left[- (\mu_j^m e^m + \mu_j^c e^c) \right]]}{\sum a_j} \quad (61)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots n$$

A relação (61), superestima o valor de F_A e F_G e conhecido F^∞ obtém-se F através de (59), donde C_{max} é determinado pela fórmula

$$C_{max} = \frac{R_{max}}{F} \quad (62)$$

que decorre da relação (37).

Substituindo-se (62) em (58) e tomando-se $x = x_2$ (condição mais desfavorável), chega-se a uma estimativa mais ou menos grosseira da atividade a ser injetada.

Substituindo na equação (58), a variável x , pela distância da injeção $\rightarrow 1^{\text{a}}$ detecção, através de (62) determina-se a taxa de contagem máxima a ser observada na 1^{a} detecção.

Tendo por base, os valores R_{\max} determinados para $x = x_1$ e $x = x_2$, a escala "taxa de contagem" de cada um dos ratemeters deve ser escolhida, de tal modo que R_{\max} corresponda a, pelo menos, $\frac{1}{3}$ do "fundo da escala".

É importante assinalar, que as fórmulas (52) e (58), básicas no pré-dimensionamento anterior, foram deduzidas originariamente para tubulações retas e lisas, para as quais apresentam erros de ± 15 e 10% respectivamente. Quando aplicadas a tubulações industriais conduzem a estimativas tanto melhores quanto menores forem o número de singularidades existentes, principalmente, as do tipo que introduzem maiores turbulências localizadas.

Se o líquido transportado pela tubulação é água doce destinada ao abastecimento, é necessário que se garanta a população abastecida contra os danos causados pela radiação.

A proteção radiológica foi assegurada através da utilização de dois critérios. Primeiro, utilizando a fórmula (58), calculada para o ponto de consumo mais próximo, verificar o fato da concentração máxima do traçador (instantâneo) ser menor que a concentração máxima permitida em água potável de uso contínuo (C.M.P.), recomendada pela C.N.E.N.¹³. Segundo, assegurar a inexistência de superposições de nuvem que, produzidas por sucessivas injeções, poderiam ultrapassar a C.M.P.

CAPÍTULO 5

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO EXPERIMENTAL

Neste Capítulo serão discutidos vários métodos dos que permitem calcular o coeficiente de dispersão experimental, a partir das curvas de variação da concentração com o tempo, medidas no campo.

5-1 Método da diferença das variâncias

Generalizando um pouco mais a idéia de utilizar dois pontos fixos para se calcular o tempo médio de trânsito do escoamento, sem influência da forma e instante da injeção, ARIS¹⁰ provou que o coeficiente de dispersão do escoamento pode ser calculado em função da diferença das variâncias das concentrações registradas em dois pontos fixos.

Utilizando esta idéia, BICHOFF e LEVENSPIEL¹¹ deduziram que, se os dois pontos fixos de medição estão suficientemente afastados das extremidades da tubulação, um termo de segunda ordem pode ser desprezado e a seguinte relação é obtida :

$$\Delta \frac{\sigma^2}{t} = (\frac{\sigma^2}{t})_2 - (\frac{\sigma^2}{t})_1 = \frac{2}{Pe_{1 \rightarrow 2}} \quad (63)$$

O parâmetro $Pe_{1 \rightarrow 2}$ é o número de Peclet válido para o trecho do escoamento compreendido entre os dois pontos fixos 1 e 2, e é dado por

$$Pe_{1 \rightarrow 2} = \frac{U \Delta x}{K_{1 \rightarrow 2}} \quad (64)$$

onde,

K_{1+2} = coeficiente de dispersão, relativo ao trecho Δx

Na equação (63), os parâmetros $(\sigma^2_t)_1$, $(\sigma^2_t)_2$, são variâncias (adimensionais) definidas a partir das curvas de variação da concentração do traçador, relativas aos pontos 1 e 2 respectivamente. Se utilizarmos i , $i = 1,2$, para representar genericamente os dois pontos fixos, podemos definir $(\sigma^2_t)_i$, tal como

$$(\sigma^2_t)_i = \frac{(\sigma^2_t)_i}{(\Delta t_0)^2} \quad (65)$$

onde,

$(\sigma^2_t)_i$ é variância dimensional da curva de variação da concentração do traçador obtida para cada um dos pontos fixos , cuja definição é :

$$(\sigma^2_t)_i = \frac{\int_0^\infty [t - (t_0)_i]^2 C(t)_i dt}{\int_0^\infty C(t)_i dt} \quad (66)$$

$$= \frac{\int_0^\infty t^2 C(t)_i dt}{\int_0^\infty C(t)_i dt} - (t_0)_i^2 \quad (67)$$

Substituindo-se (65) e (64) em (63) obtém-se uma relação que permite calcular o coeficiente de dispersão válido para o trecho de t₀ a t₁ situado entre dois pontos fixos que é dado por :

$$K_{1 \rightarrow 2} = \frac{\left[\frac{(\sigma^2)_2}{t} - \frac{(\sigma^2)_1}{t} \right] U \Delta x}{2 (\Delta t_0)^2} \quad (68)$$

Se a montagem dos equipamentos de medição-registro for feita tal como a mostrada na FIGURA 7, os cálculos da variâncias serão feitos a partir de distâncias medidas diretamente no papel do registrador ($\left[\frac{\sigma^2}{p} \right]_i$).

Como consequência da utilização da relação de transformação (42) e do fato das variâncias serem calculadas para valores discretos da variável p, separados por intervalos iguais, obtém-se a seguinte fórmula de trabalho

$$K_{1 \rightarrow 2} = \frac{U^3 \left[\frac{(\sigma^2)_2}{p} - \frac{(\sigma^2)_1}{p} \right]}{2 (\Delta x) V^2} \quad (69)$$

onde,

$$\left(\frac{\sigma^2}{p} \right)_i = \frac{\sum [p - (p_0)_i]^2 C(p)_i}{\sum C(p)_i} \quad (70)$$

$$= \frac{\sum p^2 C(p)_i}{\sum C(p)_i} - [p_0]_i^2 \quad (71)$$

O parâmetro p_0 , é uma distância medida sobre o papel do registrador, associada ao tempo de trânsito do escoamento t_0 , cuja identificação é feita através de relações semelhantes as utilizadas para identificar t_0 .

Para se calcular a variância é melhor aplicar as fórmulas (66) e (70) em vez de (67) e (71), pois estas podem conduzir a erros quando ocorrer a subtração entre grandes quantidades.

Para que a utilização deste método conduza a resultados precisos, é necessário que o registro das curvas de variações seja total e feito com precisão. Se utilizado para pontos fixos estrategicamente dispostos, pode fornecer informações a respeito do poder dispersor de bombas, filtros, etc.. Para tanto, faz-se uso da fórmula geral de adição de variância, que aplicada ao estudo da dispersão em tubulações, fornece :

$$\left(\frac{\sigma^2}{t}\right)_i = \left(\frac{\sigma^2}{t}\right)_{\text{inj.}} + \left(\frac{\sigma^2}{t}\right)_{\text{teor}} + \left(\frac{\sigma^2}{t}\right)_{\text{sing.}}$$
(72)

onde,

$\left(\frac{\sigma^2}{t}\right)_i$ = variância total, medida no ponto $x = x_i$

$\left(\frac{\sigma^2}{t}\right)_{\text{inj.}}$ = variância decorrente da dispersão ocorrida na injeção,

$\left(\frac{\sigma^2}{t}\right)_{\text{teor}}$ = parcela da variância total decorrente do processo normal de dispersão em tubulações lisas - (teórica)

$\left(\frac{\sigma^2}{t}\right)_{\text{sing.}}$ = parcela da variância decorrente da dispersão localizada, provocada pela presença da singularidade.

Empregando a fórmula anterior para os pontos fixos imediatamente à montante e à jusante da singularidade (bomba, filtro, etc.) obtém-se

$$\left(\frac{\sigma^2}{t} \right)_{\text{sing.}} = \left(\frac{\sigma^2}{t} \right)_2 - \left(\frac{\sigma^2}{t} \right)_1 \quad (73)$$

Baseando-se no que foi descrito, observa-se que ao Método da Diferença da Variância não interessa se existem singularidades, mudanças de diâmetro na parte da tubulação situado à montante ou à jusante do trecho de medição, pois seus efeitos são anulados ou desconsiderados.

Se o trecho de medição for reto, liso e desprovido de singularidades, o coeficiente de dispersão calculado a partir dos dados experimentais, deverá coincidir com o previsto pela teoria.

5-2 Método da Metade da Altura Máxima do Pico

A aplicação deste método, é ampla em diversos ramos da ciência. Em determinações de coeficientes de dispersão em tubulações foi utilizado, pelo menos, por TAYLOR³ e FERREIRA e URBAN²⁰.

Neste trabalho, a derivação da fórmula utilizada pelos autores anteriores, é feita diretamente em função do tempo, o que propicia a determinação do erro decorrente da aplicação direta da fórmula final, que é aproximada.

Calculando-se o valor da concentração máxima, a partir das relações (23) e (27) obtemos

$$C_{\max} = C(t^1) = \frac{A}{2 S \sqrt{\pi K t^1}} \exp. \left[- \frac{(x_1 - Ut^1)^2}{4 K t^1} \right] \quad (74)$$

Para os casos onde cumpre-se a condição $\frac{K}{Ux_1} \ll 1$,

pode-se afirmar que $C(t)$ é aproximadamente simétrica sendo portanto válida a relação aproximada $t^1 = t_0$ (veja FIGURA 3 e FIGURA 4) daí

$$C(t^1) = \frac{A}{2 S \sqrt{\pi K t^1}} \quad (75)$$

Calculando-se o valor de t , para o qual o valor da concentração é a metade do valor da concentração máxima obtém-se

$$\frac{1}{2} = \sqrt{\frac{t^1}{t'_{0,5}}} \exp. \left[- \frac{U^2 (t^1 - t'_{0,5})^2}{4 K t'_{0,5}} \right] \quad (76)$$

e

$$\frac{1}{2} = \sqrt{\frac{t^1}{t''_{0,5}}} \exp. \left[- \frac{U^2 (t^1 - t''_{0,5})^2}{4 K t''_{0,5}} \right] \quad (77)$$

onde,

$t'_{0,5}$ e $t''_{0,5}$ = tempo associado a metade da concentração máxima.

Na FIGURA que se segue são mostrados, graficamente os parâmetros intervenientes nas equações (76) e (77)

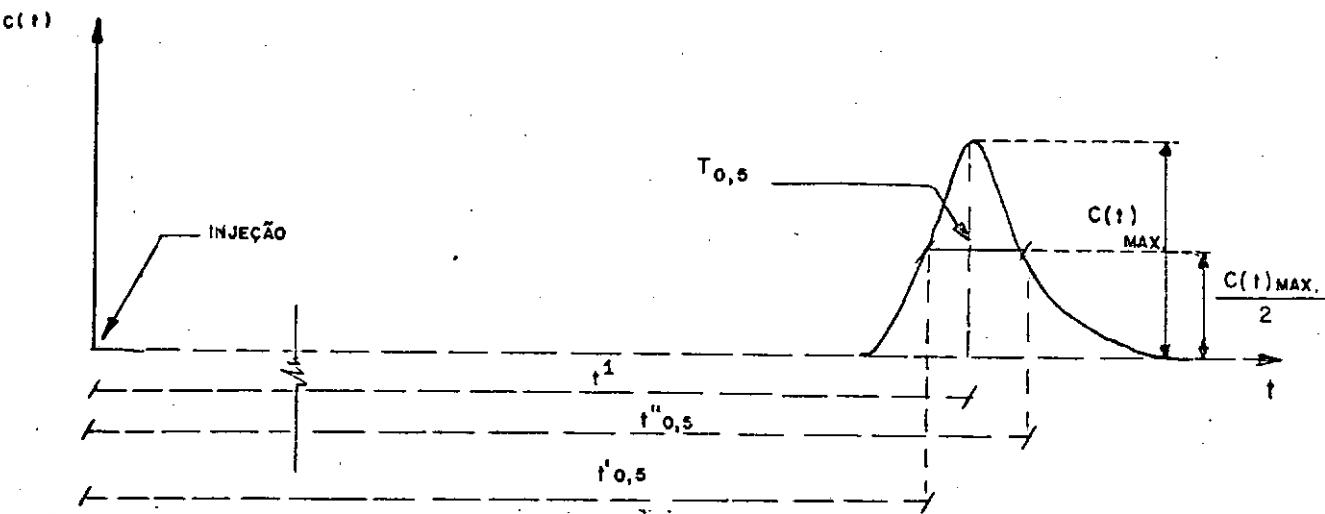


FIGURA 10 Curva de variação da concentração com o tempo.
Definição gráfica dos parâmetros do Método da Metade da Altura Máxima do Pico.

Observando-se a FIGURA 10, vê-se que para valores muito pequenos de $\frac{K}{Ux_1}$, são justificadas as aproximações

$$\sqrt{\frac{t^1}{t'_{0,5}}} = \sqrt{\frac{t^1}{t''_{0,5}}} = \sqrt{\frac{-t^1}{t_{0,5}}} = 1 \quad (78)$$

Assim sendo, obtém-se

$$\frac{1}{2} = \exp. \left[\frac{-U^2 (t^1 - t_{0,5})^2}{4 K t^1} \right] \quad (79)$$

Definindo $T_{0,5}$ através da relação

$$T_{0,5} = 2(t^1 - t_{0,5}) \quad (80)$$

e substituindo-a em (79) obtém-se

$$K = \frac{U^3 (T_{0,5})^2}{16 \ln 2 x_1} \quad (81)$$

A fórmula de trabalho para distâncias medidas no papel do registrador é dada por

$$K = \frac{U^3 (P_{0,5}^*)^2}{16 \ln 2 x_1} \quad (82)$$

onde,

$P_{0,5}^*$ e $P_{0,5}$ são distâncias medidas no papel do registrador gráfico, cujas definições são semelhantes as de $T_{0,5}$ e $t_{0,5}$ respectivamente, as quais se ligam através da relação (42).

Este método além de ser aproximado, possui as desvantagens de incluir a dispersão de traçador na injeção, cuja ocorrência é inevitável, e de necessitar de conhecimento do instante da injeção.

Não obstante, permite o cálculo rápido de K , nos casos em que boa precisão não é necessária.

5-3

Método da Metade da Concentração Associada ao Tempo de Trânsito do Escoamento

Embora a aplicação deste método, introduzido por LENDA e ZUBER⁷, seja mais diretamente ligada a escoamentos subterrâneos, sua validade extende-se a determinações de coeficientes de dispersão em experiências em rios, canais e tubulações.

Tal como sugere, o nome adotado para este método, o coeficiente de dispersão é calculado a partir da definição de dois parâmetros $t'_{0,5}$ e $t''_{0,5}$, para os quais o valor da concentração é igual a metade da concentração relativa ao tempo de trânsito do escoamento entre o ponto de injeção e um ponto fixo. Analiticamente

$$C(t'_{0,5})^* = C(t''_{0,5}) = \frac{C(t_0)}{2} \quad (83)$$

Embora este método apresente a desvantagem de depender do conhecimento do instante da injeção (tal como o anterior), sua utilização permite o cálculo simultâneo de K e t_0 por um processo de aproximações sucessivas.

Na seção 5-3, a idéia do método, sintetizada na relação - (83), será desenvolvida a partir da definição de $C(t)$ através de duas diferentes relações.

É conveniente assinalar que nada há de especial no fato de se tomar a metade da concentração associada ao tempo médio de trânsito do escoamento.

Se necessário outras frações podem ser tomadas, sem sérios prejuízos à precisão.

O fato deste método utilizar somente dois pontos da curva registrada por um lado concorre para que a precisão seja limitada, mas por outro permite interpretar curvas não integralmente registradas, ou parcialmente afetadas de distorções. Estas ocorrências frequentemente se verificam em experiências com traçadores, por necessidades operacionais ou como consequência de acidentes.

5-3-1 Aplicação à Solução Normal

Nesta parte, a curva das variações da concentração é definida pela relação (6), denominada "Solução Normal", ou mais exatamente por (23), já que a variável "distância" é fixada em ponto qualquer $x = x_1$.

Calculando-se os valores da concentração para $t = t'_{0,5}$, $t = t''_{0,5}$ e $t = t_0$ e comparando-se entre si, através da relação (83) obtém-se as relações adimensionais :

$$\frac{K}{Ux_1} = \frac{\left[1 - \frac{t'_{0,5}}{t_0} \right]^2}{4 \frac{t'_{0,5}}{t_0} \ln \left[2 \left[\frac{t_0}{t'_{0,5}} \right]^{1/2} \right]} \quad (84)$$

$$\frac{K}{Ux_1} = \frac{\left[1 - \frac{t''_{0,5}}{t_0} \right]^2}{4 \frac{t''_{0,5}}{t_0} \ln \left[2 \left[\frac{t_0}{t''_{0,5}} \right]^{1/2} \right]} \quad (85)$$

Utilizando-se a relação de transformação (42), determina-se a "fórmula de trabalho", para distâncias medidas no papel do registrador

$$\frac{K}{Ux_1} = \frac{\left[1 - \frac{P'_{0,5}}{P_0} \right]^2}{4 \frac{P'_{0,5}}{P_0} \ln \left[2 \left(\frac{P_0}{P'_{0,5}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (86)$$

$$\frac{K}{Ux_1} = \frac{\left[1 - \frac{P''_{0,5}}{P_0} \right]^2}{4 \frac{P''_{0,5}}{P_0} \ln \left[2 \left(\frac{P_0}{P''_{0,5}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (87)$$

A figura que se segue, mostra graficamente os parâmetros $P'_{0,5}$, $P''_{0,5}$ e P_0 , utilizados em (86) e (87)

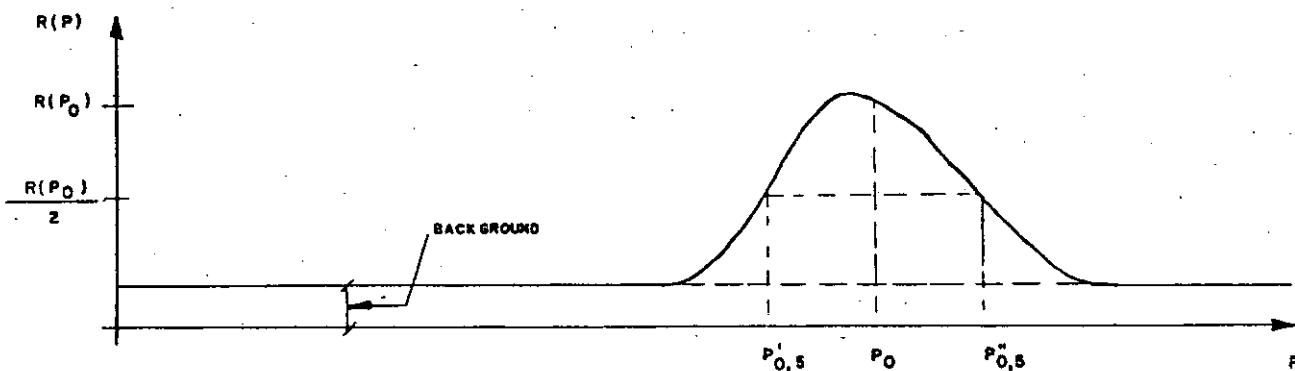


FIGURA 11 Definição gráfica dos parâmetros $P'_{0,5}$, $P''_{0,5}$ e P_0 .

A determinação de P_0 , pode ser feita, em primeira aproximação, através de um método idêntico aos de obtenção de t_0 , ou seja identificação com t^i , onde $i = 1, 2, \dots, 6$.

Uma vez determinado P_0 , calcula-se $P'_{0,5}$ e $P''_{0,5}$ através da relação

$$R(P'_{0,5}) = R(P''_{0,5}) = \frac{R(P_0)}{2} \quad (88)$$

utilizando uma construção gráfica simples. Substituindo-se os valores dos parâmetros P_0 , $P'_{0,5}$ e $P''_{0,5}$ em (86) e (87) obtém-se dois valores para \underline{K}_{Ux_1} . Se estes valores assim determinados forem iguais,

a escolha de P_0 (e de t_0) foi correta. Caso haja uma discrepância entre os valores, é necessário recalcularos para um novo valor de P_0 ligeiramente diferente do anterior. Esta operação deve ser repetida até que os valores de \underline{K}_{Ux_1} sejam iguais, o que normalmente ocorre

após duas ou três tentativas.

Quando a igualdade for alcançada, a velocidade média do escoamento, a vazão e coeficiente de dispersão estarão simultaneamente determinados.

O tempo de trânsito do escoamento, obtido através deste processo de aproximações sucessivas, pode ser considerado como uma nova tentativa de identificação de t_0 e o parâmetro então calculado será denotado por t^7 .

5-3-2 Aplicaçāo à Soluçāo da Equaçāo de Difusāo Derivada por
LENDa e ZUBER⁷

Como foi assinalado no Capítulo 2, a solução da equação de difusão (1) depende das condições de contorno que caracterizam a forma da injeção e a geometria do meio onde o traçador se dispersa.

Para uma injeção instantânea planar em um meio semi-infinito, LENDA e ZUBER⁷, derivaram uma outra solução para a equação de difusão (1), dada por :

$$C(x,t) = \frac{A x}{2 U S \sqrt{\pi K t^3}} \exp. \left[- \frac{(x - Ut)^2}{4 K t} \right] \quad (89)$$

A normalização desta equação, aplicada aos casos onde a distância é fixada, em $x = x_1$, e a concentração varia em função do tempo, conduz a :

$$\frac{C(t) S x_1}{\pi A} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi}{Ux_1} \frac{K}{t_0} (\frac{t}{t_0})^3}} \exp. \left[- \frac{1 - (\frac{t}{t_0})^2}{4 \frac{K}{Ux_1} \frac{t}{t_0}} \right] \quad (90)$$

O gráfico desta equação normalizada para diversos valores do parâmetro $\frac{K}{Ux_1}$ é apresentado a seguir.

Ux_1

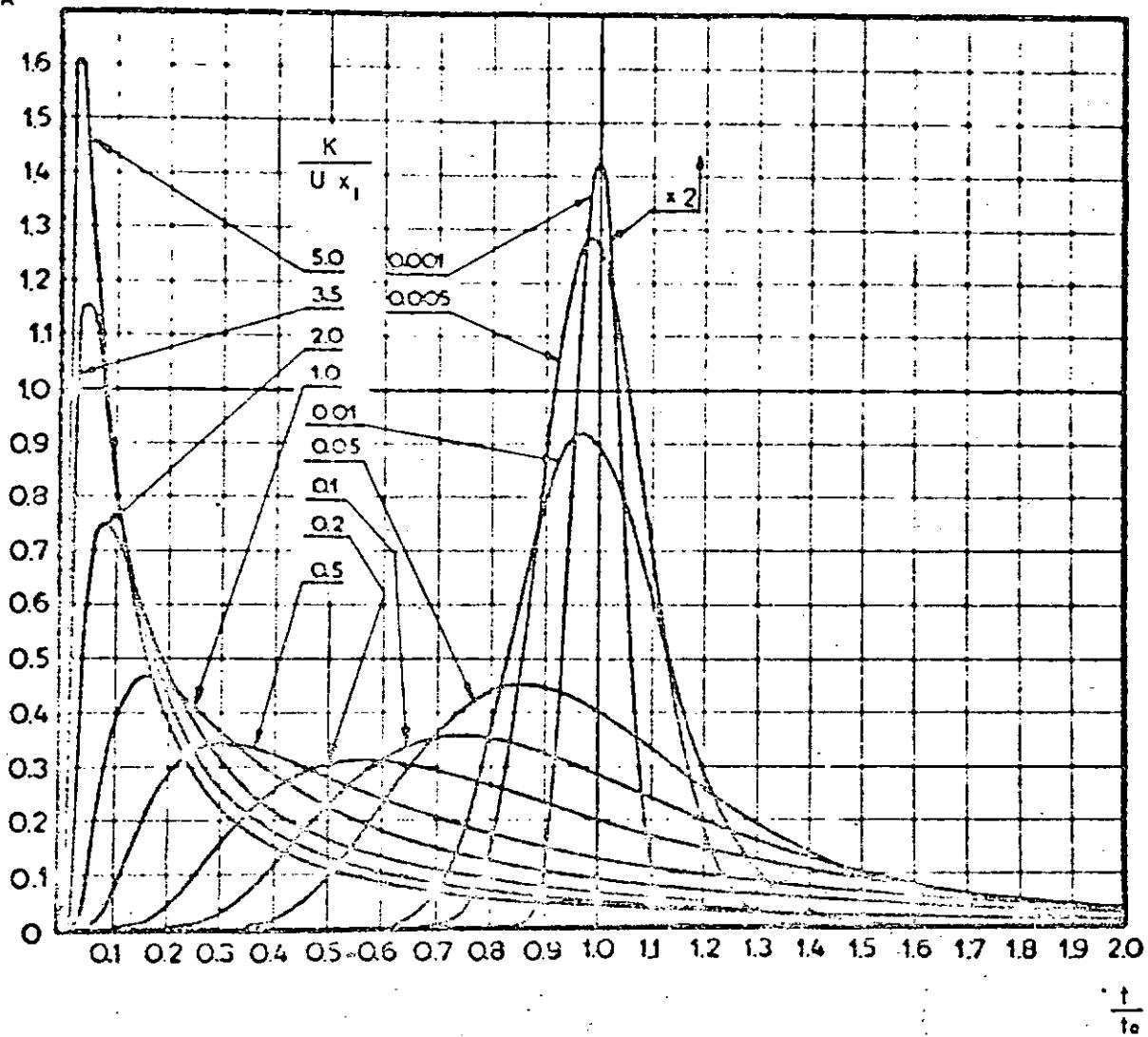
$\frac{c(t) s_{x_1}}{\pi A}$


FIGURA 12

Curva normalizada da variação temporal da concentração de traçador, para $x = x_1$. Equação (90)

Ao contrário do que ocorre para a "solução normal", a aplicação da equação (89) é válida para qualquer valor de $\frac{K}{Ux_1}$, exceto zero.

As curvas teóricas resultantes, concordam muito bem com as curvas experimentais mesmo quando $\frac{K}{Ux_1}$ é grande, sendo que para $\frac{K}{Ux_1} \ll 1$

as curvas obtidas aproximam-se grandemente das expressas pela "solução normal".

É importante ressaltar que para a solução da equação de difusão expressa por (89), o tempo médio de trânsito do escoamento e do traçador são exatamente iguais.

Por um processo análogo ao descrito na seção 5-3-1, o coeficiente de dispersão e o tempo médio de trânsito do escoamento, podem ser calculados a partir de $t'_{0,5}$ e $t''_{0,5}$, através de aproximações sucessivas entre as relações seguintes :

$$\frac{K}{Ux_1} = \frac{\left[1 - \frac{t'_{0,5}}{t_0} \right]^2}{4 \frac{t'_{0,5}}{t_0} \left[\ln \left[2 \left[\frac{t_0}{t'_{0,5}} \right]^{3/2} \right] \right]} \quad (91)$$

$$\frac{K}{Ux_1} = \frac{\left| 1 - \frac{t''_{0,5}}{t_0} \right|^2}{4 \frac{t''_{0,5}}{t_0} \ln \left[2 \left[\frac{t_0}{t''_{0,5}} \right]^{3/2} \right]} \quad (92)$$

Transformações operadas nestas fórmulas de modo a expressá-las em função de distâncias medidas no papel do registrador conduzem a "fórmulas de trabalho" semelhantes a (86) e (87).

A única diferença que ocorre é um expoente que passa de $-1/2$ para $3/2$.

Por simplicidade, e para se manter uma certa coerência com a nomenclatura anterior K é desprovido do sub-índice 1 (hum), o que indica que este coeficiente de dispersão relaciona-se com a dispersão que ocorre entre o ponto de injeção $\rightarrow x = x_1$.

5-4 Comparação entre os Métodos Anteriores

O objetivo desta seção é estabelecer uma ligação entre o Método das Variâncias e os descritos nas seções 5-2 e 5-3, que sem dúvida baseam-se nas mesmas idéias. Esta ligação possibilita a comparação entre os resultados obtidos pelas suas aplicações.

Tomando-se como ponto de partida a relação (68), obtém-se

$$\frac{(\sigma_t^2)_2 - (\sigma_t^2)_1}{(\Delta t_2)^2} = \frac{2 K_{1 \rightarrow 2}}{U \Delta x} \quad (93)$$

Sabendo-se que a curva $C(x)$, expressa pela equação - (16), é gaussiana, obtém-se que

$$(\sigma_x^2)_i = 2 K(t)_i \quad (94)$$

É sabido que, para valores suficientemente pequenos de $\frac{K}{Ux_1}$,

a curva $C(t)$ definida por (23) torna-se aproximadamente simétrica, de tal modo que, baseando-se na relação de transformação $t = \frac{x}{U}$,

torna-se justificada a seguinte aproximação

$$(t_0)_i = \frac{(\bar{x})_i}{U} \quad (95)$$

Assim sendo, obtém-se das aplicações destas relações de transformações sobre (66)

$$(\sigma_t^2)_i = \frac{\int_0^\infty [x - (\bar{x})_i]^2 C(x)_i dx}{U^2 \int_0^\infty C(x)_i dx} = \frac{(\sigma_x^2)_i}{U^2} \quad (96)$$

Substituindo-se (94) em (96) obtém-se

$$(\sigma_t^2)_i = \frac{2 K (t_0)_i}{U^2} \quad (97)$$

Para solução da equação de difusão derivada por LENDA-ZUBER⁷, as relações (94) e (96) são também válidas, de modo que comparando (97) e (93), chega-se a

$$\left[\frac{K_{1+2} (\Delta t_0)^2}{U \Delta x} \right]_{1+2} = \left[\frac{K t_0}{U^2} \right]_2 - \left[\frac{K t_0}{U^2} \right]_1 \quad (98)$$

Para os casos em que a tubulação tem diâmetro constante, pelo menos entre o ponto de injeção e o segundo ponto de medição, e o primeiro ponto de injeção situa-se a jusante do ponto de boa mistura, é possível escrever a relação aproximada.

$$U_1 = U_{1 \rightarrow 2} = U_3 \quad (99)$$

Os valores U_1 e U_3 são velocidades medidas do escoamento calculadas pelo Método da Velocidade com um só ponto de medição situado em $x = x_1$ e $x = x_2$ respectivamente. O valor $U_{1 \rightarrow 2}$, é a velocidade média do escoamento entre os pontos fixos, identificando-se com o U anteriormente utilizado.

Substituindo-se (99) em (98) obtém-se

$$\frac{K_{1 \rightarrow 2}}{U} = \frac{1}{\Delta x} \left[\left[\frac{K}{U} x \right]_2 - \left[\frac{K}{U} x \right]_1 \right]. \quad (100)$$

Na relação anterior, bem como na (98), os valores de K , t_0 e x , cujos sub-índices são 2 e 1, relacionam-se com os trechos injeção $\rightarrow x = x_2$ e injeção $\rightarrow x = x_1$ respectivamente.

CAPÍTULO 6

EXPERIÊNCIAS REALIZADAS

Como foi dito anteriormente, os dados experimentais, deste trabalho, tem como origem dezoito medições de vazões pelo Método - Pico-a-Pico, realizadas em tubulações industriais de grande porte. No que se segue são apresentados em resumo, os dados e resultados concernentes a estas medições, além de detalhes dos diversos injetores utilizados.

Os métodos utilizados na determinação de ΔP_0 , que é o único parâmetro da equação (43) que tem origem na análise das curvas experimentais, e a estimativa da precisão alcançada nas medições, serão abordados separadamente no Capítulo 7.

6-1 Experiências na FABOR

6-1-1 Descrição Geral

Foram realizadas seis experiências, com objetivo de medir, com precisão, vazões nos dois troncos de alimentação do sistema de refrigeração da Fábrica de Borracha. Parte dos resultados foram de grande interesse prático, pois permitiram aos engenheiros da FABOR concluir que a capacidade real de bombeamento atual seria insuficiente para atender futuras expansões da fábrica.

Infelizmente, falhas nas medições de pressões manométricas realizadas pelos interessados, impediram a verificação da curva de calibração das bombas.

A FIGURA 13, apresenta um esquema simplificado dos locais de medições, disposição dos detectores e locais de injeções.

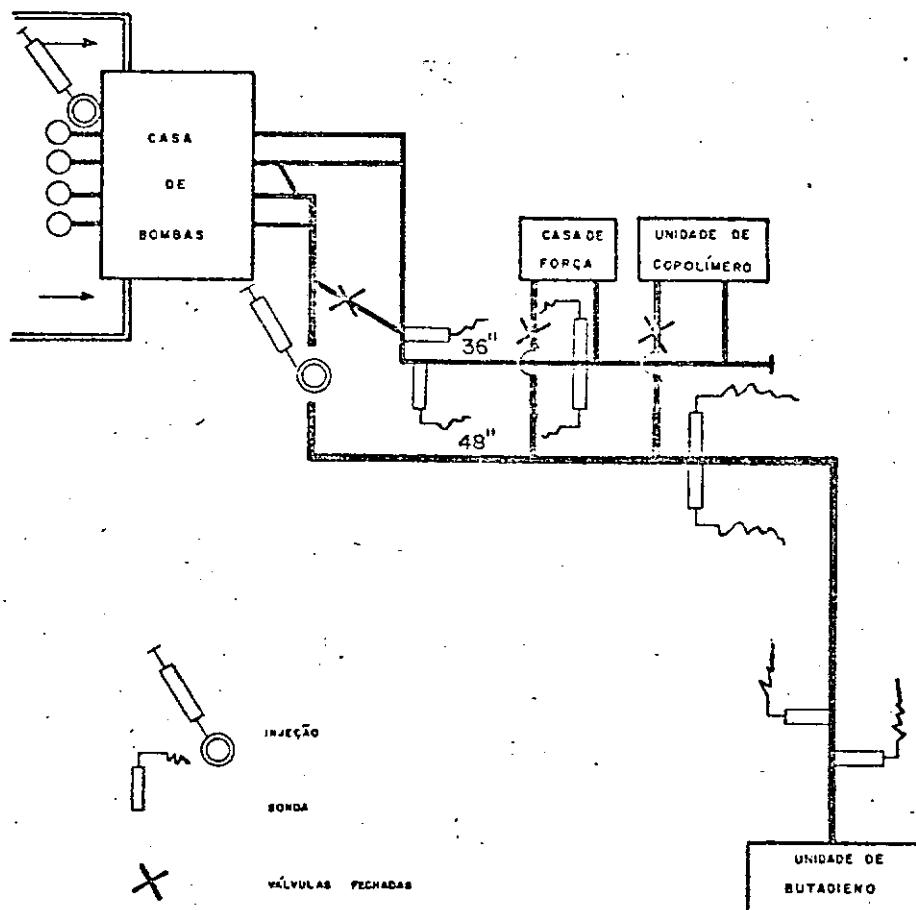


FIGURA 13 Experiências na FABOR - esquema da situação das tubulações, locais de injeções e detecções.

O fato das tubulações serem de grande diâmetro, (36" e 48"), de transportarem água salgada sob grande pressão (aproximadamente 5 atm.), acrescido da impossibilidade de paradas no bombeamento, justificaram plenamente o emprego de métodos radioativos.

Na tubulação de 48", a introdução do traçador radioativo foi realizada através de um injetor especialmente projetado, o qual foi instalado sobre uma válvula de uma pequena derivação que pode ser removida. Este injetor incluia uma pequena garrafa de ar-comprimido, de modo a vencer pressão interna e a tornar rápida a injeção.

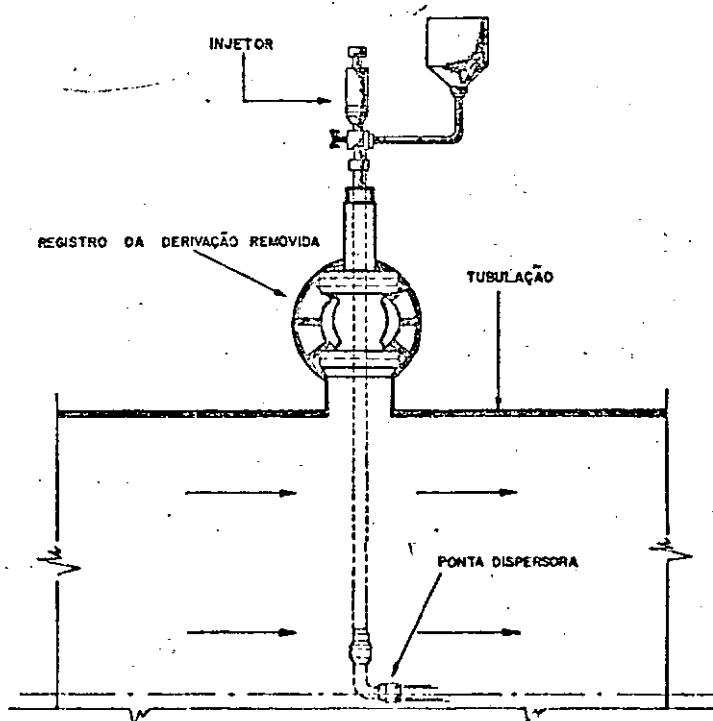


FIGURA 14

Injetor de ar-comprimido utilizado na tubulação de 48"
- experiência na FABOR -

O injetor foi posicionado no centro da tubulação de modo que o jato através da "ponteira dispersora" garantisse ainda mais a boa mistura do traçador.

Como nas três medições de vazões, nesta tubulação não houve problemas sérios de limitações físicas, fixou-se a distância $\frac{x_1}{D}$ = 195, o que foi suficiente para promover o misturamento do traçador.

A distância entre os dois pontos de detecção, foi tomado como aproximadamente seis vezes o tamanho da nuvem, ou seja $\frac{\Delta x}{N} \approx 6$.

As três últimas experiências desta série foram realizadas em tubulação com diâmetro de 36'', em que foi necessária a realização de injeções na sucção da bomba acoplada a esta tubulação. Isto decorreu do fato do comprimento total de tubulação existente não ser suficiente para garantir uma boa mistura e um distanciamento ideal entre os detectores.

É razoável supor, tendo por base o que foi discutido, no Capítulo 4-2, que uma injeção do traçador, tal como é mostrado na FIGURA 15, somado ao efeito dispersor de várias curvas, registros, e ainda a existência de uma distância $\frac{x_1}{D}$ = 75, tenha promovido a "boa mistura" do traçador.

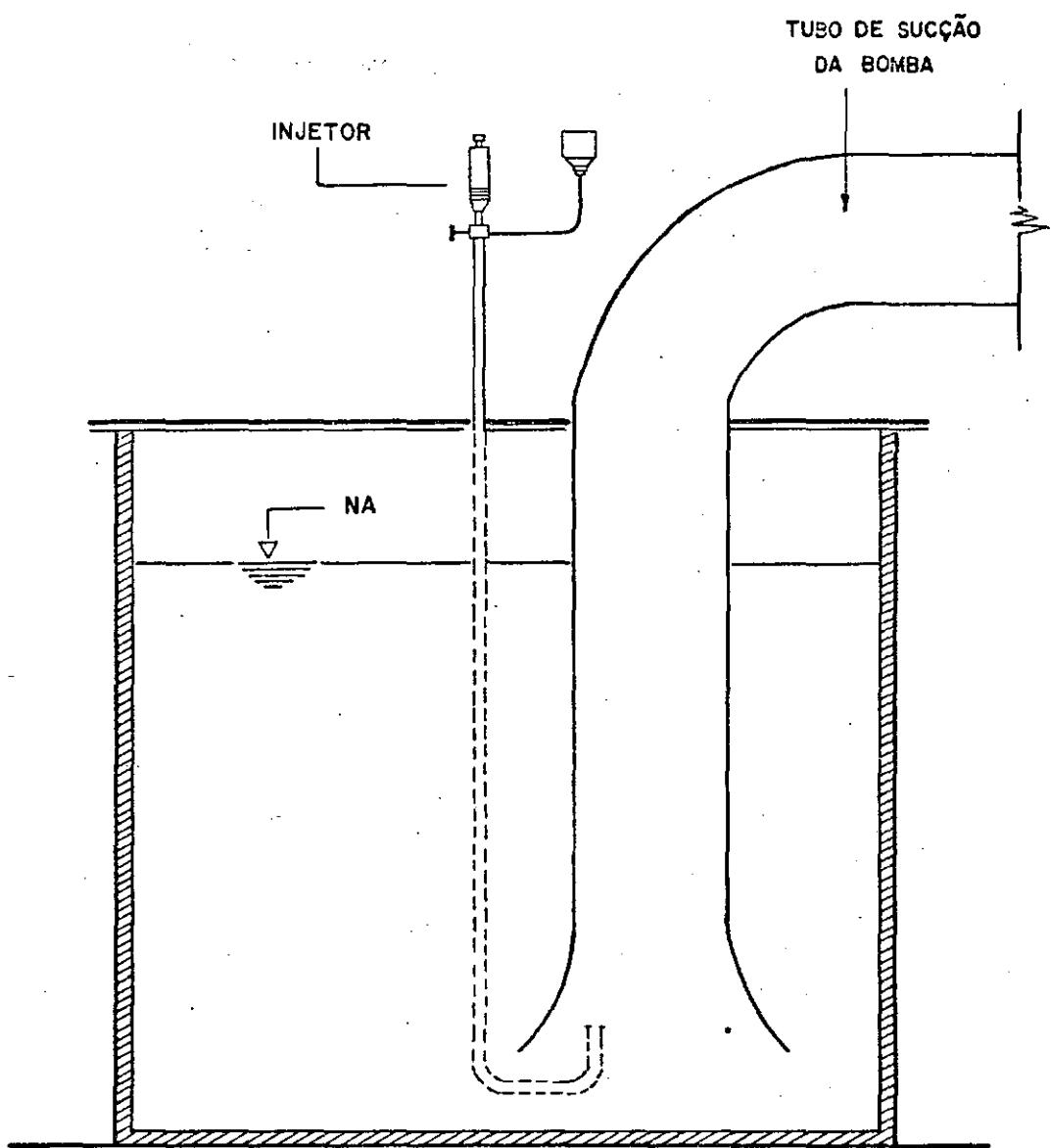


FIGURA 15 Injeção do traçador na tubulação de 36".
- experiência na FABOR -

A distância fixada entre os pontos de detecção foi de -

$$\frac{\Delta x}{D} = 3,5$$

Na realidade, esta distância foi a maior possível, pois à montante do 1º ponto de detecção existem mudanças de diâmetro e à jusante do 2º ponto de detecção a tubulação ramifica-se.

Em todas experiências desta série foram utilizados dois conjuntos de medição-registro, funcionando de modo completamente independentes, com o objetivo de garantir o êxito da medição em caso de acidente, e de possibilitar comparações entre os resultados obtidos.

Para cada conjunto, foram utilizadas duas sondas de cintilação com cristal de Na I , ativado por tálio, com 1,5'' x 1'' , conectadas a "ratemeters" e a um registrador, tal como mostrado na FIGURA 7.

Na FIGURA 16 e 17, são apresentados os dois conjuntos de detecção-registro empregados nesta série de experiências.

As sondas mostradas em ambas as figuras que se seguem são do tipo SGS - 50 DN, e os "ratemeters" são os SPP - 3 projetados por SAPHYMO-SRAT para ampla utilização.

O registrador mostrado na FIGURA 16, é o modelo 7100 - B , bi-canal, fabricado pela HEWETT-PACKARD, que nesta série de experiências foi alimentado pela rede de distribuição pública. O outro, visto na FIGURA 17, é o modelo ETP - 3 , da SAPHYMO-SRAT, que por causa da alta precisão, sólida construção e pelo fato de ser alimentado por bateria é extremamente útil em trabalhos de campo.

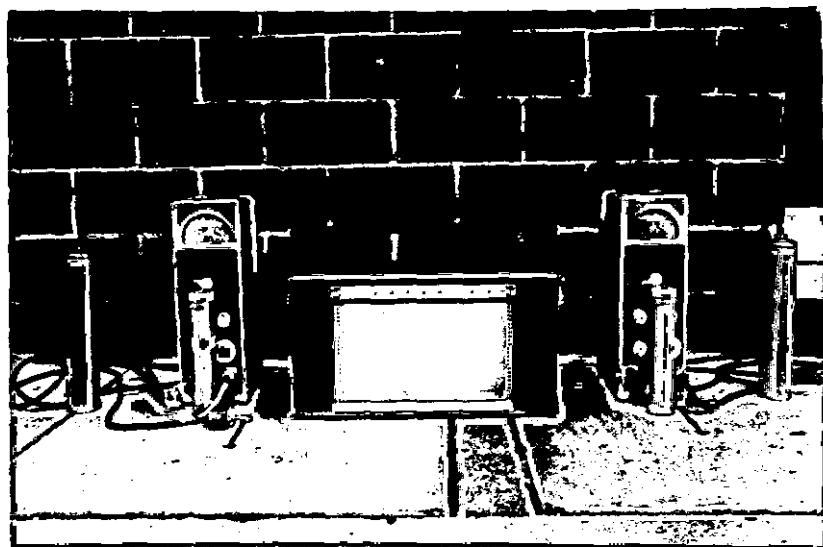


FIGURA 16

Conjunto A , de medição e registro.



FIGURA 17

Conjunto B , de medição e registro.

Na tabela que segue são apresentados outros dados de interesse, relativos a esta série de experiências.

	FABOR Nº 1	FABOR Nº 2	FABOR Nº 3	FABOR Nº 4	FABOR Nº 5	FABOR Nº 6
DIAMETRO EXTERNO DA TUBULAÇÃO		48"			36"	
ESPESSURA DO REVESTIMENTO DE CONCRETO		1/2"			1/2"	
ESPESSURA DA PARE- DE DE AÇO		3/8"			3/8"	
TIPO E LOCAL DE INJEÇÃO		INJEÇÃO A AR COMPRIMIDO NO CENTRO DA TUBULAÇÃO		INJEÇÃO NO TUBO DE SUCÇÃO DA BOMBA		
ATIVIDADE INJETADA (m C ₁)	NÃO MEDIDA	92	92	29,5	29,5	29,5
DISTANCIA INJ. - 1 ^o DET. (x = x ₁)	CONJ. A				68,20m	
	CONJ. B	190,00m			64,00m	
DISTANCIA 1 ^o DET. - 2 ^o DET (Δ x)	CONJ. A		234,90m		123,50m	
	CONJ. B		222,40m		127,80m	

TABELA 2 Dados relativos as experiências realizadas na FABOR.

Os valores de atividade integrantes da tabela anterior, são aproximados, pois a divisão volumétrica da atividade total, nas várias porções a serem injetadas não foi cuidadosamente realizada.

Para o "ratemeters" foram fixadas as seguintes constantes :

- discriminador de energia = 50 KeV
- constante de tempo = 1,2 s

As velocidades dos registradores foram fixadas em $V = 0,24$ in/s e $V = 0,50$ cm/s, para os conjuntos A e B respectivamente.

6-1-2 Resultados das Medições de Vazões

Embora a precisão exigida para as medições de vazões fosse - de 5% , o planejamento destas experiências visou atingir uma precisão estimada de 1% , para a velocidade média do escoamento.

Na Tabela 3 , são apresentados os resultados das velocidades médias do escoamento para diferentes condições de bombeamento.

Os valores das vazões foram calculados a partir das velocidades médias medidas e das seções $S = 1,086\text{m}^2$ e $S = 0,59\text{m}^2$, relativas às tubulações de 48'' e 36'' , sem considerações a respeito dos erros inerentes ao diâmetro.

		FABOR Nº 1	FABOR Nº 2	FABOR Nº 3	FABOR Nº 4	FABOR Nº 5	FABOR Nº 6
Nº DE BOMBAS EM FUNCIONAMENTO		2	3	3	1	1	1
TAXA DE CONTAGEM MÁXIMA (cps)	CONJ. A	4200-2600	—	10500-7000	—	14500-7500	15000-7000
	CONJ. B	5000-4000	—	12000-10200	—	11000-7500	11000-8000
VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO (m/s)		2,76	3,12	3,10	—	2,76	2,38
VAZÃO (m ³ / s)		3,00	3,39	3,37	—	1,63	1,40

TABELA 3 Resultados obtidos nas experiências na FABOR.

Os valores das taxas de contagens máximas da experiência - FABOR nº 2, não foram anotadas pois foi necessário modificar as escalas dos "ratemeters". Os picos resultantes, embora deformados, puderam ser interpretados através dos métodos que não fazem uso da curva inteira. Para confirmar os resultados assim obtidos, esta experiência foi repetida imediatamente sob condições de bombeamento invariáveis.

Da comparação dos resultados da FABOR nº 3 e FABOR nº 2, pode-se deduzir a excelente reproducibilidade.

A experiência FABOR nº 4, foi totalmente perdida, pois as conexões dos cabos dos "ratemeters" apresentaram defeitos.

As variações que se observam nas taxas de contagens máximas medidas pelos conjuntos A e B, para uma mesma experiência, decorrem do fato das sensibilidades das sondas serem diferentes e de imprecisões naturais decorrentes de leituras instantâneas nos "mostradores" dos "ratemeters".

6-1-3 Segurança Radiológica

Muito embora todas as fases do manuseio da substância radioativa, ($\text{NH}_4\text{-}^{82}\text{Br}$) , tenham sido simuladas antes da realização das experiências, um acidente não pode ser evitado.

Por defeito de fabricação, as ampolas de vidro contendo traçador radioativo estavam sob pressão, o que provocou o "estouro" de uma delas no momento de ser preparada para injeção. No entanto, não houve contaminação pessoal e o local foi lavado continuamente com uma mangueira de incêndio até que fosse garantida a descontaminação. O efluente desta lavagem foi encaminhado a rede de esgotos da refinaria.

As ampolas a serem quebradas, foram imersas em uma solução de tiossulfato de sódio com o objetivo de evitar perdas do ^{82}Br livre.

Nas operações realizadas com o material radioativo foram utilizados manipuladores especialmente projetados pela D.A.R. - I.E.N., e foi cumprido um rodízio entre o pessoal encarregado da preparação das injeções, com o objetivo de diminuir o tempo de exposição à radiação .

Além do controle individual deste pessoal através de filmes dosimétricos e dosímetros, foi requisitado um especialista do Serviço de Proteção Radiológica do I.E.N., que supervisionou e monitorou todas as operações com o traçador.

Nenhum dano foi causado pela água marcada em escoamento através da tubulação pelo fato de ser salgada e completamente poluída, portanto, imprópria ao abastecimento.

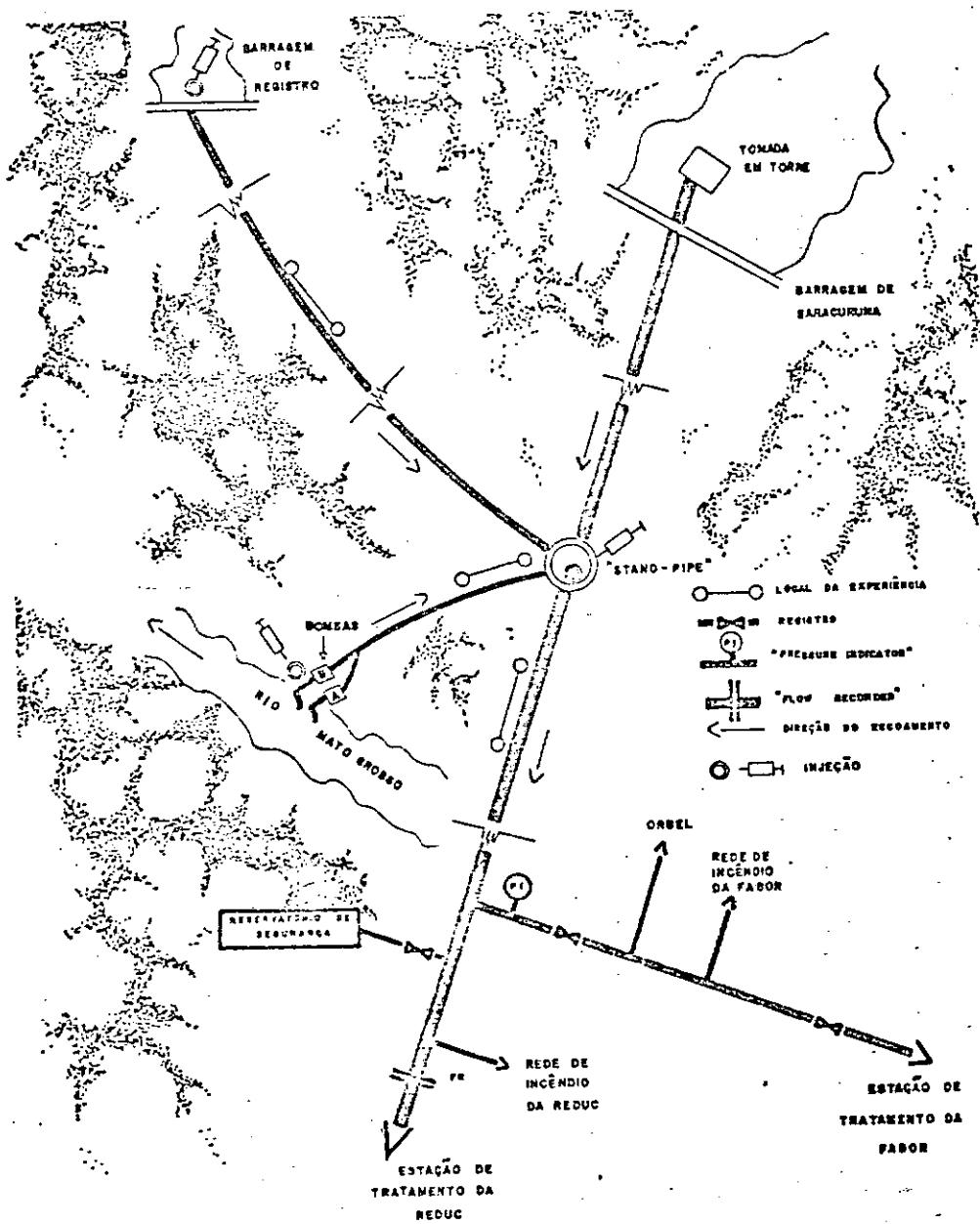
Além disso, após ser utilizada na refrigeração das diversas unidades da fábrica, retornou, por um longo canal, a baía da Guanabara onde o traçador praticamente desapareceu em virtude do seu decaimento rápido e da grande dispersão.

6-2 Experiências na REDUC

Estas experiências foram realizadas no Sistema Adutor de Saracuruna, que abastece de água doce o complexo petroquímico formado pela Fábrica de Borracha (FABOR), Refinaria Duque de Caxias (REDUC) e outras unidades menores.

O objetivo foi medir com razoável precisão a vazão total da adutora, sob diversas solicitações das unidades de consumo e a contribuição de cada uma das três adutoras formadoras do sistema, em uma ocasião de grande estiagem.

Na FIGURA 18, a seguir, é mostrada a interligação entre as adutoras que partindo da Barragem de Saracuruna, Registro e do Rio Mato Grosso somam suas vazões em um "stand-pipe"

**FIGURA 18**

Fontes de abastecimento, unidades abastecidas pelo Sistema Adutor de Saracuruna.

Devido as peculiaridades de cada adutora, as doze experiências realizadas no Sistema Adutor de Saracuruna foram divididas em três partes.

- experiências na Adutora de Saracuruna, à jusante do "stand-pipe",
- experiência na Adutora do Registro,
- experiências na Adutora de Mato Grosso.

Assim sendo os dados e os resultados obtidos, embora ordenados sob o título geral "REDUC nº ...", serão apresentados separadamente.

6-2-1 Experiências na Adutora de Saracuruna

Primeiramente foram realizadas seis experiências na tubulação à jusante do "stand-pipe", com o objetivo de medir a vazão total sob diferentes condições.

A injeção do traçador nesta tubulação foi feita de um modo simples, pois o injetor consistiu de um tubo plástico com a extremidade inferior introduzida na entrada da tubulação e a superior coplada a um funil por onde foi vertido o traçador.

Como a diferença entre o nível d'água no "stand-pipe" e a cota da boca do funil era de aproximadamente 10m, a coluna d'água formada logo após a introdução do isótopo no tubo plástico foi suficiente para produzir uma injeção rápida e sem grande dispersão.

A FIGURA 19, a seguir, mostra o local de injeção e o posicionamento aproximado do injetor, que foi instalado no ponto da tubulação de acesso mais fácil.

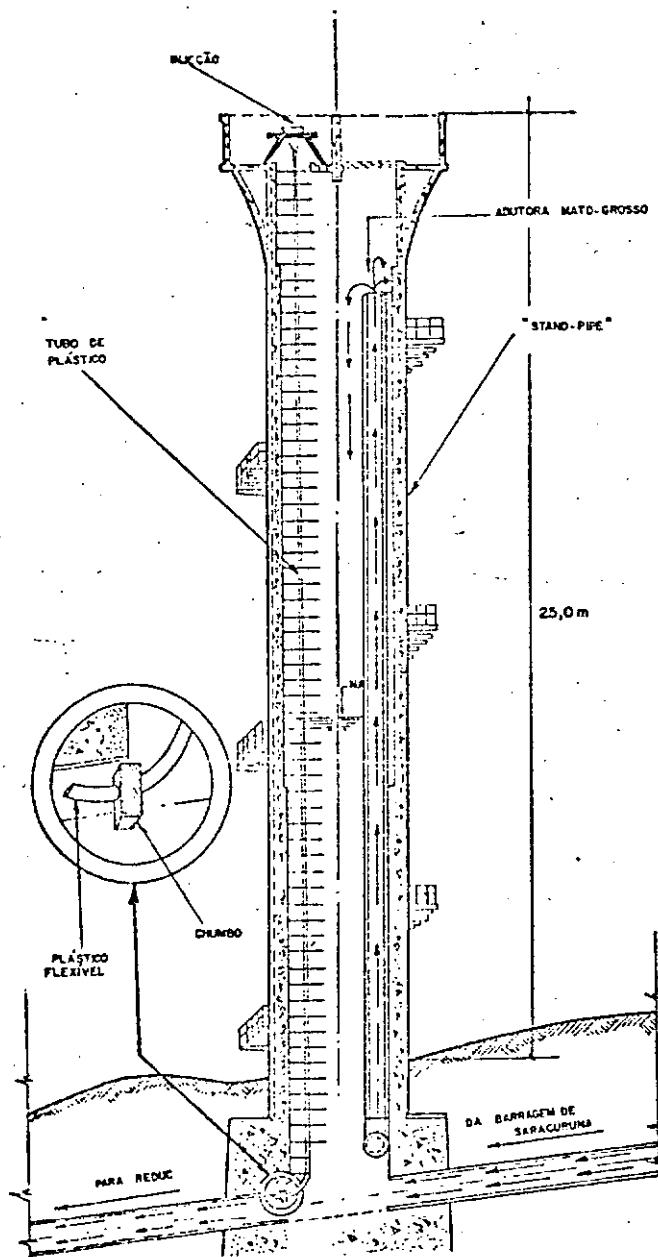


FIGURA 19

Injetor utilizado na tubulação a jusante do "stand-pipe".

O diâmetro nominal útil ao escoamento nesta adutora é de -
 $D = 800\text{mm}$, ao qual foi subtraído $4,8\text{mm}$ do revestimento betuminoso pre
visto no projeto.

A distância injeção \rightarrow la. detecção, foi de $x_1 = 122,50\text{m}$,
o que expresso admensionalmente dá $\frac{x_1}{D} = 152$. Esta distância foi suficiente para assegurar a "boa mistura" mesmo que as injeções tivessem sido executadas junto a parede da tubulação.

Embora não houvesse problemas de limitações de distâncias nestas medições, pois o trecho de tubulação descoberto era longo, a distância Δx foi fixada tendo em vista o pequeno comprimento dos cabos disponíveis nesta ocasião para estabelecer conexões entre os diversos equipamentos eletrônicos de medição e registro.

Assim sendo os detectores foram espaçados de $144,50\text{m}$, para ambos os conjuntos de medição e registro, o que em relação ao comprimento da nuvem dà $\frac{\Delta x}{N} \approx 5$.

A velocidade do papel do registrador foi fixada em $V = 0,1\text{ in/s}$ (conj. A) e $V = 30\text{ cm/min}$ (conj. B), em todas as experiências, exceto na primeira onde foi o dobro.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos nesta série de experiências.

	REDUC Nº 1	REDUC Nº 2	REDUC Nº 3	REDUC Nº 4	REDUC Nº 5	REDUC Nº 6
DIAMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO (S/ REVESTIMENTO)				800 m m		
ESPESSURA TOTAL DO REVESTIMENTO BETUMINOSO				4 , 8 mm		
TIPO E LOCAL DA INJEÇÃO				INTRODUÇÃO NA ENTRADA DA TUBULAÇÃO ATRAVÉS DE UM TUBO PLÁSTICO		
ATIVIDADE INJETADA (m c ₁)	16	13	13	9	9	9
TAXA DE CONTAGEM MÁXIMA	CONJ. A(*)	5000-2000	3800-1500	4000-1500	3700-1500	4200-1500
(c p s)	CONJ. B(*)	4000-2000	3000-1500	2500-1500	2200-1500	2600-1500
VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO (m/s)	0, 897	0, 897	0, 665	0, 682	0, 611	0, 613
VAZÃO (m ³ /s)	0, 445	0, 445	0, 330	0, 339	0, 328	0, 304

(*) os primeiros valores de taxa de contagens referem-se a 1a. detecção
e os segundos a 2a. detecção.

TABELA 4 Resultados obtidos nas experiências na REDUC.
Local : Adutora de Saracuruna, à jusante do "stand-pipe".

Os valores das atividades e das taxas de contagens, constantes da tabela anterior são aproximados.

A seguir, é apresentada uma figura que permite uma comparação entre os valores de vazões medidos por radioisótopo, e pelo "flow recorder" instalado na entrada da Estação de Tratamento da REDUC.

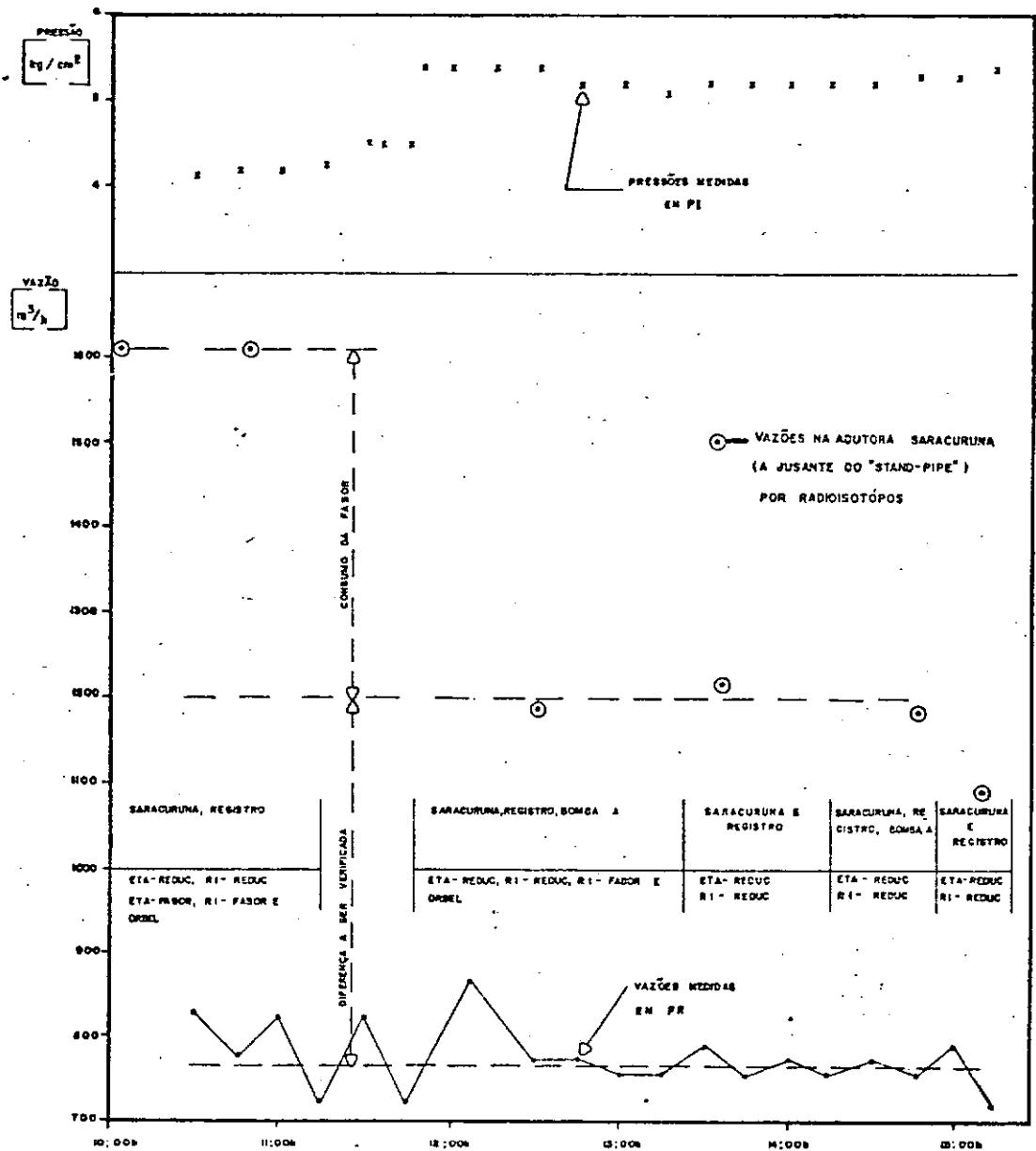


FIGURA 20 Comparação entre as medições de vazões por radioisótopo e convencionais, com indicação de consumidores.

6-2-2 Experiência na Adutora de Registro

Esta adutora que parte da pequena Barragem de Registro, funciona como reforço da Adutora de Saracuruna a qual se junta no "stand pipe". Nela, foi realizada somente uma experiência, em que não houve preocupação de grande precisão devido ao fato de se saber, de antemão, que sua contribuição era pequena.

Embora no trecho inicial, a partir da barragem, o escoamento não se processasse a seção plena, foi escolhido um trecho de medição, onde esta condição estivesse garantida.

A injeção do traçador, foi realizada no único local de acesso ao interior da tubulação; a tomada d'água da adutora, situada no corpo da Barragem de Registro.

Como consequência do fato do único local de injeção estar bastante afastado do único local de detecção, e da baixa velocidade do escoamento, a duração total da experiência foi de aproximadamente duas horas. Não obstante, o tempo de trânsito do escoamento entre os dois pontos de medições, que pode ser considerado como a duração efetiva da experiência, foi apenas dez minutos.

Na FIGURA 21, que se segue, é mostrada a operação de introdução do traçador na tubulação, na qual um recipiente de vidro contendo o isótopo foi descido até o nível d'água com ajuda de fios de nylón e aí basculado, executando-se assim uma injeção rápida, simples e segura.

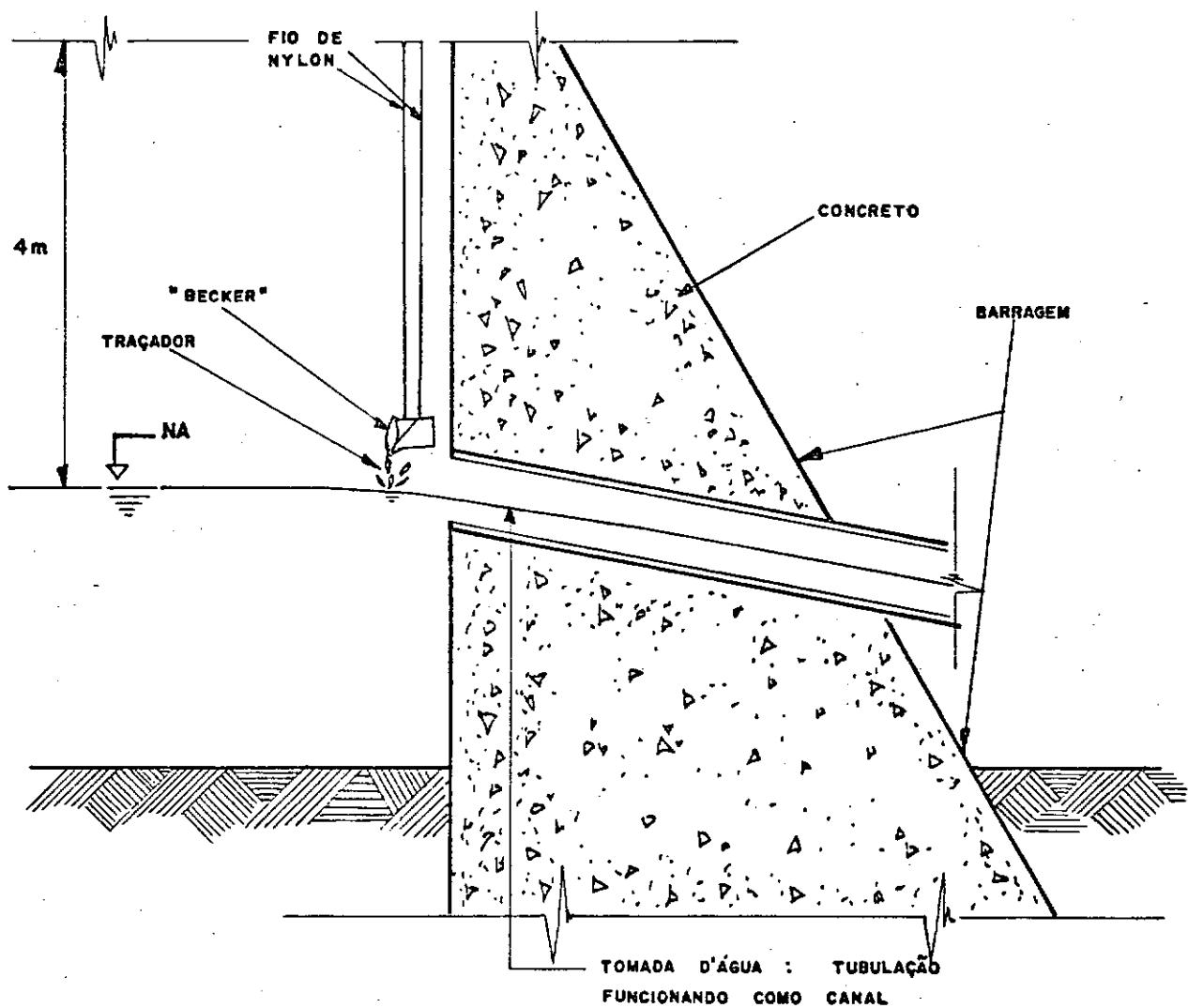


FIGURA 21 Injeção do traçador radioativo, realizada na Adutora de Registro.

A distância entre injeção + la. detecção não pode ser conhecida pelo fato da tubulação ser parcialmente enterrada, mas foi estimada em $x_1 \geq 1800\text{m}$, o que para um diâmetro útil de $D = 600\text{mm}$ fornece $\frac{x_1}{D} = 3000$.

Para local de detecção foi aproveitado um pequeno trecho descoberto de tubulação situado em um ponto baixo da adutora, com o comprimento de $\Delta x = 78,50\text{m}$.

Outros dados e os resultados obtidos nesta experiência são apresentados a seguir.

REDUC Nº 7		
DIAMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO		600mm
ATIVIDADE INJETADA (m C ₁)		12
TAXA DE CONTAGEM MÁXIMA (cps)	CONJ. A	3500 — 1300
	CONJ. B	2300 — 1300
VELOCIDADE DO REGISTRADOR (V)	CONJ. A	0,1 in/min
	CONJ. B	3 cm/min
VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO (m/s)		0,110
VAZÃO (m ³ /s)		0,0312

TABELA 5

Resultados obtidos nas experiências na REDUC.

Local : Adutora de Registro.

6-2-3 Experiências na Adutora de Mato Grosso

A terceira etapa das experiências realizadas na REDUC, consistui em determinar as vazões da Adutora de Mato Grosso sob diferentes - condições de bombeamento. Tal como pode ser visto na FIGURA 18 e na FIGURA 19, esta adutora, que tem o comprimento total de aproximadamente 350m , conduz a água captada do Rio Mato Grosso lançando-a, de modo independente, no "stand-pipe". A estação elevatória consiste de dois conjuntos motor-bomba, (bomba Hero e motor Mercedes Benz de 775 HP), que operam separada ou conjuntamente.

A injeção do traçador no escoamento foi realizada através da tubulação de escorva das bombas tal como é mostrado pela FIGURA 22.

Este tipo de injeção foi de grande simplicidade e eficiência pois fez-se as custas da pressão negativa na tubulação de succão, dispensando portanto uso de ar comprimido ou de outros artifícios. Cuidados foram tomados de modo a não permitir a introdução de ar através da tubulação de escorva de modo a prejudicar o rendimento do bombeamento.

A 1a. detecção foi localizada em um trecho de diâmetro constante, $D = 400\text{mm}$, distando aproximadamente 270m do local de injeção. A distância entre os detectores foi fixada em $\Delta x = 63,50 \text{ m}$.

Pelo fato da maior parte deste trecho ser enterrado, houve necessidade de escavações de modo a possibilitar uma medição precisa de Δx , e o posicionamento dos detectores junto a tubulação.

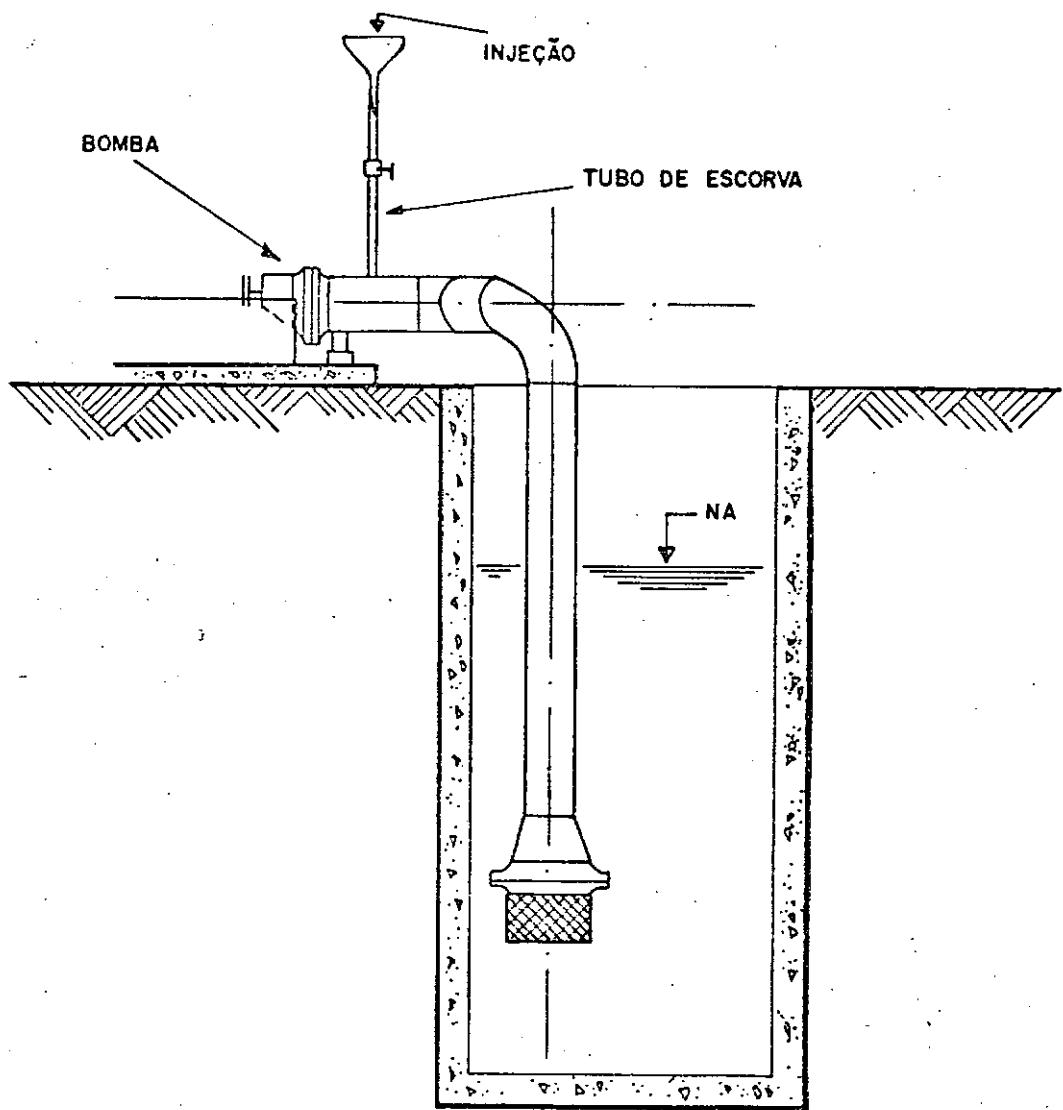


FIGURA 22 Injeção executada na Adutora de Mato Grosso.

As velocidades do papel dos registradores foram fixadas em $V = 0,1$ in/s (HP) e $V = 15$ cm/min (ETP-3), respectivamente. Na experiência REDUC nº 10, elas foram dobradas.

A Tabela 6, apresenta outros dados e os resultados relativos a estas medições.

	REDUC Nº 8	REDUC Nº 9	REDUC Nº 10	REDUC Nº 11	REDUC Nº 12
BOMBA EM FUNCIONAMENTO	A	A e B	A e B	B	B
PRESSÃO MANOMETRICA (Kg/cm ²)	5,4	6,0	6,0	5,4	5,9
ATIVIDADE INJETADA (m C ₁)	9	9	9	9	9
TAXA DE CONTAGEM MÁXIMA (c p s)	CONJ. A	5000-6000	9000-11000	7000-8000	9500-11500
	CONJ. B	9000-5000	13000-10000	10700-7000	13000-9000
VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO (m / s)	0,638	1,121	1,126	0,526	0,523
VAZÃO (m ³ / s)	0,0601	0,1418	0,1414	0,0661	0,657

TABELA 6 Dados e resultados obtidos nas experiências na REDUC.
Local : Adutora de Mato Grosso.

Em todas as experiências realizadas no Sistema Adutor de Sara curuna, o registrador HP foi alimentado por um gerador de corrente portátil devido a impossibilidade de ligação a rede de distribuição pública.

As vazões obtidas como resultados destas experiências foram de grande valia para os engenheiros da Petrobras pois possibilitaram-lhes conhecer, em uma época crítica, a capacidade de abastecimentos dos vários mananciais. Foi-lhes sugerido averiguar a origem da grande diferença (aproximadamente $430\text{m}^3/\text{n}$) verificada entre as vazões medidas por radioisótopo e pelo "flow recorder" instalado junto a refinaria. Estas diferença poderia ser causada por vazamentos na adutora, consumo excessivo na Rede de incêndio (que estava fornecendo água para obras civis na REDUC), ou erro na calibração do "flow recorder", uma vez que o Reservatório de Segurança permaneceu bloqueado durante as experiências.

6-2-4 Segurança Radiológica

Nesta série de experiências, o traçador utilizado foi também $\text{NH}_4^{82}\text{Br}$, que sob a forma de pastilhas, tornou-se mais fácil de manipular. A diluição e separação das doses, bem como as injeções, foram planejadas e executadas cuidadosamente, o que evitou qualquer contaminação dos locais de preparações e de injeções do traçador. O controle individual da exposição a radiação a que estiveram submetidos os encarregados de manipular o radioisótopo mostrou que as doses por eles recebidas foram mínimas e menores que na FABOR.

A garantia de que a nuvem de traçador no interior não causaria dano, foi obtida através da comparação do valor máximo da concentração no ponto de consumo mais próximo com a C.M.P., que é $300 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$. Este valor foi calculado através da aplicação da relação (58) para a situação mais desfavorável.

Tomando $A = 16 \mu\text{Ci}$, $D = 0,8\text{m}$ e $x = 10.000\text{m}$ (distância "stand-pipe" → Estação de Tratamento) obteve-se $C_{\max} \approx 200 \mu\text{Ci/m}^3$.

O fato deste valor calculado ser bastante inferior ao da concentração máxima premitida em água potável de uso contínuo, dá uma ideia de segurança radiológica observada nas experiências.

Pela aplicação da fórmula (53), foi calculado o tempo de trânsito da nuvem por um ponto fixo, tomado como sendo a entrada da Estação de Tratamento de Água (REDUC).

Como este tempo é muito menor que o menor intervalo de tempo entre injeções, pode-se afirmar, com certeza, que não houve na tubulação superposição das nuvens produzidas por injeções consecutivas.

CAPÍTULO 7

DISCUSSÃO

Tendo por base, os resultados obtidos em quatro experiências, que podem ser consideradas como representativas das quatro diferentes condições de medições e de injeções, são discutidos neste Capítulo, tópicos de interesse à aplicação do Método Pico-a-Pico.

Tal como foi dito, anteriormente, a escolha do método adequado de identificação do parâmetro ΔP_0 , assume uma certa importância quando utilizado nas interpretações de curvas experimentais.

De modo a possibilitar uma comparação entre os valores de ΔP_0 calculados através dos diferentes métodos de interpretação para os conjuntos A e B, cujos registradores tem velocidades diferentes, os resultados serão apresentados em termos de velocidade do escoamento.

Com a precisão alcançada nas medições dependente do método de interpretação de ΔP_0 , estes resultados serão utilizados também para estimar a precisão inerente aos resultados apresentados no Capítulo anterior.

Para estas mesmas experiências foram comparados os coeficientes de dispersão teóricos e os experimentais obtidos por diferentes métodos.

A Tabela 7, que se segue, apresenta os valores da velocidade média do escoamento, calculados pelos diferentes sete métodos de interpretação. Estes métodos estão descritos no Capítulo 3-1 (t^1, \dots, t^6) e no Capítulo 5-3-1 (t^7).

VELOCIDADES MÉDIAS DO ESCOAMENTO (m/s) SEGUNDO DIFERENTES
MÉTODOS DE INTERPRETAÇÃO DE t_0

LOCAL DA EXPERIÊNCIA	CONJUNT. DE MEDAÇÃO	$t_0 = t^1$ (MÁXIMO A MÁXIMO)	$t_0 = t^2$ (METADE DA CONT. TOTAL)	$t_0 = t^3$ (MÉDIA ARI- METICA)	$t_0 = t^4$ (MÉDIA HAR- MÔNICA)	$t_0 = t^5$ (1/3 CONT. MÁXIMA CLAYTON)	$t_0 = t^6$ (PARALE- LAS)	$t_0 = t^7$ (APROXIMAÇÃO SUCESSIVAS: LEND-ZUER)
FABOR Nº 1	A	2,763	2,824	2,843	2,757	2,761	2,756	2,754
	B	2,801	2,794	2,805	N/CALCUL.	2,791	2,786	N/CALCULADO
FABOR Nº 5	A	2,758	2,742	2,766	N/CALCUL.	2,743	2,756	N/APLICAVEL
	B	2,766	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	2,770	2,783	N/APLICAVEL
REDUC Nº 6	A	0,6118	0,6108	0,6109	0,6165	0,6101	0,6114	0,6113
	B	0,6139	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	0,6102	0,6126	N/APLICAVEL
REDUC Nº 8	A	0,6433	0,6415	0,6423	N/CALCUL.	0,6428	0,6424	N/APLICAVEL
	B	0,6427	0,6414	0,6421	N/CALCUL.	0,6432	0,6430	N/APLICAVEL

TABELA 7 Velocidade média do escoamento, obtidas através de diferentes métodos de identificação de ΔP_0 .

Os resultados apresentados anteriormente provem de curvas experimentais que apresentaram as seguintes características.

FABOR nº 1

Devido a alta taxa de contagens medidas em ambos os pontos de detecções os picos registrados não apresentaram flutuações verticais. Nas partes baixas das curvas registradas pelo conjunto A foram observadas distorções, pois o BKG não foi atingido após a passagem da nuvem e a extremidade posterior da nuvem (comumente denominada por "rabo" da curva), relativa à 2a. detecção foi menor que a relativa à 1a. detecção.

Como este fenômeno não se repetiu para o conjunto B, é justo supor que este "rabo" artificial tenha ocorrido como consequência da inércia mecânica do registrador e não por causa de material radioativo retido no interior do injetor ou nas várias zonas de estagnações existentes na tubulação.

De modo a diminuir a influência das distorções e possibilitar a determinação de ΔP_0 através dos métodos que utilizam toda a curva, foi arbitrado um BKG crescente.

Isto explica, em parte, o pequeno afastamento verificado nos resultados obtidos por estes métodos.

FABOR nº 5

Para o conjunto A, os picos registrados apresentam-se sem flutuações verticais, mas também neste caso, devido a inércia mecânica, o BKG não foi atingido após a passagem do traçador pelos dois pontos de medição. Isto fez com que o artifício de admitir um BKG crescente, que não tem justificativa teórica, fosse novamente utilizado.

As curvas registradas pelo conjunto B , foram totalmente distorcidas, provavelmente devido as falhas nas conexões. O emprego dos métodos de identificação de ΔP_0 que utilizam todos os pontos das curvas C (P) foi totalmente impraticável.

Os resultados apresentados podem ser considerados duvidosos, pois foram produtos de tentativas de determinação de ΔP_0 , a partir de curvas bastante danificadas.

REDUC nº 6

Devido a menor concentração de traçador, os picos registrados em ambos conjuntos de medição e registro apresentaram pequenas flutuações verticais.

Para o conjunto A , todas as curvas, incluindo os "ratos" foram registrados corretamente.

Ao contrário, as curvas plotadas pelo conjunto B , apresentaram-se defeituosas, pois devido a uma falha mecânica na pena do registrador, as partes baixas destas curvas não foram registradas. Mesmo assim, os valores de ΔP_0 puderam ser obtidos, através da utilização dos métodos que determinam P^1 , P^5 , P^6 .

O valor de U , obtido através da média harmônica, é um tanto artificial, pois está referido a uma origem arbitrária.

REDUC nº 8

As curvas registradas por ambos os conjuntos de medição e registro podem ser consideradas como ideais, pois todos os picos foram bem definidos. Não ocorreram deformações nos "ratos" ou flutuações verticais. As variações de diâmetros existentes entre o ponto de injeção e o local de medição impediram a utilização do método que conduz a determinação de t^7 .

Tendo por base os resultados obtidos nas experiências REDUC nº 8, observa-se que todos os métodos conduzem praticamente ao mesmo resultado, quando utilizados na interpretação de curvas, que não apresentam distorções provenientes de flutuações verticais, ou do próprio registrador gráfico.

Ocorre porém que a obtenção de picos bem definidos, nem sempre é possível em situações experimentais. A parte inferior da curva registrada, é muito susceptível a erros, pois é exatamente nela que os efeitos de inércia mecânica e elétrica do aparelho de registro e as flutuações verticais se fazem sentir com maior intensidade.

Além disso, escolha não apropriada das escalas dos "ratemeters" ou erro no posicionamento do zero do registrador, podem fazer com que as partes superiores e inferiores dos picos não sejam registradas.

Em vista disto, torna-se compreensível que, os métodos de determinação de ΔP_0 que fazem uso de todos os pontos das curvas, embora teoricamente mais precisos, podem conduzir a imprecisões ou mesmo serem inaplicáveis quando empregados em interpretações de curvas experimentais.

O método que identifica t_0 através da média aritmética - ($t_0 = t^3$), ainda que matematicamente justificado, apresenta a desvantagem adicional de atribuir uma importância relativamente grande ao "rabo" da curva.

Muito embora o método que identifica ΔP_0 através da média harmônica ($t_0 = t^4$), diminua a influência do rabo da curva, sua aplicação sofre uma limitação muito grande, pois além de utilizar todos os pontos das curvas, apresenta o sério inconveniente de depender do conhecimento do instante da injeção, o que nem sempre é fácil ou possível.

A utilização do método que determina ΔP_0 , através da dis-tância entre os máximos ($t_0 = t^1$), não parece recomendável, pois o fato deste método fazer uso de um só ponto da curva, abandonando os demais, pode conduzir a erros apreciáveis quando os pontos máximos não estiverem bem caracterizados. Isto ocorre principalmente nos casos em que são detectadas baixas taxas de contagens, resultantes de uma dispersão do traçador maior que a prevista, ou do fato da atividade injetada ter sido insuficiente. Sua aplicação torna-se mesmo impossível nos casos em que a parte superior da curva não é registrada em virtude da adoção de uma escala imprópria no ratemeter.

O método proposto por LENDA e ZUBER⁷, que através de aproximações sucessivas determinaram o parâmetro P^7 , ainda que utilizando dois pontos da curva registrada, possue a séria desvantagem de depender do conhecimento do instante da injeção, o que muito limita sua aplicação.

O método das paralelas, utilizado pela primeira vez neste trabalho, pode ser considerado, com uma extensão do método prático, proposto por CLAYTON, pois ambos baseiam-se na idéia de determinar ΔP_0 através de uma construção gráfica em que se utiliza linhas paralelas à linha de BKG. Tais construções possibilitam a determinação de ΔP_0 de modo rápido e simples, aplicável mesmo a curvas parcialmente defeituosas.

É razoável supor que o Método das Paralelas, se constitua num aperfeiçoamento do método sugerido por CLAYTON, pois o fato de utilizar um maior número de pontos das curvas, deve conduzir a uma melhor precisão.

Esta suposição é particularmente verdadeira nos casos em que as curvas registradas apresentam grandes flutuações verticais, pois pelo fato destas flutuações serem estatísticas, a média dos valores determinados por várias paralelas deve ser mais significativo do que o valor obtido pelo uso de uma só paralela.

Como foi dito anteriormente, a precisão esperada em uma determinação da velocidade média do escoamento, é principalmente função do erro inerente ao parâmetro ΔP_0 . Tendo em vista que a maior contribuição para este erro decorre do método utilizado na identificação de ΔP_0 , e que este erro varia para cada situação experimental, utilizaremos os valores constantes da Tabela 7 para estimar a precisão obtida na determinação de ΔP_0 e daí estimar o erro inerente a U nas experiências realizadas.

No que se segue não são levados em consideração os valores determinados pelos métodos que utilizam todos os pontos da curva para as experiências realizadas na FABOR, e o valor obtido pela utilização do método da média harmônica na interpretação da experiência REDUC nº6.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela, observa -se que os valores relativos a um mesmo conjunto de medição - registro pouco variaram entre si. Não obstante nota-se um desvio constante entre os valores relativos aos conjuntos A e B, para as experiências na FABOR, de aproximadamente 1%. Este "shift" é, sem dúvida, consen - quência do fato de se ter adotado no cálculo de U , a velocidade no - minal do registrador HP, apesar deste estar ligado a rede de distri - buição interna desta fábrica, seguramente sujeita a flutuações.

Este recurso foi inevitável uma vez que o sistema adotado para controlar a velocidade do registrador durante as experiências, - mostrou-se falho.

Os resultados obtidos na REDUC, onde este controle foi melhor realizado, são muito mais consistentes.

Ao se tomar a média dos valores relativos aos dois conjun - tos A e B como sendo o valor verdadeiro, pode-se estimar a preci - são atingida em ΔP_0 através do cálculo do desvio padrão relativo.

Supondo que estes valores obedecem a uma função de distribuição normal, a aplicação da técnica de cálculo do desvio padrão para pequeno número de amostras, descritas por CROW e outros¹⁷, conduz as seguintes estimativas da precisão da determinação de ΔP_0 :

$$\text{FABOR n}^{\circ} 1 \rightarrow \frac{\sigma \Delta P_0}{\Delta P_0} = 0,62\%$$

$$\text{FABOR n}^{\circ} 5 \rightarrow \frac{\sigma \Delta P_0}{\Delta P_0} = 0,57\%$$

$$\text{REDUC n}^{\circ} 6 \rightarrow \frac{\sigma \Delta P_0}{\Delta P_0} = 0,23\%$$

$$\text{REDUC n}^{\circ} 8 \rightarrow \frac{\sigma \Delta P_0}{\Delta P_0} = 0,1\%$$

Como a precisão inerente a cada fator da fórmula (41) é muito menor que 1% , para todas as experiências, a aplicação da Lei da Propagação do Erro, (equação (46)), à relação (41) permite-nos concluir que nestas experiências a velocidade média do escoamento foi medida com precisão melhor que 1% .

Examinando-se a fórmula (47), que permite calcular a precisão da determinação da vazão a partir da precisão de U , observa-se que nela é dada grande importância a precisão inerente do diâmetro.

Infelizmente, é difícil avaliar o erro que se comete ao se calcular a vazão a partir do diâmetro nominal, pois normalmente não se conhece a extensão dos desvios decorrentes do próprio processo de fabricação, e dos fenômenos de incrustação ou abrasão que ocorrem ao longo da vida útil da tubulação.

Tendo em vista, a excelente precisão obtida na determinação de U , pode-se afirmar que na maioria dos casos, a precisão da medição de vazão quase que exclusivamente depende da precisão inerente ao diâmetro útil ao escoamento.

Em vista disto, é de se esperar que em tubulações novas, revestidas de grande diâmetro e sujeitas à conservação periódica, tais como as existentes na FABOR, vazões possam ser medidas pelo Método - Pico-a-Pico.

Empregando os métodos descritos no Capítulo 2 e no Capítulo 5, dos resultados obtidos nas quatro experiências anteriormente consideradas como sendo representativas do número total delas, foram determinados valores do coeficiente de dispersão teórico e experimental.

Na Tabela 8, que se segue são apresentados os valores de K , calculados pelos diferentes métodos.

Nesta tabela são mostrados os valores resultantes da aplicação do Método da Metade da Concentração Associada ao Tempo de Trânsito à Solução Normal (Método LENDA e ZUBER), pois verificou-se que para $\frac{K}{Ux} \ll 1$, a aplicação deste método à solução derivada por LENDA e ZUBER⁷ conduz a resultados praticamente iguais.

Os valores $\frac{K}{U}$ experimentais, válidos para o trecho $x_1 \rightarrow x_2$, que aparecem na última coluna da Tabela 8, foram calculados a partir dos K relativos ao trecho injeção $\rightarrow x = x_1$ e injeção $\rightarrow x = x_2$, pela aplicação da fórmula (100).

LOCAL DA EXPERIÊNCIA	LOCais DE INJEÇÃO, MEDICOES E SINGULARIDADES EXISTENTES	TRECHO DE VALIDADE DE K	K/U TEÓRICO MÉTODO DE TAYLOR	K/U EXPERIMENTAL MÉTODO DAS VARIÂNCIAS	K/U EXPERIMENTAL MÉTODO LENDA-ZUGER APLICAÇÃO SOL. NORTE
FABOR Nº 1		INJ. → X ₁ INJ. → X ₂ X ₁ → X ₂	0,205	NÃO CALCULADO	0,26 (+27%) 0,257 (+25%) 0,254 (+24%)
FABOR Nº 5		INJ. → X ₁ INJ. → X ₂ X ₁ → X ₂	0,151	— — 0,170 (+8%)	NÃO CALCULADO
REDUC Nº 6		INJ. → X ₁ INJ. → X ₂ X ₁ → X ₂	0,161	— — 0,159 (-1,2%)	0,158 (-1,0%) 0,157 (-2,5%) 0,156 (-3%)
REDUC Nº 8		INJ. → X ₁ INJ. → X ₂ X ₁ → X ₂	0,0866 0,0949 (-9,6%)	— — NÃO CALCULADO	

TABELA 8

Coeficientes de dispersão teórico e experimentais, calculados por diferentes métodos com indicação do número e tipo de singularidades existentes na tubulação.

Na tabela anterior, estão indicadas as singularidades existentes nos diversos trechos, para facilitar o entendimento e a análise dos resultados apresentados.

O número de peças está colocado entre parentesis e as letras representam o seguinte :

B = bomba,

C = curva,

D = derivação,

I = local da injeção,

R = redução de diâmetro,

T = flange de inspeção do tubo,

V = válvula aberta.

Os valores expressos em porcentagem, representam o afastamento do valor experimental em relação ao teórico, sendo que $\frac{K}{U}$ tem como unidade (metros).

Analizando-se os resultados apresentados na Tabela 8, observa-se primeiramente que na experiência REDUC nº 6, pelo fato da tubulação ser quase toda reta e existir somente duas curvas suaves, os resultados experimentais estão em excelente concordância com o teórico, tal como deveria ocorrer.

Para a experiência FABOR nº 5 e REDUC nº 8, a existência de 2 (dois) pequenos "acidentes" nos trechos retos da tubulação provocou um aumento de aproximadamente 10% no coeficiente de dispersão teórico.

Devido as mudanças de diâmetro existentes à jusante dos locais de medição, e do desconhecimento do instante da injeção, não foi possível calcular o coeficiente de dispersão experimental entre o trecho injeção $\rightarrow x = x_2$.

Este valor seria de grande interesse, pois permitiria avaliar o efeito de dispersão provocado pelas bombas existentes na nuvem de traçador.

Na experiência FABOR nº 1, a comparação do coeficiente de dispersão experimental, $K_{1 \rightarrow 2}$, com o teórico, mostra um aumento de - aproximadamente 25% de $K_{1 \rightarrow 2}$ em relação ao $K_{\text{teórico}}$, causado por 8 "acidentes" existentes no trecho de medição.

O valor $K_{\text{inj} \rightarrow x_1}$ é válido para um trecho de $x_1 = 190.00$ metros, onde se interpuzeram 7 (sete) "acidentes", que provocaram um aumento de 27% em relação ao K_{teor} . Embora para o trecho injeção $\rightarrow x = x_1$, desta mesma experiência, o número de singularidades tenha aumentado de 7 (sete) para 15 (quinze), ocorreu concomitantemente um grande aumento de comprimento de tubulação reta, o que explica o fato do coeficiente ter permanecido praticamente inalterado.

Disto se conclue que o aumento que se observa no coeficiente de dispersão em virtude da existência de um certo número de curvas, reduções, válvulas é relativo, pois depende do comprimento da tubulação reta sobre o qual estas singularidades se distribuem.

Os resultados apresentados na Tabela 8, mostram, que o coeficiente teórico é bastante aceitável em pré-dimensionamento de experiências em que o número relativo de "acidentes" não for muito grande. Nos casos em que o número relativo deles é grande, deve-se utilizar valores de K , determinados para situações semelhantes.

A propósito, os resultados obtidos nas experiências FABOR, serão utilizados no planejamento de uma série de medições de vazões a serem executadas nas tubulações do Sistema de Refrigeração da REDUC, que são quase idênticas às da FABOR.

Os valores de K referentes às experiências FABOR nº 1 e REDUC nº 6, e os valores de t^1 e t_0 , estes identificados através de t^7 e t^3 , foram plotados sob o gráfico apresentado na FIGURA 4.

A FIGURA 23, apresenta também a curva gerada pela equação que se segue

$$\frac{t^1}{t_0} = \sqrt{1 + 3 \left[\frac{K}{Ux_1} \right]^2} - 3 \frac{K}{Ux_1} \quad (101)$$

Esta equação foi derivada de modo análogo ao da equação (29), mas tendo como ponto de partida a solução da equação de difusão obtida por LENDA e ZUBER⁷, (equação (89)).

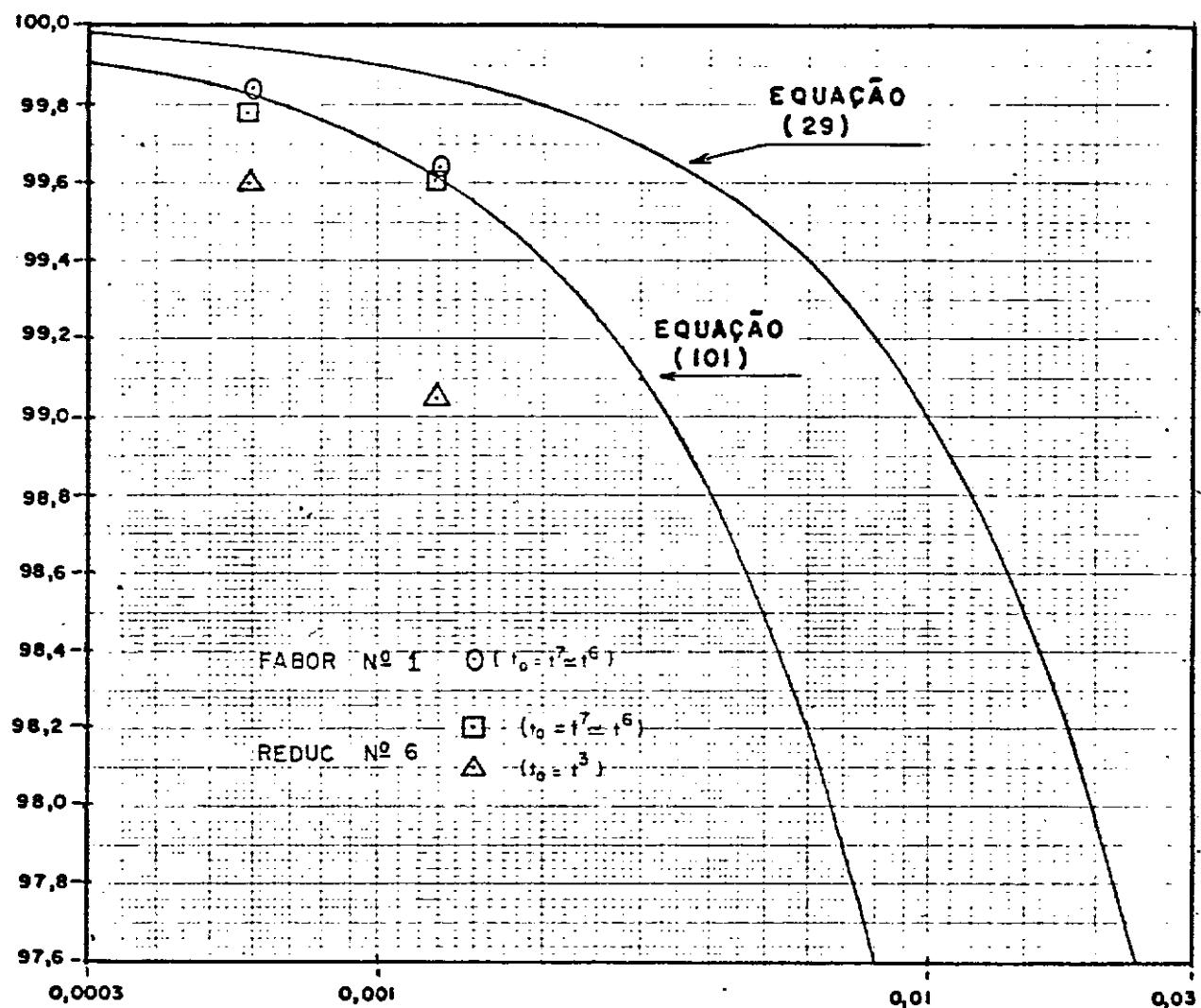
$\frac{t}{t_0}$ [%]


FIGURA 23 Comparação entre os desvios experimentais entre t^l e t_0 , com os teóricos.

É nítida na figura anterior a excelente concordância entre os pontos obtidos pela identificação de t_0 com t^7 (que é praticamente igual ao t^6) com a curva originada da solução proposta por LENDA e ZUBER⁷, mas o pequeno número de dados não autoriza que se conclua a partir deste fato, a superioridade desta solução em relação a Solução Normal, ou a superioridade do Método das Paralelas em relação aos demais.

8 - CONCLUSÕES

- 1 - O único modo de se medir vazões em tubulações, que dispensa acesso ao interior delas, e em tubulações que transportam água com alto teor salino, é através dos métodos que utilizam traçadores radioativos.
- 2 - A precisão estimada em uma medição de vazão pelo Método - Pico-a-Pico depende bastante da seção transversal da tubulação. Se esta é conhecida, a aplicação deste método fornece uma precisão satisfatória, caso contrário sua utilização é desaconselhável.
- 3 - Considerações a respeito das variâncias mostraram que o fato da injeção ser ideal ou não, normalmente não exerce influência na dispersão total.
Assim sendo, qualquer dispositivo que permita a introdução do traçador no interior da tubulação, sobretudo os mais simples, podem ser utilizados desde que se observe a distância necessária à "boa mistura". Quando o comprimento disponível de tubulação é pequeno, um dos métodos mais simples consiste em injetar o radioisótopo em um tubo auxiliar, cuja saída é inserida na tubulação de succão da bomba.
- 4 - Da análise de curvas da variação da concentração com o tempo, registradas corretamente e para altas taxas de contagens, verificou-se que todos os métodos que visam determinar o tempo médio de trânsito do escoamento entre dois pontos fixos, conduzem a resultados praticamente iguais.

É mostrado que a utilização, na prática, do método da média aritmética, ainda que teoricamente seja o mais justificado, frequentemente apresenta falhas.

O Método das Paralelas, proposto aqui, pode ser considerado como um aperfeiçoamento do método do 1/3 do pico, de CLAYTON⁹. Em virtude da sua simplicidade, precisão e do fato de ser aplicável mesmo a curvas distorcidas, parece-nos o melhor de todos.

Determinação de velocidades médias do escoamento, a partir de dois conjuntos independentes de medição e registro, apresentaram, em geral, desvios muito menores que 1%. Isto indica, como foi dito anteriormente, que a principal limitação do Método Pico-a-Pico reside na necessidade de conhecimento exato da seção transversal da tubulação.

5 - O coeficiente de dispersão experimental mostrou muito boa concordância com o teórico, para uma medição de vazão realizada em uma tubulação reta e provavelmente lisa. Em outros casos, os valores do coeficiente de dispersão experimental foram bastante maiores que os do teórico. Estes coeficientes medidos serão utilizados no planejamento de medições semelhantes a serem realizadas na REDUC.

6 - Análises realizadas a respeito do "shift" que se observa quando se tenta identificar o tempo médio de trânsito do escoamento através do tempo associado à concentração máxima, parecem indicar que a nova solução da equação de dispersão, proposta por LENDA e ZUBER⁷ descreve melhor o fenômeno de dispersão que a equação normalmente utilizada.

7 - Este trabalho contém uma ampla descrição do Método Pico-a-Pico. Contudo, não há dúvida, que, quando a seção transversal não é conhecida com exatidão, outros métodos baseados no Princípio do Balanço devem ser aplicados. Muito embora estes métodos sejam descritos em literatura, parece interessante e útil sugerir que eles sejam estudados, a fim de serem introduzidos aqui, no Brasil, para aplicação rotineira.

REFÉRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - GARDNER, R. P. e ELY, R. L. - Radioisotope Measurement Applications in Engineering, New York, Reinold, 1967. 483 p..
- 2 - CRANK, J. - The Mathematic of Diffusion, Oxford, Claredon Press, 1964. 347 p..
- 3 - TAYLOR, G. L. - The Dispersion of Matter in Turbulent Flow throught a Pipe. Proc. Roy. Soc., London 223 (A): 446 - 468, 1954.
- 4 - SCHLICHTING, Herman - Boundary Layer Theory, New York, McGraw Hill, 1958. 747 p..
- 5 - COURTOIS, G. - Sediment Moviment and Transport. Guide-book on Nuclear Techiniques in Hydrology, I.A.E.A., Vienna: 55 - 67, 1968.
- 6 - HANSEN, J. A. - Tracer Engineering in Coastal Pollution Control. Nuclear Techiniques in Environmental Pollution I.A.E.A., Vienna: 567 - 582, 1971.
- 7 - LENDA, A. e ZUBER, A. - Tracer Dispersion in Ground water Experiments. Radioisotope Hydrology, I.A.E.A. , Vienna: 619 - 641, 1970.
- 8 - KORBEL, K. - A Simple Method of the Flow Rate Determi nation of Fluids on the Basis of Diagrams obtained by a Radioactive Trace Measurement. Isotopenpraxis, 3 (2) 303 - 311, 1967.

- 9 - CLAYTON, C. G. e EVANS, G. V. - The Constant - Rate - Injection and Velocity Methods of Flow Measurement for Testing Hydraulic Machines - U.K.A.E.A., Isotope Research Division, Wantage, A.E.R.E. - R 5872, 1968.
- 10 - ARIS, R. - Notes on the Diffusion Type Model for Longitudinal Mixing in Flow. Chemical Engineering Science London, 9: 266 - 267, 1959.
- 11 - BISCHOFF, K. B. e LEVENSPIEL, O. - Fluid Dispersion Generalization and Comparison of Mathematical Model- I. Generalization of Models Chemical Engineering Science London, 17: 245 - 255, 1962.
- 12 - CLAYTON, C. G. , SPACKMAN, R. e BALL, A.M. - The Accuracy and Precision of Liquid Flow Measurement by Radioactive Isotopes. Radioisotopes Tracers in Industry and Geophysics, I.A.E.A. , Vienna 563 - 589, 1967.
- 13 - C.N.E.N. - Normas Básicas de Segurança para Proteção Contra Radiações. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Rio de Janeiro, S.R. - 1, 1970, 103 p..
- 14 - WEAST, R. C. - Handbook of Chemistry and Physics. The Chemical Rubber Co., Cleveland, 1970/1971, 2364 p..
- 15 - CLAYTON, C. G. , BALL, A.M. e SPACKMAN, R. - Dispersion and Mixing during Turbulent Flow of Water in a Circular Pipe. U.K.A.E.A., Isotopes Research Division, - Wantage, A.E.R.E. - R 5569, 1968.

- 16 - CLAYTON, C. G. - The use of a Pump to Reduce Mixing - Length in the Dilution Method of Flow Measurement. - U.K.A.E.A., Isotope Research Division, Wantage, A.E.R.E. R 4623, 1964.
- 17 - CROW, E. L. , DAVIS, F. A. , MAXFIELD, M. W. - Statistics Manual, New York, Dover Publ., 1960, 288 p..
- 18 - EVANS, G. V. - Note on the Dispersion of a Tracer in Turbulent Pipe Flow. Chemical Engineering Science, - London, 24: 1736 - 1738, 1969.
- 19 - FERREIRA, O. C. e URBAN, P. W. - Some Aspects of Flow Rate Measurements in Pipes Using Radioactive Tracers. International Journal of Applied Radiation and Isotopes Northern Ireland, 21: 735 - 738, 1970.
- 20 - FERREIRA, O. C. e URBAN, P. W. - Uso de Traçador Radioativo no Estudo das Condições de Escoamento de Produtos em Oleodutos, Instituto de Pesquisas Radioativas, Belo Horizonte, Relatório-junho, 1970.

Com o objetivo de facilitar o cálculo do coeficiente de dispersão teórico, a equação (14) foi tabelada. Tendo em vista a relação (8) os valores então obtidos foram plotados, obtendo-se assim o gráfico apresentado na FIGURA 1.

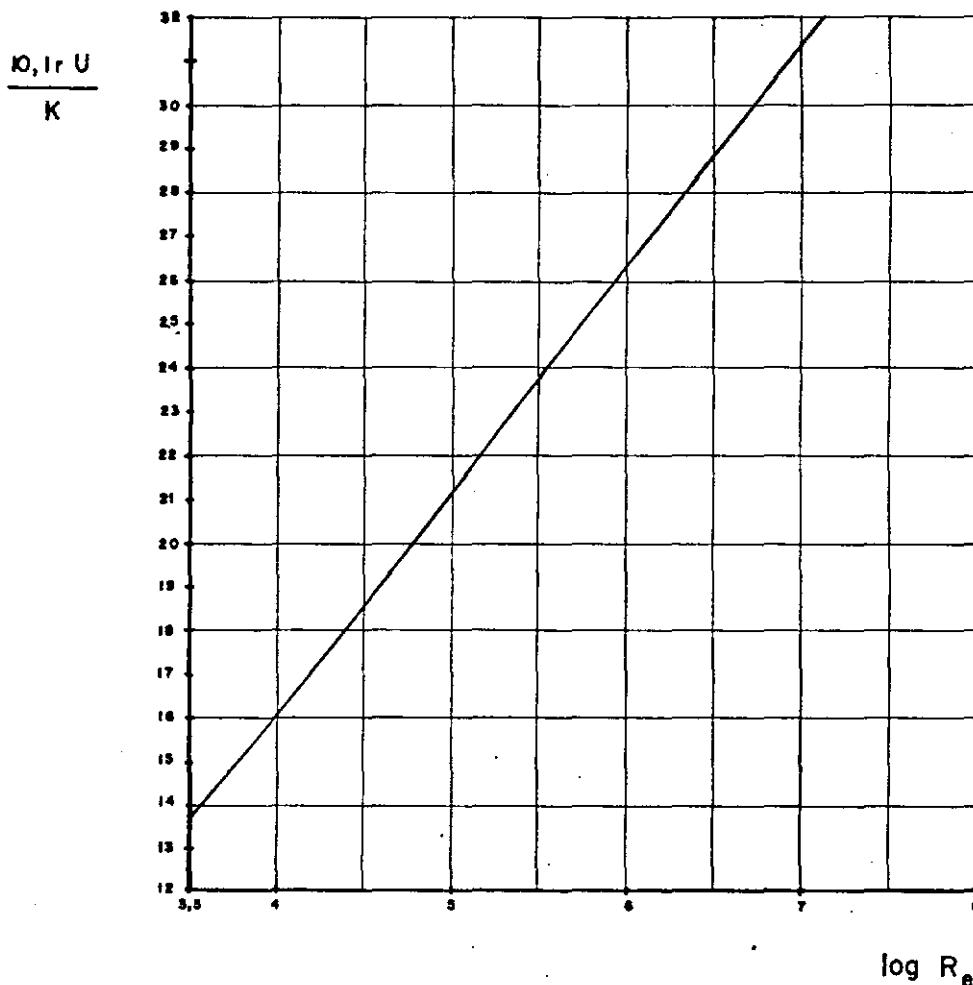
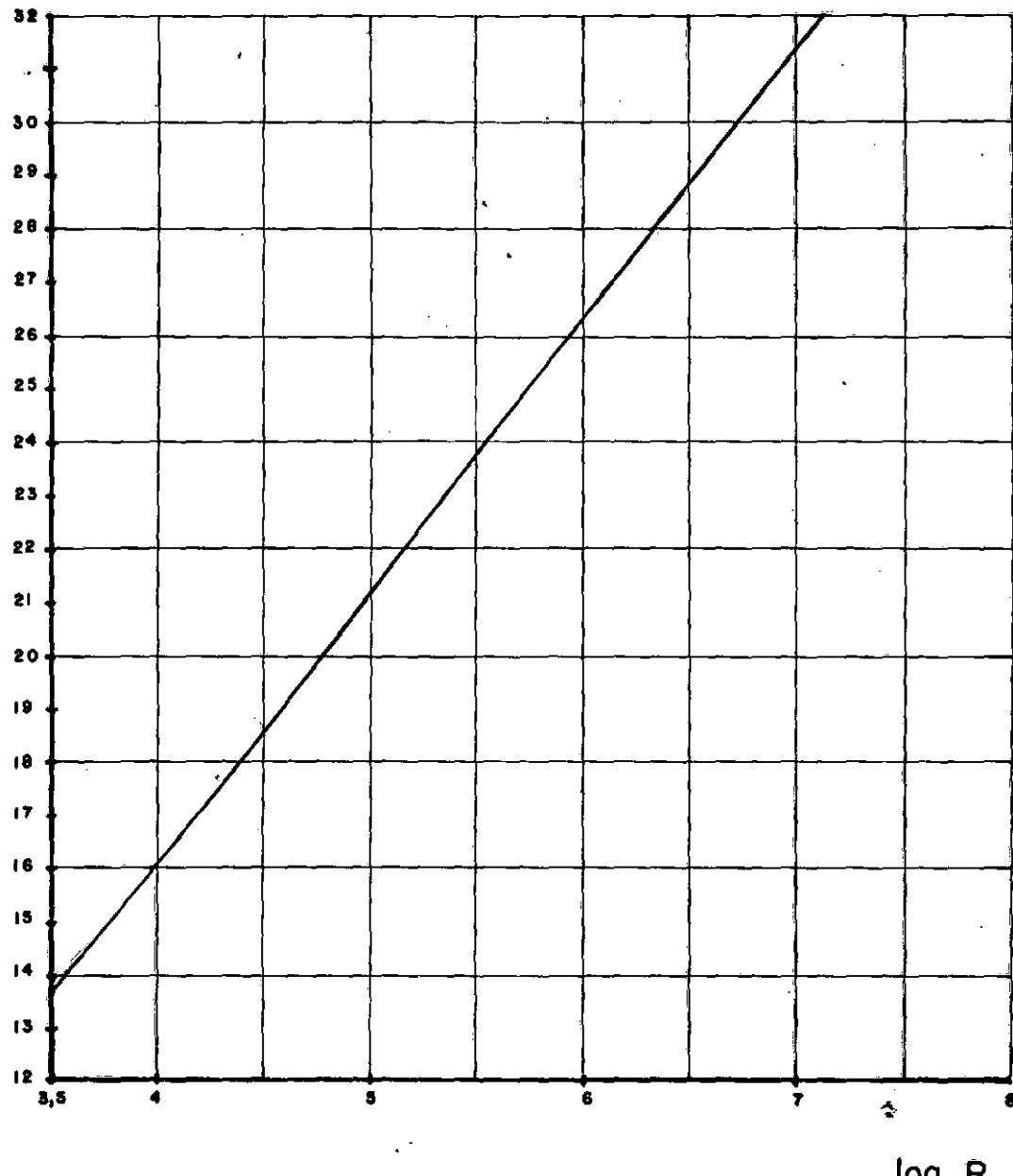


FIGURA 1 Relação gráfica entre o coeficiente de difusão e o número de Reynolds.

$\frac{10,1 \text{r} U}{K}$



$\log R_e$

O gráfico desta equação é apresentado na FIGURA 2, que se segue :

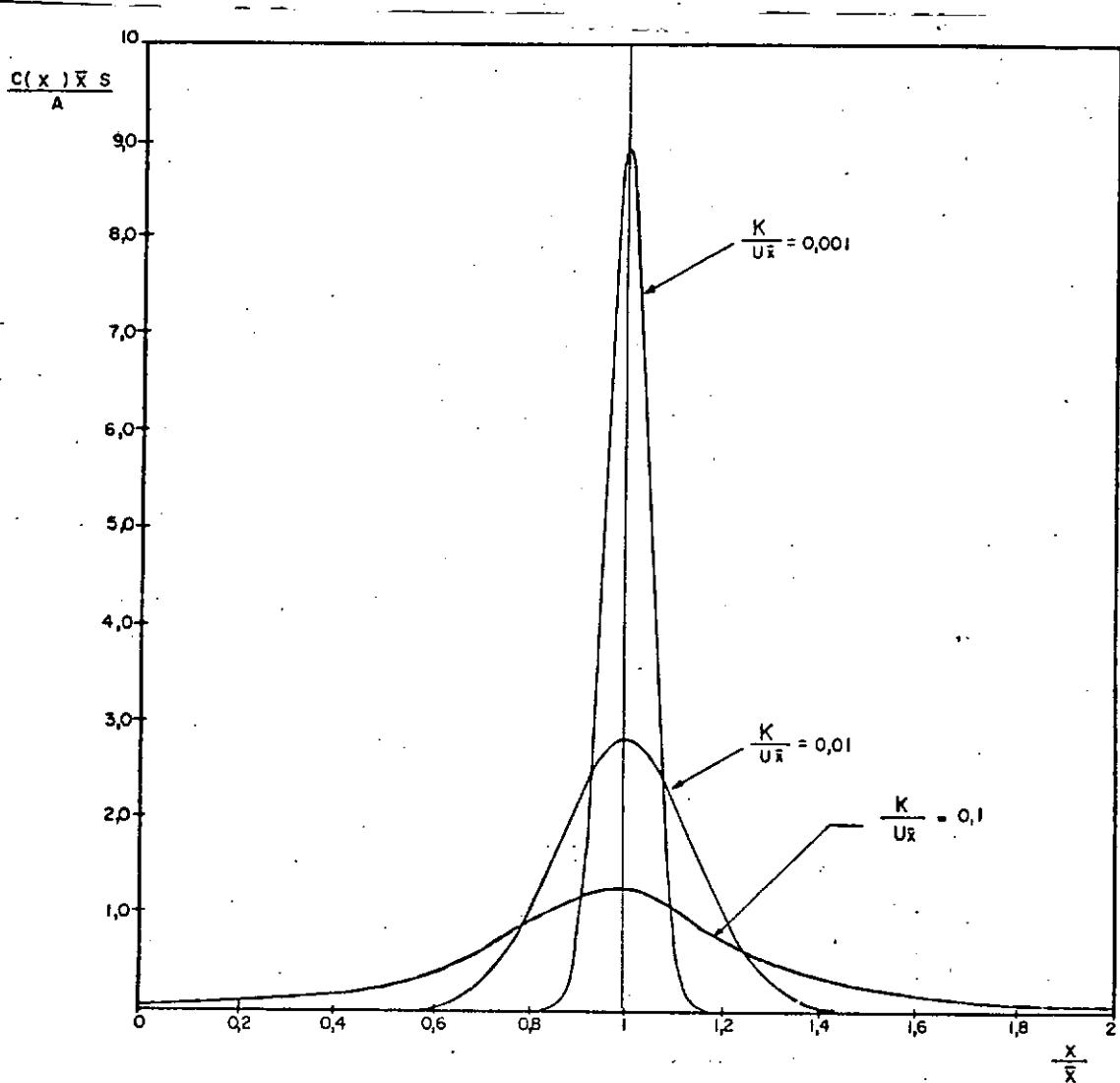
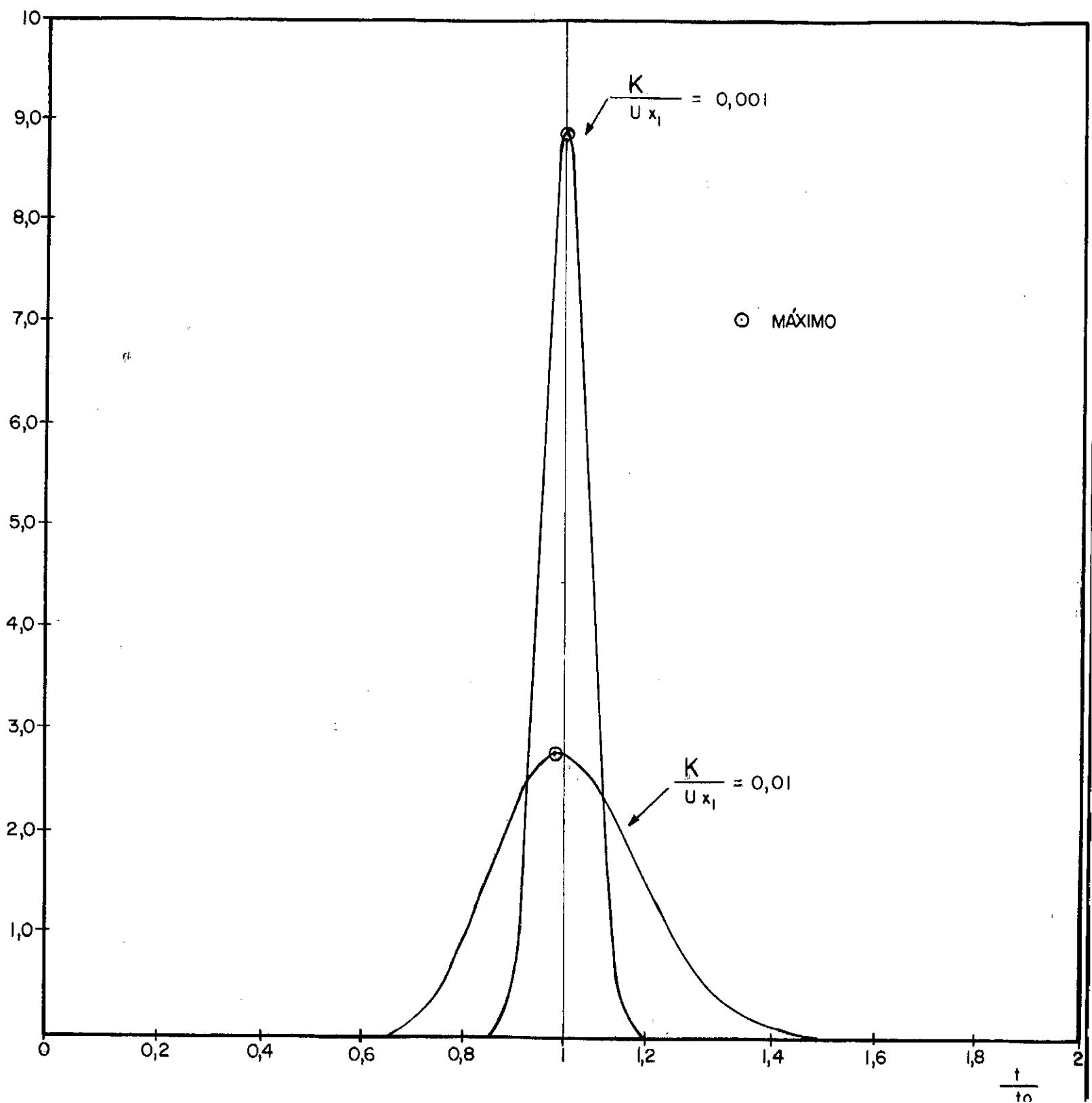
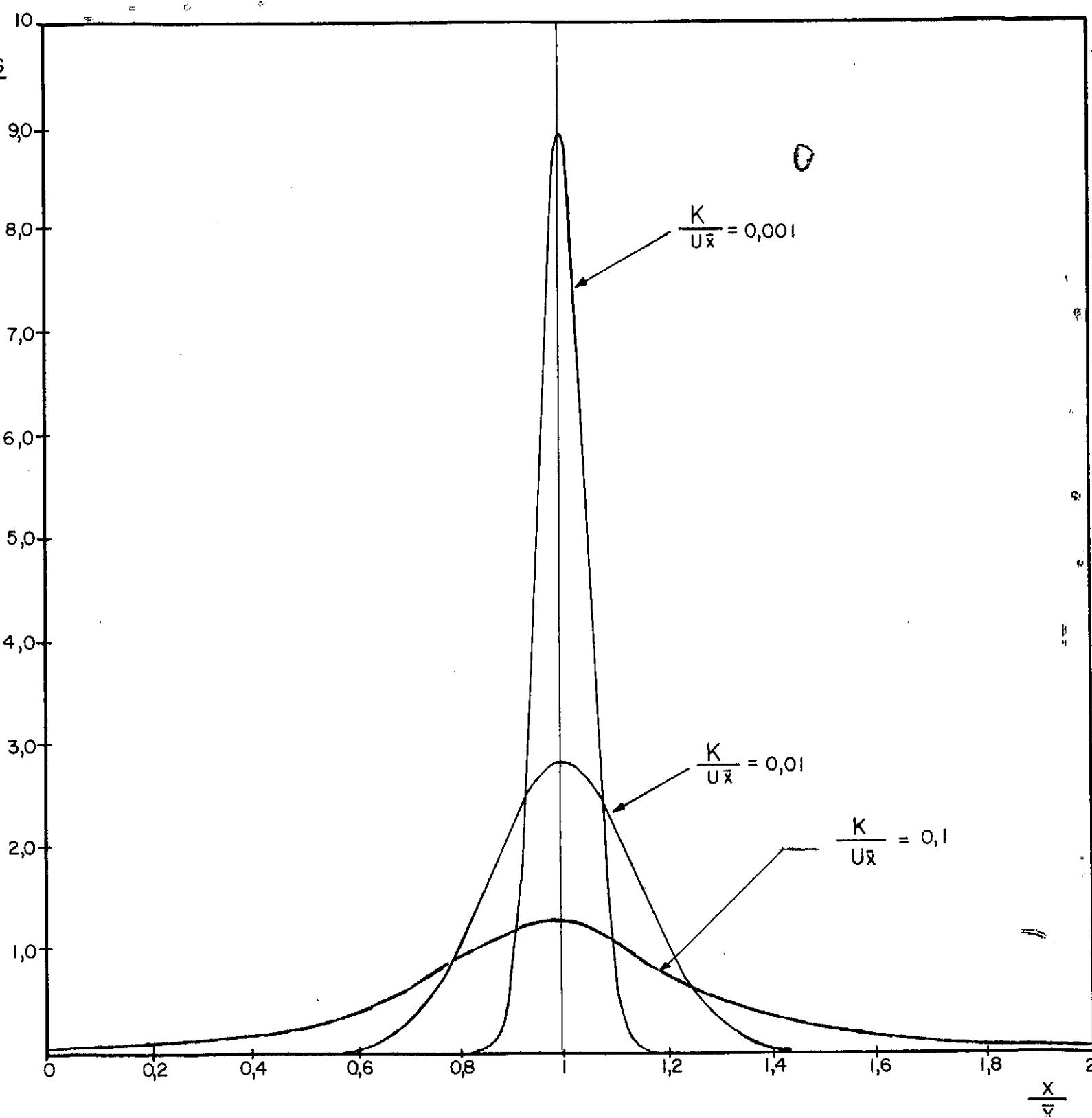


FIGURA 2 Variação longitudinal da concentração de traçador após um tempo $t = t_1$ - equação (22).





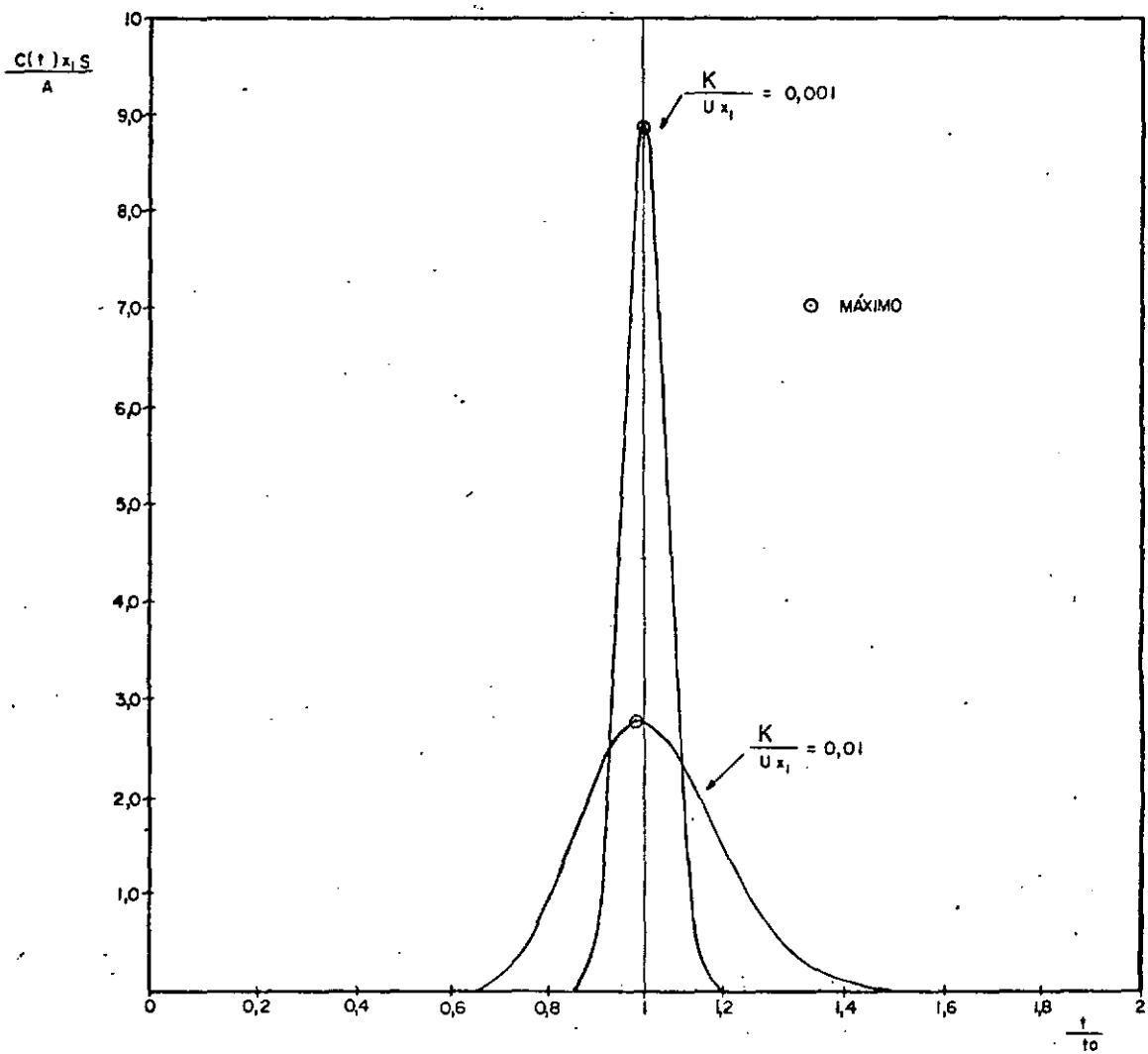
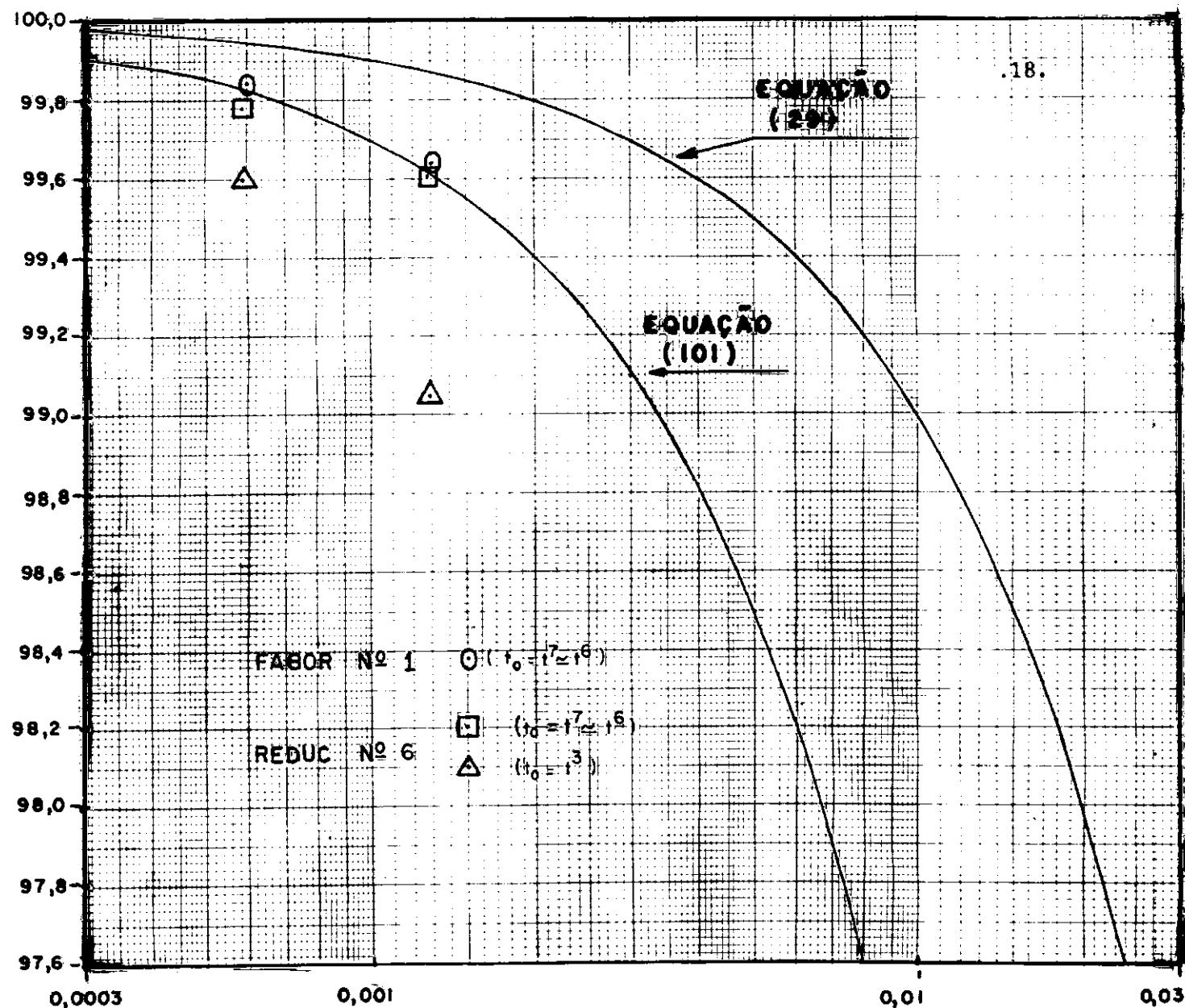


FIGURA 3 Curva normalizada da variação temporal da concentração de traçador sob um ponto fixo, $x = x_1$ - equação (26).

FIGURA 4

Variação da relação $\frac{t_1}{t_0}$ em função do parâmetro $\frac{K}{Ux_1}$.

- equação (29) -

$\frac{K}{Ux_1}$

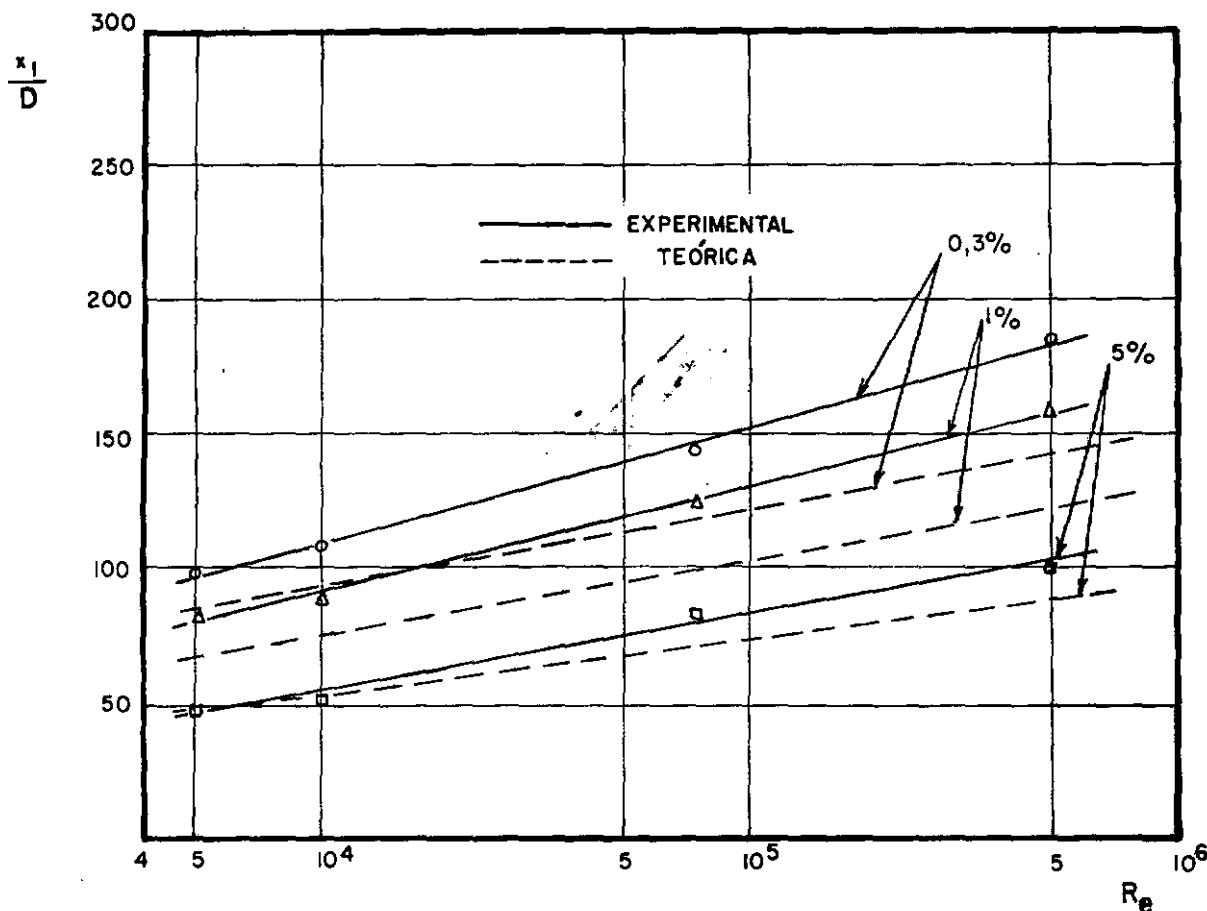
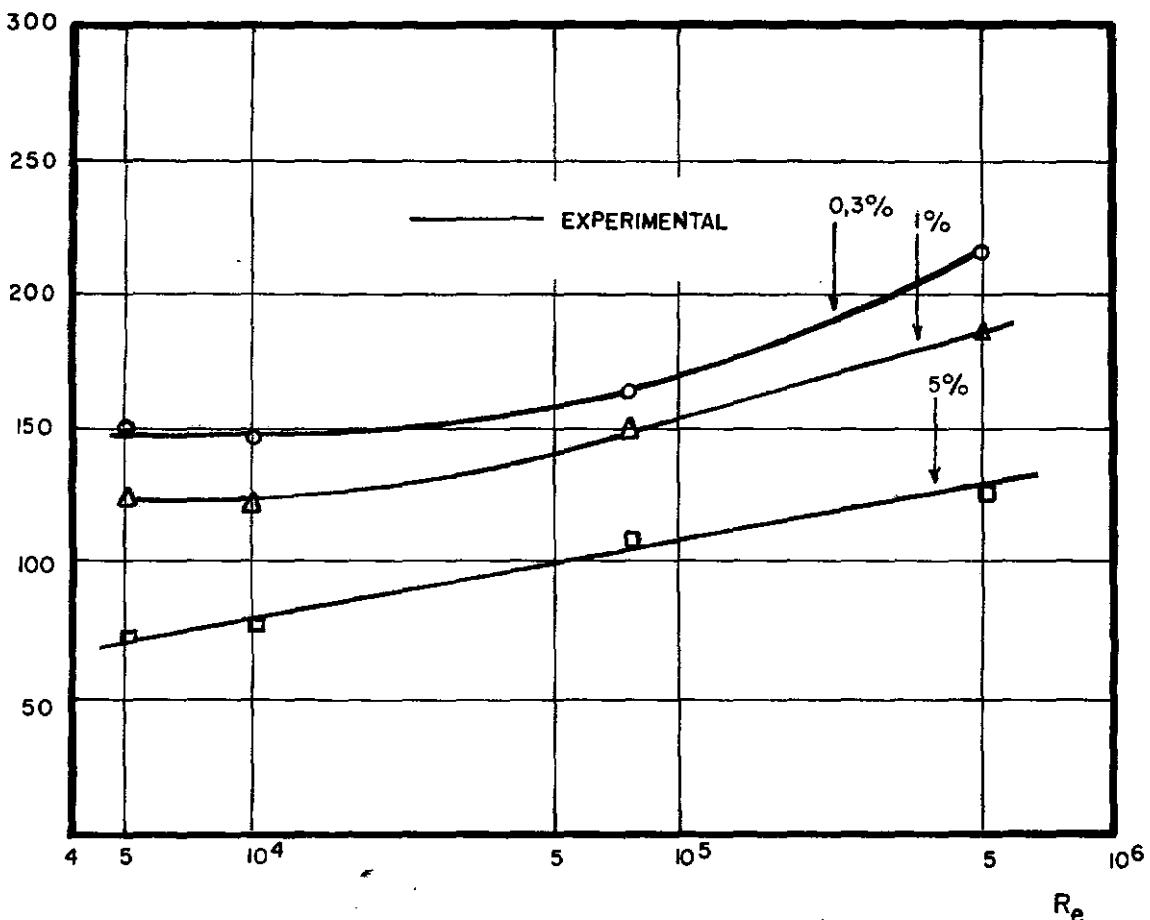


FIGURA 5 Variação da distância de boa mistura, em função do número de Reynolds, para uma INJEÇÃO CENTRAL (segundo CLAYTON¹⁵).

Erros admitidos na boa mistura : 5%, 1% e 0,3%.

Dos dados experimentais obtidos por CLAYTON¹⁵, para uma injeção na parede, foram construídas as curvas apresentadas na FIGURA 6.

**FIGURA 6**

Variação experimental da distância de boa mistura em função do número de Reynolds, para uma INJEÇÃO NA PAREDE da tubulação.

Erros admitidos na boa mistura : 5%, 1% e 0,3%

As curvas apresentadas na FIGURA 6 devem ser encaradas como qualitativas, pois as variações de declividades que se notam, não estão de acordo com o aspecto geral das curvas experimentais e teóricas. Os motivos de tais variações não puderam ser determinados.

Uma das montagens mais simples dos equipamentos eletrônicos capazes de detectar, medir e registar as variações nos pontos fixos - $x = x_1$ e $x = x_2$ é mostrada na FIGURA 7, que segue.

A- COLIMATOR
B- SONDA
C- RATEMETER
D- REGISTRADOR

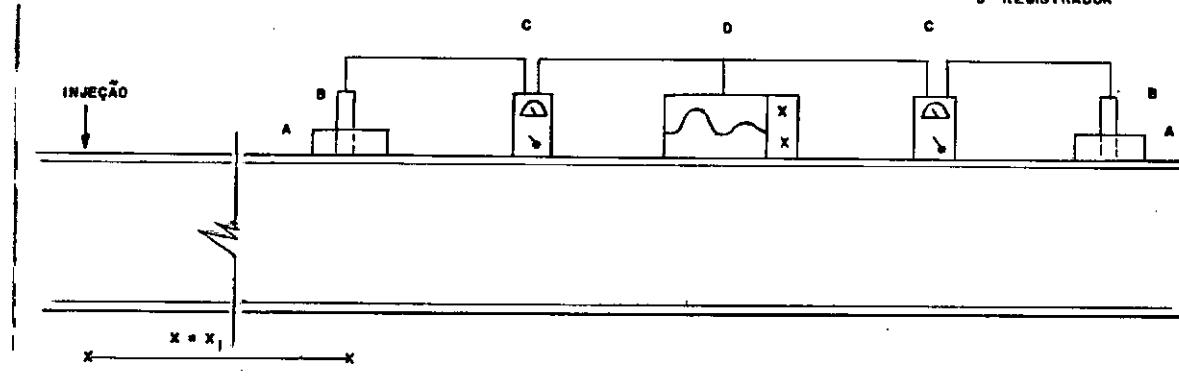


FIGURA 7 Montagem típica dos equipamentos de detecção, medição e registo da variação da concentração de traçador radioativo - Método Pico-a-Pico.

A utilização de idênticos colimadores, feitos de chumbo, tornam idênticas as geometrias dos dois pontos de detecção. Esta precaução garante a coincidência a posição "física" e a "de medição" dos detectores para ambos pontos fixos, o que pode, em certos casos, levar a maior precisão na medição.

A ligação em série dos cabos que conectam os "ratemeters", objetiva também simplificar o registo da passagem da "nuvem" do traçador pelos pontos de detecção, mas só deve ser usada quando a distância entre os detectores é maior que o comprimento da nuvem. Quando isto não ocorrer, para se evitar superposição e distorções dos picos, deve-se lançar mão de outros recursos, tais como, a utilização de um registrador com dois canais independentes, dois registradores, ou uma chave seletora das correntes elétricas que chegam ao registrador.

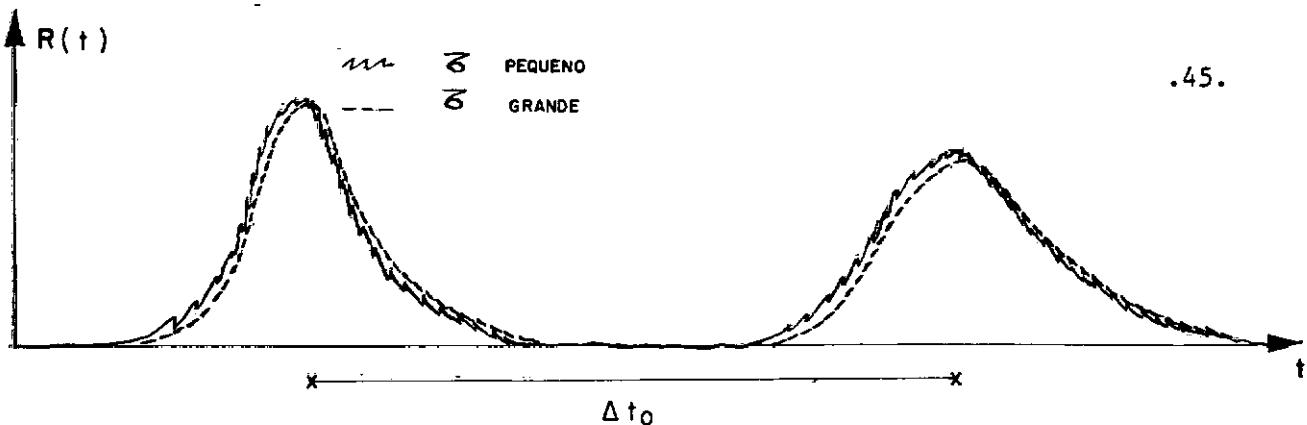


FIGURA 8 · Influência da constante de tempo no registro da curva de $C(t)$ (qualitativo).

Na prática, como não foram ainda derivadas fórmulas que permitam corrigir as variações e as deformações das curvas $R(t)$ causadas por τ , procura-se fixar valores de τ que tornem desprezível sua influência na precisão de ΔP_0 (ou Δt_0).

Para os casos em que as condições

$$\frac{\sigma R_{\max}}{R_{\max}} = 0,01 = 1\% \quad (49)$$

$$\frac{\tau}{\Delta t_0} = 0,01 = 1\% \quad (50)$$

são observadas, as contribuições de R e τ para a imprecisão de Δt_0 , podem ser desprezadas. É mesmo possível que a condição (49) possa ser abrandada, quando se emprega para identificar (P_0) um dos métodos que utilizam mais de um ponto da curva $R(P)$, pois eles produzem uma certa minimização dos desvios.

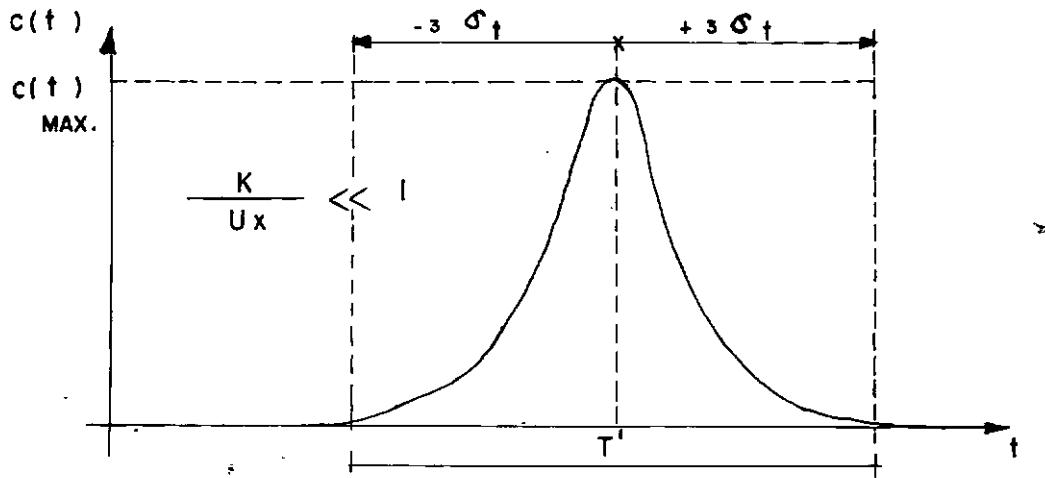


FIGURA 9 Definição gráfica do tempo de trânsito da nuvem de traçador sobre um ponto fixo (qualitativo).

Baseado nestas definições, e na comparação entre as duas fórmulas que permitem o cálculo do coeficiente de dispersão K , (7) e (63), EVANS¹⁸ deduziu a seguinte fórmula para calcular T'_i

$$T'_i = \frac{12 \sqrt{r x_i}}{U [Re]^{1/16}} \quad (52)$$

Se o número de Reynolds do escoamento estiver no intervalo $10^4 < Re < 10^6$, a fórmula anterior pode ser simplificada para

$$T'_i = \frac{6}{U} \sqrt{r x_i} \quad (53)$$

Na FIGURA que se segue são mostrados, graficamente os parâmetros intervenientes nas equações (76) e (77)

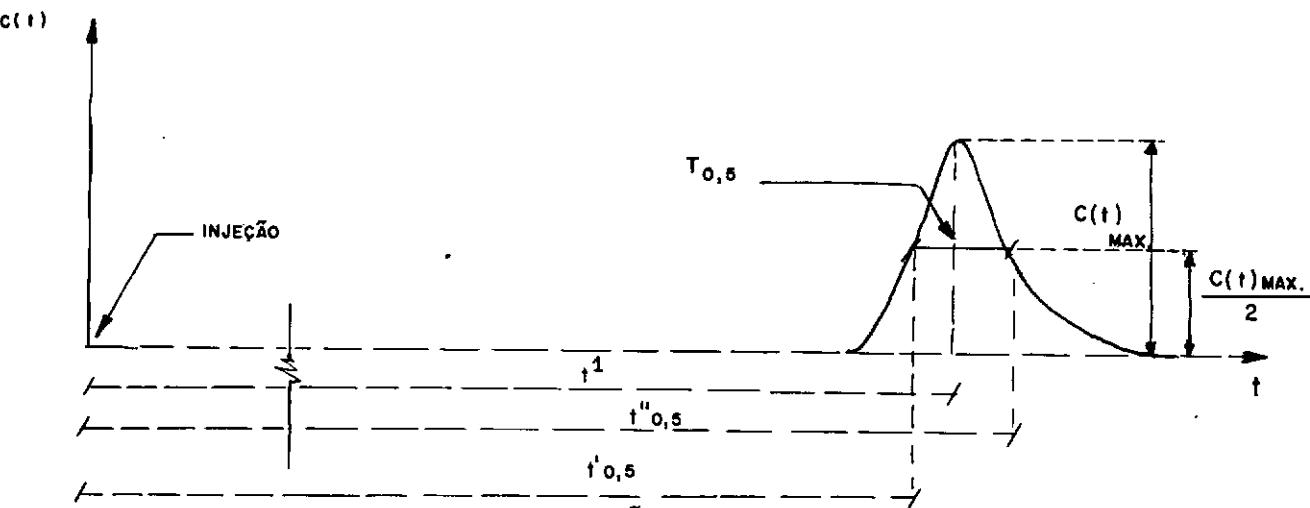


FIGURA 10 Curva de variação da concentração com o tempo.

Definição gráfica dos parâmetros do Método da Metade da Altura Máxima do Pico.

Observando-se a FIGURA 10, vê-se que para valores muito pequenos de $\frac{K}{Ux_1}$, são justificadas as aproximações

$$\sqrt{\frac{t^1}{t'_{0,5}}} = \sqrt{\frac{t^1}{t''_{0,5}}} = \sqrt{\frac{t^1}{t_{0,5}}} = 1 \quad (78)$$

Assim sendo, obtém-se

$$\frac{1}{2} = \exp. \left[\frac{-U^2 (t^1 - t_{0,5})^2}{4 K t^1} \right] \quad (79)$$

Utilizando-se a relação de transformação (42), determina-se a "fórmula de trabalho", para distâncias medidas no papel do registrator

$$\frac{K}{Ux_1} = \frac{\left[1 - \frac{P'_{0,5}}{P_0} \right]^2}{4 \frac{P'_{0,5}}{P_0} \ln \left[2 \left[\frac{P_0}{P'_{0,5}} \right]^{1/2} \right]} \quad (86)$$

$$\frac{K}{Ux_1} = \frac{\left[1 - \frac{P''_{0,5}}{P_0} \right]^2}{4 \frac{P''_{0,5}}{P_0} \ln \left[2 \left[\frac{P_0}{P''_{0,5}} \right]^{1/2} \right]} \quad (87)$$

A figura que se segue, mostra graficamente os parâmetros $P'_{0,5}$, $P''_{0,5}$ e P_0 , utilizados em (86) e (87)

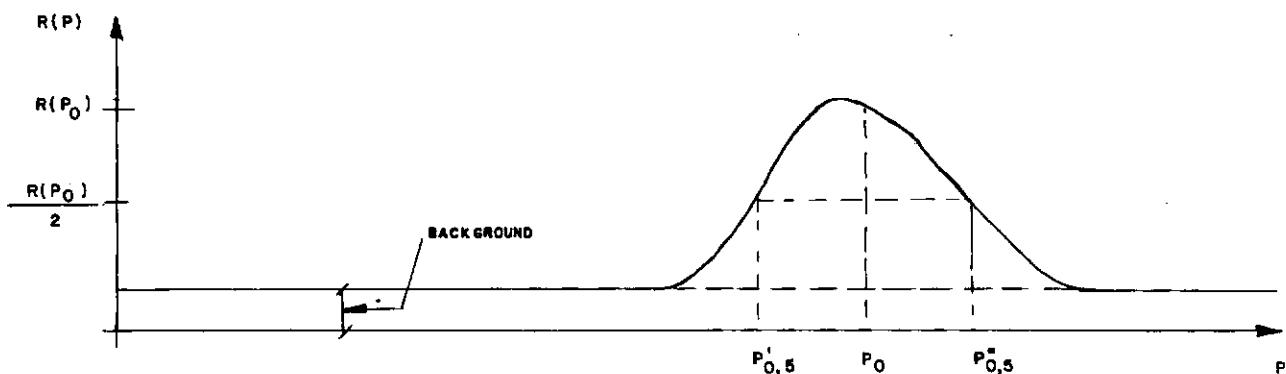
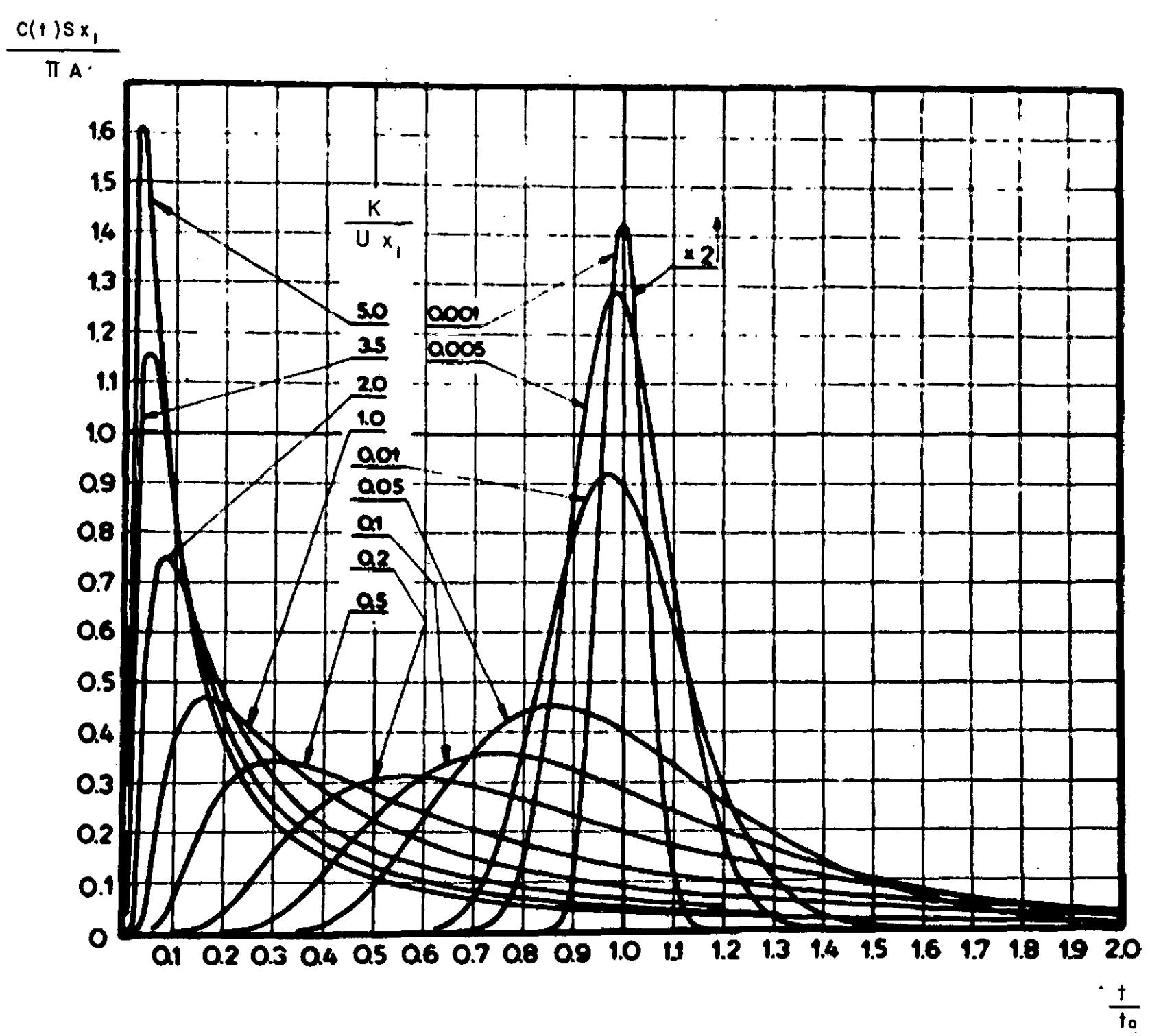


FIGURA 11 Definição gráfica dos parâmetros $P'_{0,5}$, $P''_{0,5}$ e P_0 .



$C(t)Sx_1$

TA:

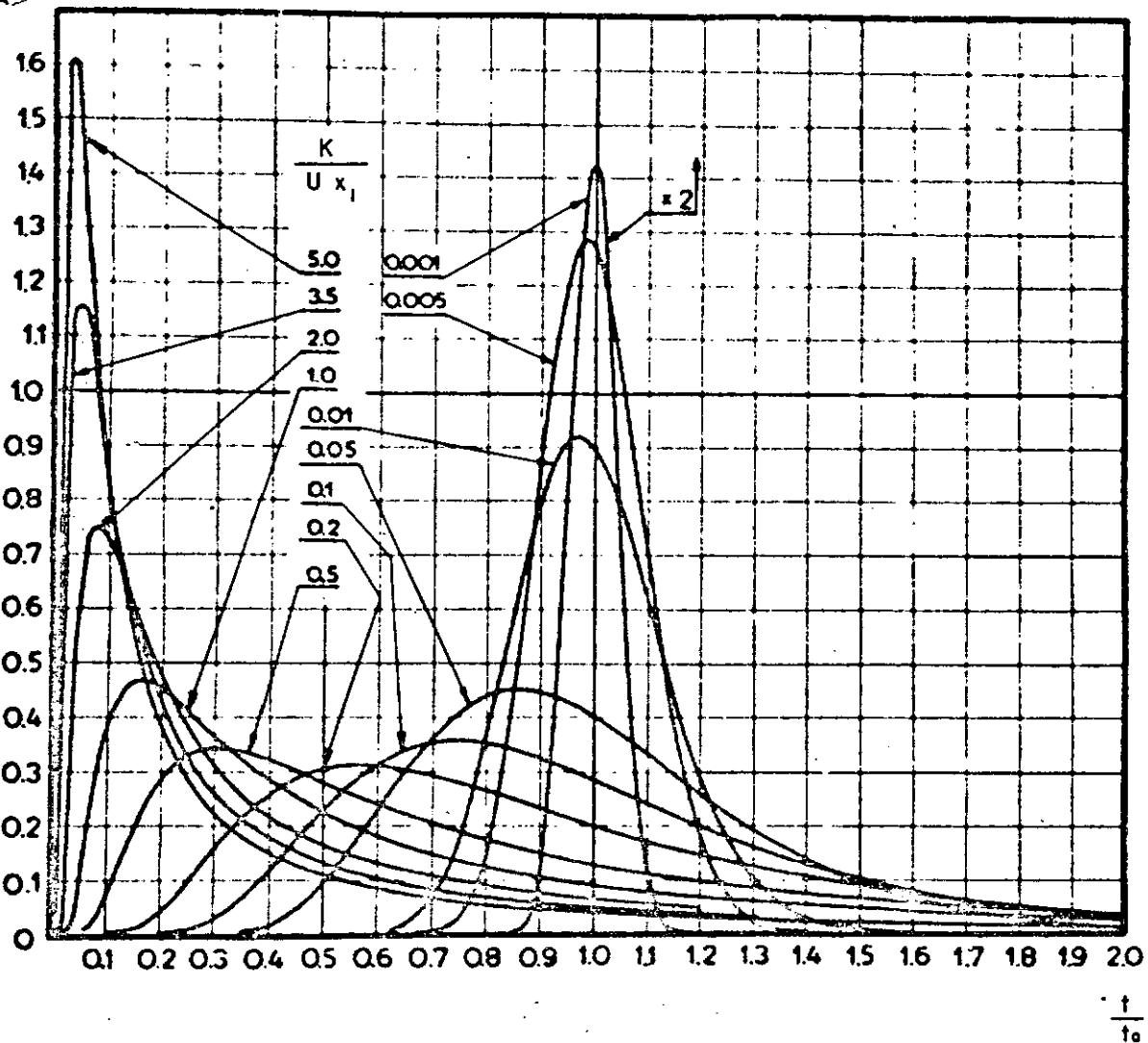
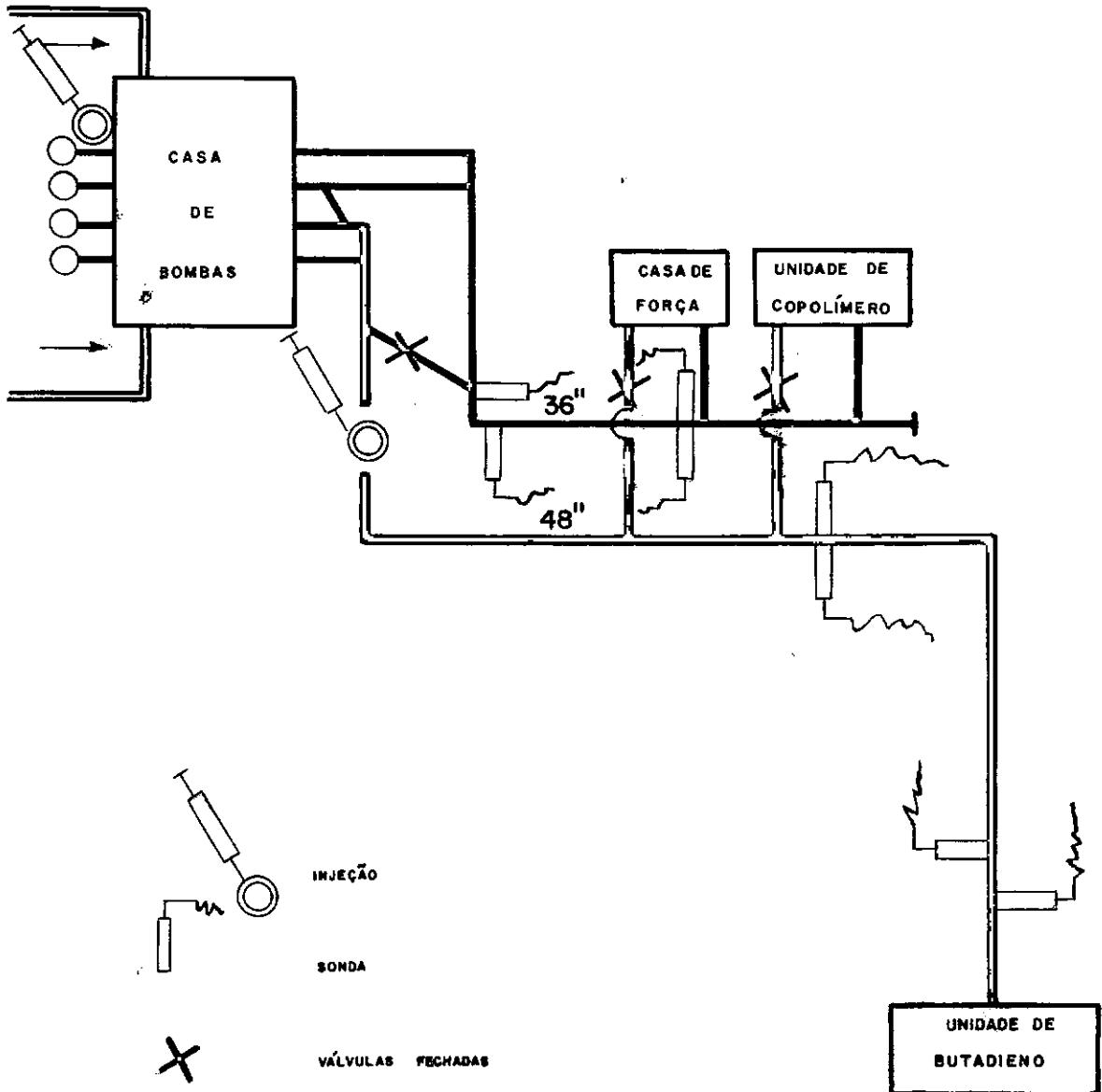


FIGURA 12

Curva normalizada da variação temporal da concentração de traçador, para $x = x_1$. Equação (90)



Infelizmente, falhas nas medições de pressões manométricas realizadas pelos interessados, impediram a verificação da curva de calibração das bombas.

A FIGURA 13, apresenta um esquema simplificado dos locais de medições, disposição dos detectores e locais de injeções.

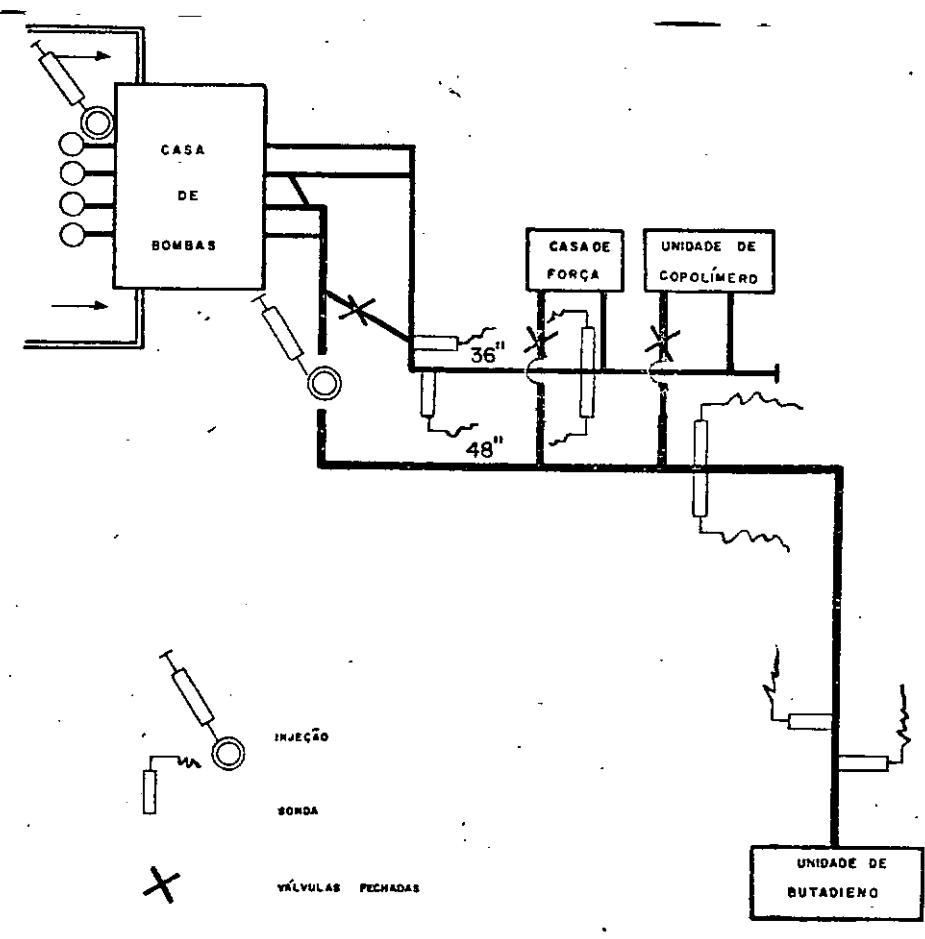


FIGURA 13 Experiências na FABOR - esquema da situação das tubulações, locais de injeções e detecções.

O fato das tubulações serem de grande diâmetro, (36'' e 48''), de transportarem água salgada sob grande pressão (aproximadamente 5 atm.), acrescido da impossibilidade de paradas no bombeamento, justificaram plenamente o emprego de métodos radioativos.

Na tubulação de 48'', a introdução do traçador radioativo foi realizada através de um injetor especialmente projetado, o qual foi instalado sobre uma válvula de uma pequena derivação que pode ser removida. Este injetor incluia uma pequena garrafa de ar-comprimido, de modo a vencer pressão interna e a tornar rápida a injeção.

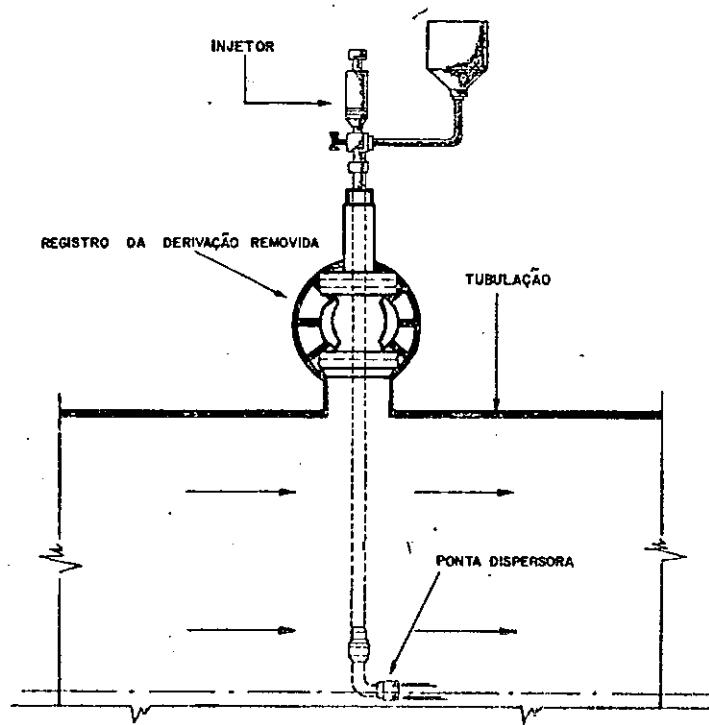
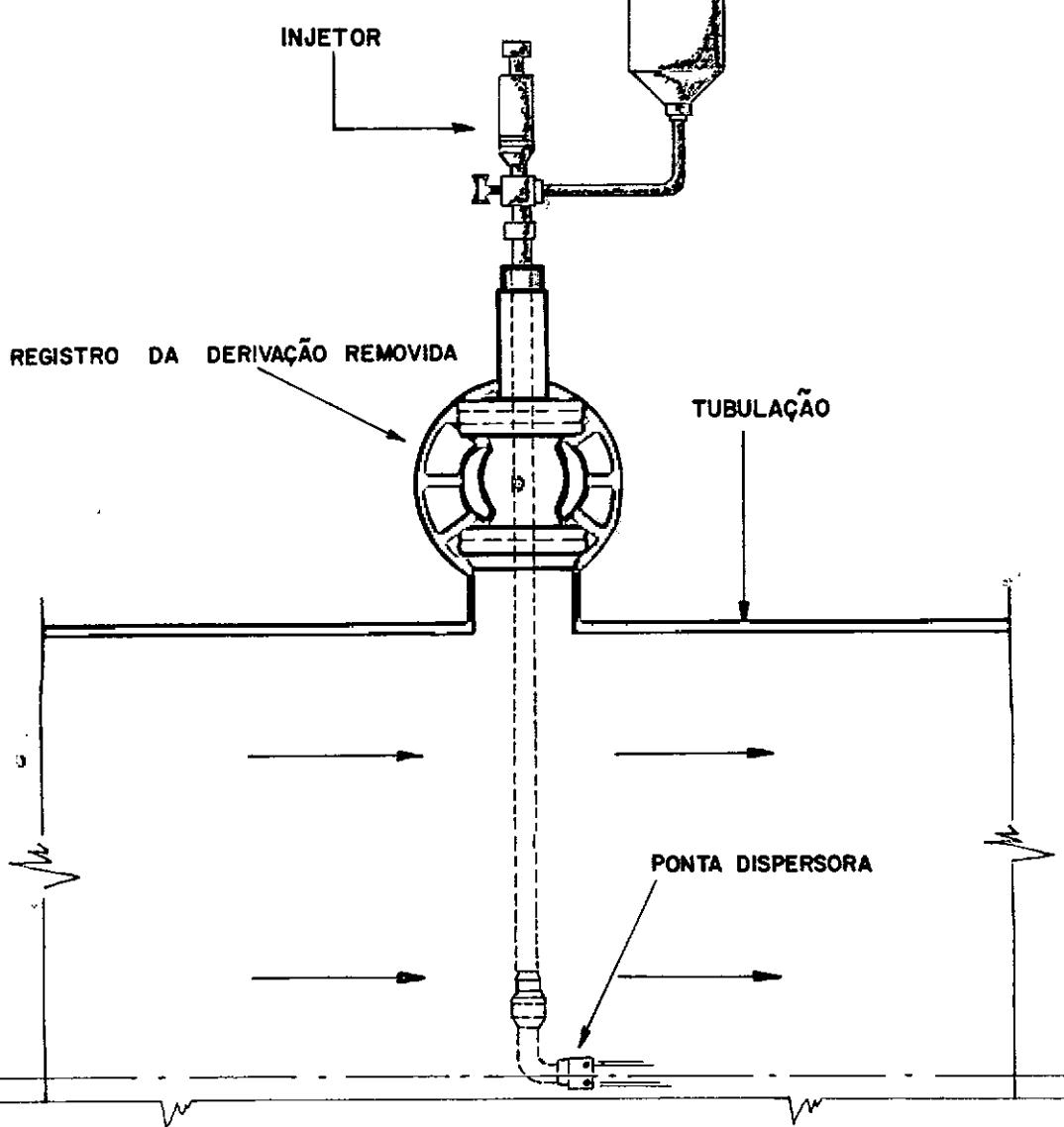


FIGURA 14

Injetor de ar-comprimido utilizado na tubulação de 48''.
- experiência na FABOR -



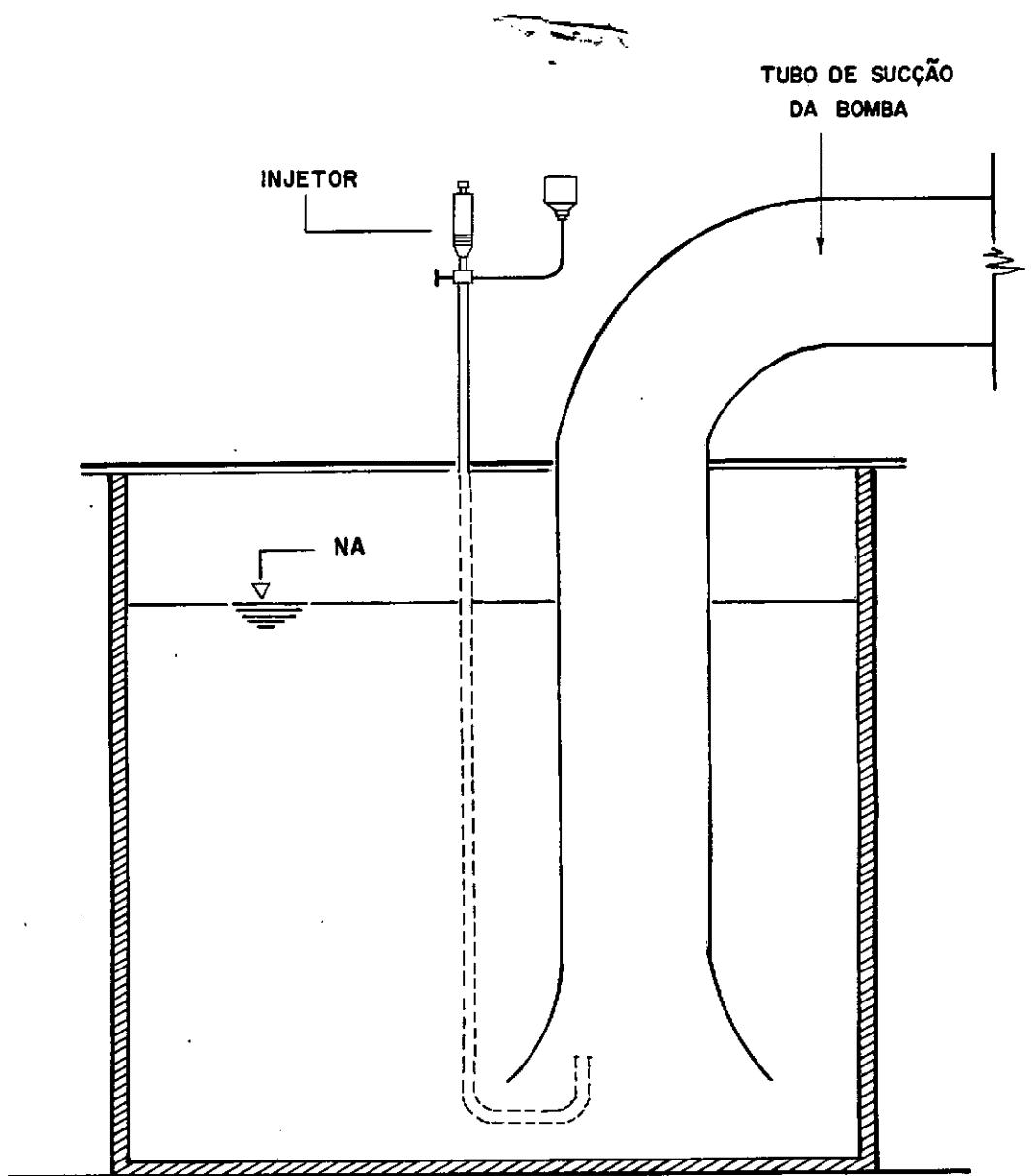


FIGURA 15 Injeção do traçador na tubulação de 36''.
- experiência na FABOR -

Na tabela que segue são apresentados outros dados de interesse, relativos a esta série de experiências.

	FABOR Nº 1	FABOR Nº 2	FABOR Nº 3	FABOR Nº 4	FABOR Nº 5	FABOR Nº 6
Nº DE BOMBAS EM FUNCIONAMENTO	2	3	3	1	1 (*)	1 (*)
TAXA DE CONTAGEM MÁXIMA (cps)	CONJ. A (**)	4200-2600	—	10500-7000	—	14500-7500 15000-7000
	CONJ. B (**)	5000-4000	—	12000-10200	—	11000-7500 11000-8000
VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO (m/s)	2,76	3,12	3,10	—	2,76	2,38
VAZÃO (m ³ / s)	3,00	3,39	3,37	—	1,63	1,40

TABELA 2

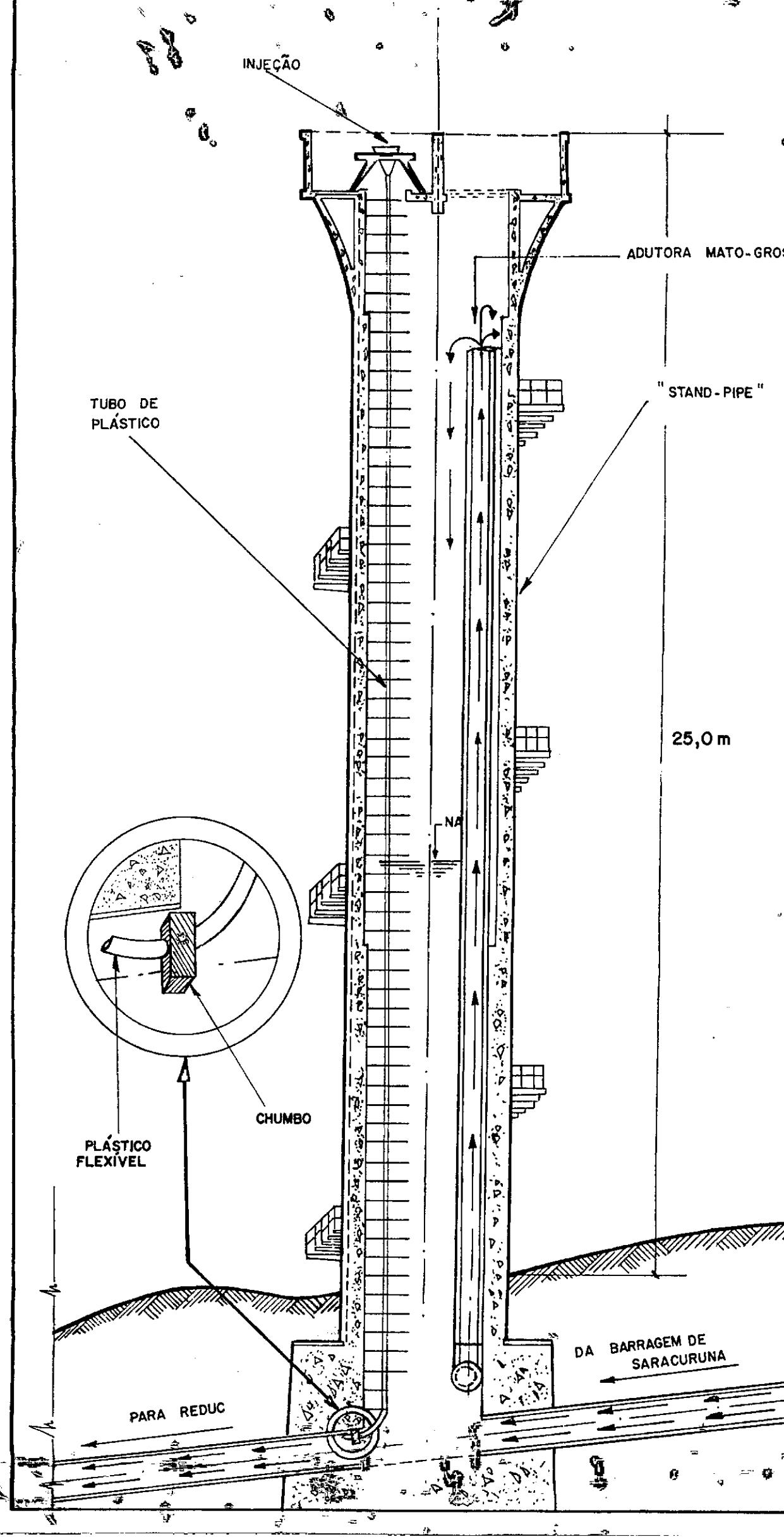
Dados relativos as experiências realizadas na FABOR.

	FABOR Nº 1	FABOR Nº 2	FABOR Nº 3	FABOR Nº 4	FABOR Nº 5	FABOR Nº 6
DIAMETRO EXTERNO DA TUBULAÇÃO		48"			36"	
ESPESSURA DO REVESTIMENTO DE CONCRETO		1/2"			1/2"	
ESPESSURA DA PARE DE DE AÇO		3/8"			3/8"	
TIPO E LOCAL DE INJEÇÃO		INJEÇÃO A AR COMPRIMIDO NO CENTRO DA TUBULAÇÃO		INJEÇÃO NO TUBO DE SUAÇÃO DA BOMBA		
ATIVIDADE INJETADA (m C)	NÃO MEDIDA	92	92	29,5	29,5	29,5
DISTANCIA INJ. - 1º DET. (x = x ₁)	CONJ. A		190,00m		68,20m	
	CONJ. B				64,00m	
DISTANCIA 1º DET. - 2º DET. (Δ x)	CONJ. A		234,90m		123,50m	
	CONJ. B		222,40m		127,80m	

TABELA 3 Resultados obtidos nas experiências na FABOR.

Os valores das taxas de contagens máximas da experiência - FABOR nº 2, não foram anotadas pois foi necessário modificar as escalas dos "ratemeters". Os picos resultantes, embora deformados, puderam ser interpretados através dos métodos que não fazem uso da curva inteira. Para confirmar os resultados assim obtidos, esta experiência foi repetida imediatamente sob condições de bombeamento invariáveis.

Da comparação dos resultados da FABOR nº 3 e FABOR nº 2, pode-se deduzir a excelente reproducibilidade.



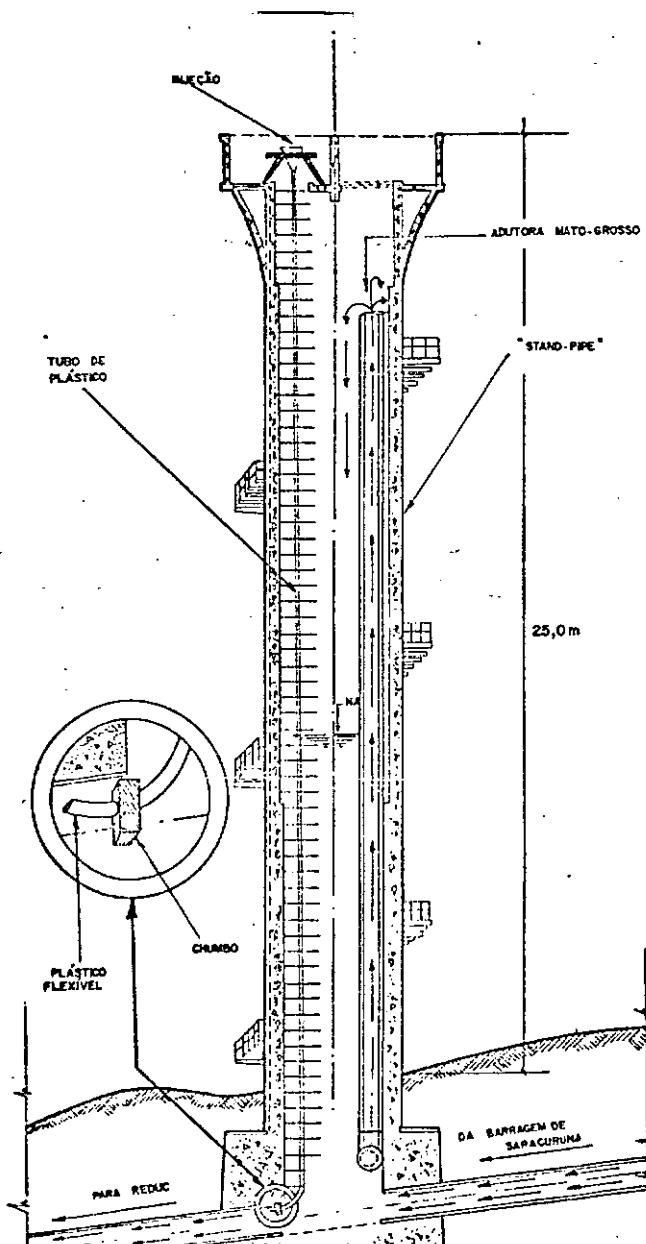


FIGURA 19 Injetor utilizado na tubulação a jusante do "stand-pipe".

	REDUC Nº 1	REDUC Nº 2	REDUC Nº 3	REDUC Nº 4	REDUC Nº 5	REDUC Nº 6
DIAMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO (S/ REVESTIMENTO)				800 m m		
ESPESSURA TOTAL DO REVESTIMENTO BETUMINOSO				4 , 8 mm		
TIPO E LOCAL DA INJEÇÃO	INTRODUÇÃO NA ENTRADA DA TUBULAÇÃO ATRAVES DE UM TUBO PLÁSTICO					
ATIVIDADE INJETADA (m c ₁)	16	13	13	9	9	9
TAXA DE CONTAGEM MÁXIMA	CONJ. A(*)	5000-2000	3800-1500	4000-1500	3700-1500	4200-1500
(c p s)	CONJ. B(*)	4000-2000	3000-1500	2500-1500	2200-1500	2600-1500
VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO (m/s)	0, 897	0, 897	0, 665	0, 682	0, 611	0, 613
VAZÃO (m ³ /s)	0, 445	0, 445	0, 330	0, 339	0, 328	0, 304

(*) os primeiros valores de taxa de contagens referem-se a 1a. detecção e os segundos a 2a. detecção.

TABELA 4

Resultados obtidos nas experiências na REDUC.

Local : Adutora de Saracuruna, à jusante do "stand-pipe".

Os valores das atividades e das taxas de contagens, constantes da tabela anterior são aproximados.

A seguir, é apresentada uma figura que permite uma comparação entre os valores de vazões medidos por radioisótopo, e pelo "flow recorder" instalado na entrada da Estação de Tratamento da REDUC.

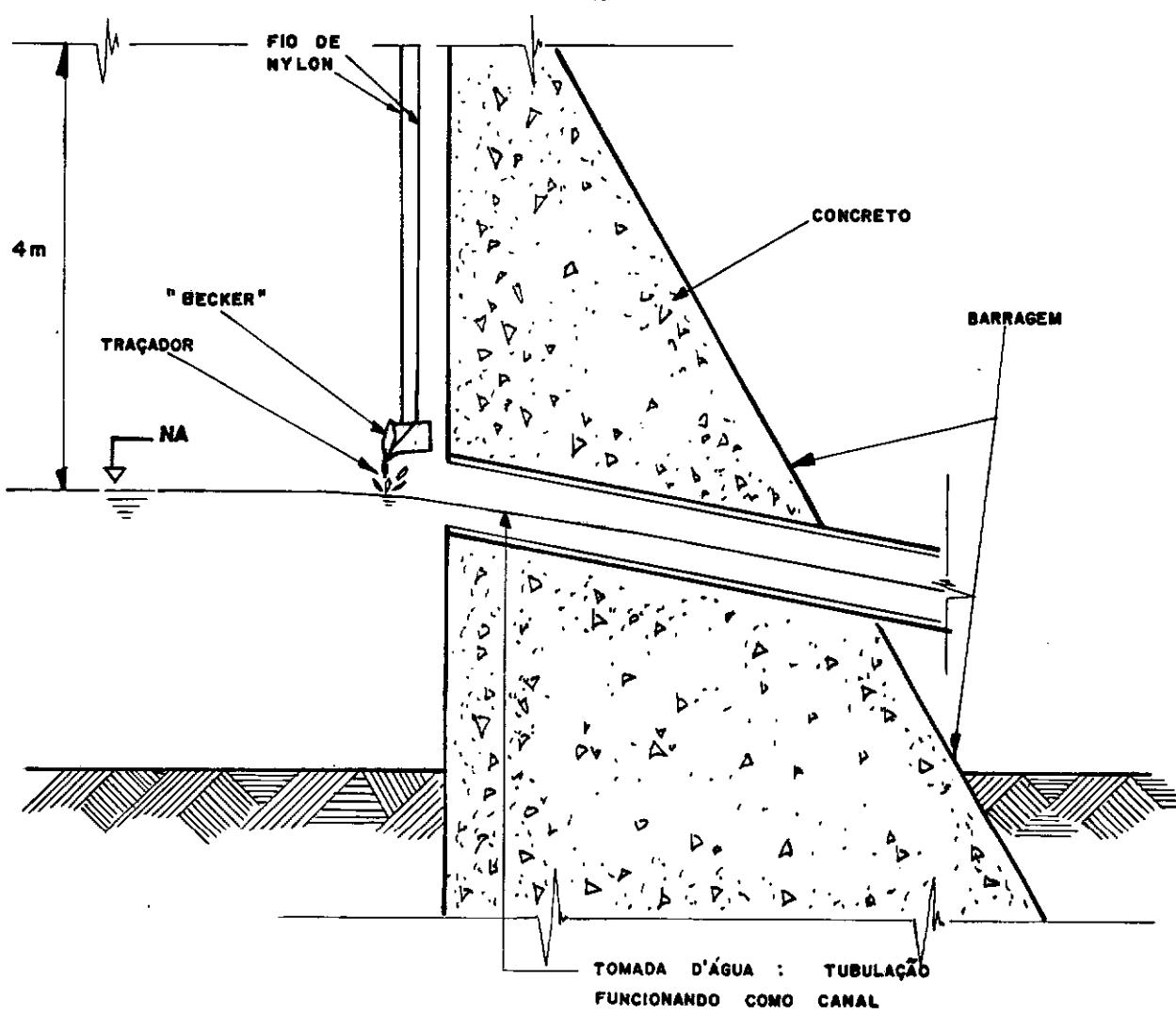


FIGURA 21 Injeção do traçador radioativo, realizada na Adutora de Registro.

A distância entre injeção → la. detecção não pode ser conhecida pelo fato da tubulação ser parcialmente enterrada, mas foi estimada em $x_1 \geq 1800\text{m}$, o que para um diâmetro útil de $D = 600\text{mm}$ fornece $\frac{x_1}{D} \approx 3000$.

D

Para local de detecção foi aproveitado um pequeno trecho descoberto de tubulação situado em um ponto baixo da adutora, com o comprimento de $\Delta x = 78,50\text{m}$.

Outros dados e os resultados obtidos nesta experiência são apresentados a seguir.

REDUC Nº 7		
DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO		600mm
ATIVIDADE INJETADA ($m C_1$)		12
TAXA DE CONTAGEM MÁXIMA (cps)	CONJ. A	3500 — 1300
	CONJ. B	2300 — 1300
VELOCIDADE DO REGISTRADOR (v)	CONJ. A	0,1 in/min
	CONJ. B	3 cm/min
VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO (m/s)		0,110
VAZÃO (m^3/s)		0,0312

TABELA 5

Resultados obtidos nas experiências na REDUC.

Local : Adutora de Registro.

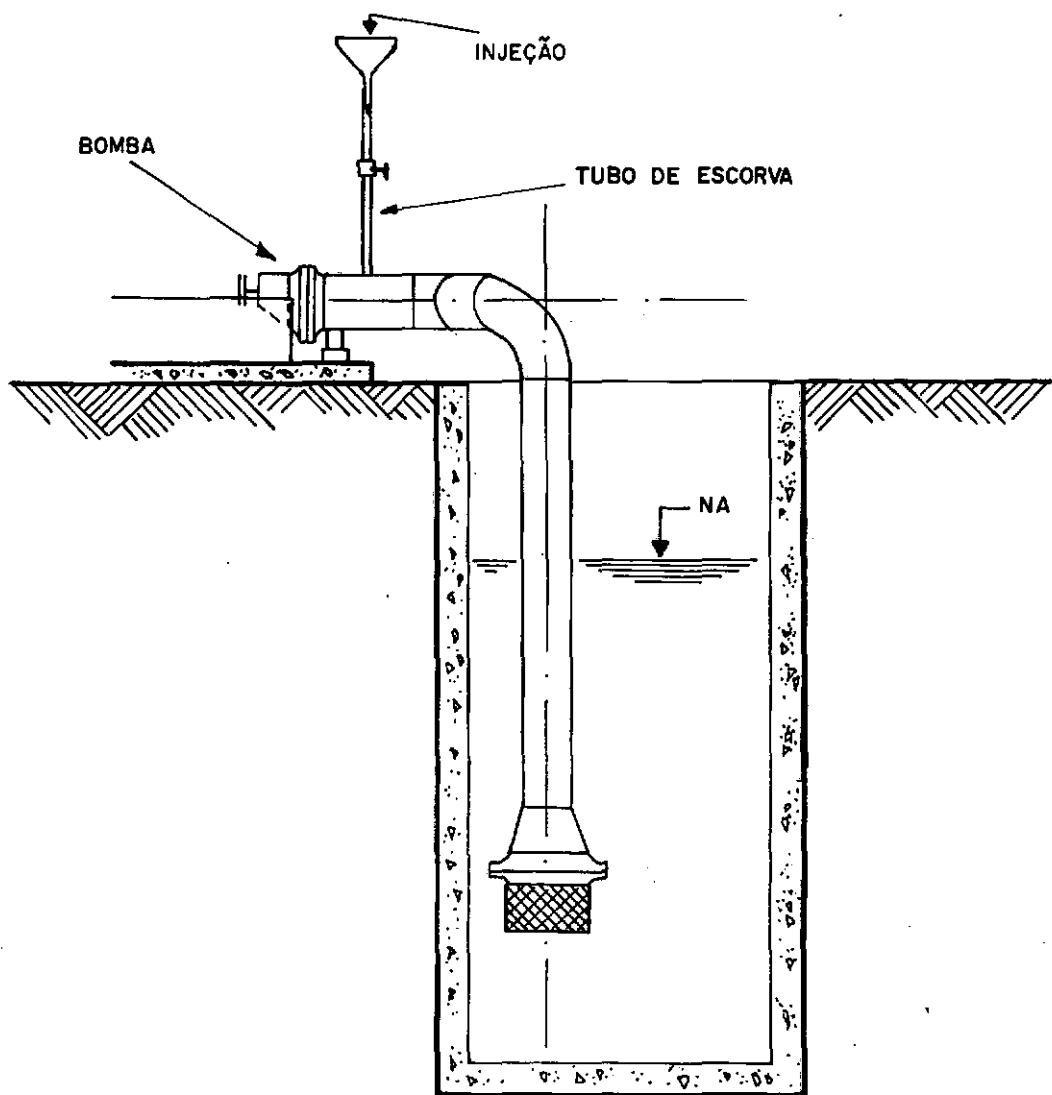


FIGURA 22 Injeção executada na Adutora de Mato Grosso.

As velocidades do papel dos registradores foram fixadas em $V = 0,1$ in/s (HP) e $V = 15$ cm/min (ETP-3), respectivamente. Na experiência REDUC nº 10, elas foram dobradas.

A Tabela 6, apresenta outros dados e os resultados relativos a estas medições.

	REDUC Nº 8	REDUC Nº 9	REDUC Nº 10	REDUC Nº 11	REDUC Nº 12	
BOMBA EM FUNCIONAMENTO	A	A e B	A e B	B	B	
PRESSÃO MANOMETRICA (Kg/cm ²)	5,4	6,0	6,0	5,4	5,9	
ATIVIDADE INJETADA (m C ₁)	9	9	9	9	9	
TAXA DE CONTAGEM MÁXIMA (c p s)	CONJ. A	5000-6000	9000-11000	7000-8000	9500-11500	NÃO ANOTADOS
CONJ. B	9000-5000	13000-10000	10700-7000	13000-9000		NÃO ANOTADOS
VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO (m / s)	0,638	1,121	1,126	0,526	0,523	
VAZÃO (m ³ / s)	0,0801	0,1418	0,1414	0,0661	0,657	

TABELA 6

Dados e resultados obtidos nas experiências na REDUC.

Local : Adutora de Mato Grosso.

VELOCIDADES MÉDIAS DO ESCOAMENTO (m/s) SEGUNDO DIFERENTES
MÉTODOS DE INTERPRETAÇÃO DE t_0

LOCAL DA EXPERIÊNCIA	CONJUNT. DE MEDIÇÃO	$t_0 = t^1$ (MÁXIMO A MÁXIMO)	$t_0 = t^2$ (METADE DA CONT. TOTAL)	$t_0 = t^3$ (MÉDIA ARI- TMÉTICA)	$t_0 = t^4$ (MÉDIA HAR- MÔNICA)	$t_0 = t^5$ (1/3 CONT. MÁXIMA CLAYTON)	$t_0 = t^6$ (PARALE- LAS)	$t_0 = t^7$ (APROXIMAÇÃO SUCESSIVAS: LENDZ - ZUBER)
FABOR Nº 1	A	2,763	2,824	2,843	2,757	2,761	2,756	2,754
	B	2,801	2,794	2,805	N/CALCUL.	2,791	2,786	N/CALCULADO
FABOR Nº 5	A	2,758	2,742	2,766	N/CALCUL.	2,743	2,756	N/APLICAVEL
	B	2,766	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	2,770	2,783	N/APLICAVEL
REDUC Nº 6	A	0,6118	0,6108	0,6109	0,6185	0,6101	0,6114	0,6113
	B	0,6139	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	0,6102	0,6126	N/APLICAVEL
REDUC Nº 8	A	0,6433	0,6415	0,6423	N/CALCUL.	0,6428	0,6424	N/APLICAVEL
	B	0,6427	0,6414	0,6421	N/CALCUL.	0,6432	0,6430	N/APLICAVEL

**VELOCIDADES MÉDIAS DO ESCOAMENTO (m/s) SEGUNDO DIFERENTES
MÉTODOS DE INTERPRETAÇÃO DE t_0**

LOCAL DA EXPERIÊNCIA	CONJUNT. DE MEDIDAÇÃO	$t_0 = t^1$ (MÁXIMO A MÁXIMO)	$t_0 = t^2$ (METADE DA CONT. TOTAL)	$t_0 = t^3$ (MÉDIA ARI- TMÉTICA)	$t_0 = t^4$ (MÉDIA HAR- MÔNICA)	$t_0 = t^5$ (1/3 CONT. MÁXIMA CLAYTON)	$t_0 = t^6$ (PARALE- LAS)	$t_0 = t^7$ (APROXIMAÇÃO SUCESSIVAS: LEND - ZUBER)
FABOR Nº 1	A	2,763	2,824	2,843	2,757	2,761	2,756	2,754
	B	2,801	2,794	2,805	N/CALCUL.	2,791	2,786	N/CALCULADO
FABOR Nº 5	A	2,758	2,742	2,766	N/CALCUL.	2,743	2,756	N/APLICAVEL
	B	2,766	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	2,770	2,783	N/APLICAVEL
REDUC Nº 6	A	0,6118	0,6108	0,6109	0,6185	0,6101	0,6114	0,6113
	B	0,6139	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	FALHA NO PICO	0,6102	0,6126	N/APLICAVEL
REDUC Nº 8	A	0,6433	0,6415	0,6423	N/CALCUL.	0,6428	0,6424	N/APLICAVEL
	B	0,6427	0,6414	0,6421	N/CALCUL.	0,6432	0,6430	N/APLICAVEL

TABELA 7

Velocidade média do escoamento, obtidas através de diferentes métodos de identificação de ΔP_0 .

LOCAL DA EXPERIÊNCIA	LOCAS DE INJEÇÃO, MEDICOES E SINGULARIDADES EXISTENTES	TRECHO DE VALIDADE DE K	K/U TEÓRICO MÉTODO DE TAYLOR	K/U EXPERIMENTAL MÉTODO DAS VARIÂNCIAS	K/U EXPERIMENTAL MÉTODO LENDA-ZUBER APLICAÇÃO SOL. NORMAL
FABOR Nº 1		INJ. → X ₁ INJ. → X ₂ X ₁ → X ₂	0,205	NÃO CALCULADO	0,261 ^(+27%) 0,257 ^(+25%) 0,254 ^(+24%)
FABOR Nº 5		INJ. → X ₁ INJ. → X ₂ X ₁ → X ₂	0,151	—	NÃO CALCULADO
REDUC Nº 6		INJ. → X ₁ INJ. → X ₂ X ₁ → X ₂	0,161	—	0,158 ^(-1,5%) 0,157 ^(-2,5%) 0,159 ^(-1,2%) 0,156 ^(-3%)
REDUC Nº 8		INJ. → X ₁ INJ. → X ₂ X ₁ → X ₂	0,0866	—	NÃO CALCULADO
					0,0949 ^(+9,6%)

TABELA 8

Coeficientes de dispersão teórico e experimentais, calculados por diferentes métodos com indicação do número e tipo de singularidades existentes na tubulação.