

**ESTUDO DA FRAÇÃO DE VAZIO MÉDIA EM UM ESCOAMENTO
BIFÁSICO AR-ÁGUA EM UM TUBO VERTICAL**

*RONALDO E. F. DE MELLO, MARCOS ROBERTO BEHAR
e EDUARDO WAGNER MARTINES*

PUBLICAÇÃO IEA N.º 378
Janeiro — 1975

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

**ESTUDO DA FRAÇÃO DE VAZIO MÉDIA EM UM
ESCOAMENTO BIFÁSICO AR-ÁGUA
EM UM TUBO VERTICAL**

Ronaldo E. F. de Mello, Marcos Roberto Behar e Eduardo Wagner Martines

**Coordenadoria de Engenharia Nuclear
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil**

**Publicação IEA Nº 378
Janeiro - 1975**

Instituto de Energia Atômica

Conselho Superior

Eng^o Roberto N. Jafet - Presidente
Prof. Dr. Emilio Mattar - Vice-Presidente
Prof. Dr. Jose Augusto Martins
Prof. Dr. Milton Campos
Eng^o Helcio Modesto da Costa

Superintendente

Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

ESTUDO DA FRAÇÃO DE VAZIO MEDIA EM UM ESCOAMENTO BIFASICO AR-AGUA EM UM TUBO VERTICAL

Ronaldo E. F. de Mello, Marcos Roberto Behar e Eduardo Wagner Martines

RESUMO

Este trabalho trata do emprego do método do traçador radioativo para medir a fração de vazio num escoamento bifásico ar-água. Como traçador radioativo foi utilizado um sal de Bromo 82. A vazão de água variou entre 0,4 e 2,0 m³/h, a vazão de ar entre 0,2 e 1,0 m³/h. Os valores da fração de vazio medidos estiveram entre 0,05 e 0,32.

Foram feitas comparações entre os valores de frações de vazio obtidos por este método e aqueles calculados a partir das vazões medidas e com o emprego de fórmulas empíricas estabelecidas por outros autores, utilizando métodos diferentes.

Uma vez escolhido o isótopo radiativo conveniente, as medidas não apresentaram dificuldades especiais. Os resultados mostraram uma boa concordância com os valores calculados pelas fórmulas de R. Roumy, mas ainda não foi possível concluir, de um modo geral, sobre a conveniência de aplicação e o grau de confiança deste método.

I - Introdução:

A importância do estudo de escoamentos bifásicos vem da ocorrência comum de escoamentos simultâneos de um líquido e um gás ou vapor em caldeiras, evaporadores, trocadores de calor e mais recentemente a necessidade de aumento da potência térmica específica (volumétrica) em reatores nucleares levaram à utilização da transferência de calor com ebulição, devido aos altos fluxos caloríficos possíveis. Isso levou à necessidade de um maior conhecimento de sistemas de líquido-vapor sob várias condições.

Um conhecimento da fração de cada fase presente em um canal é um pré-requisito para o entendimento dos fenômenos existentes, num escoamento bifásico. Conforme descrições de muitos pesquisadores, vários tipos de regimes podem ser observados, dependendo do número de Reynolds, Froude e Weber, como também da concentração da vazão volumétrica ou fração de vazio (α). Para valores baixos de α , em tubos verticais, o gás tende a se distribuir como uma suspensão de pequenas bolhas (regime de bolhas). Quando α aumenta, pequenas bolhas tendem a se juntar, formando bolhas maiores que quase enchem a seção do canal. Esse regime tem o nome de "slug flow". Continuando com um aumento na vazão do gás, o comprimento dessas bolhas grandes "slug" aumenta até que a parte central do tubo fica completamente cheia de gás e o líquido flui ao longo da parede como uma camada anular (regime de fluxo anular). Com maiores velocidades de gás, o líquido tende a ficar disperso no seio da fase gasosa como uma mistura.

Os casos de maior importância prática entretanto, são os de regime de bolhas e o regime "slug". Nestes dois casos básicos, alguns dos parâmetros de interesse são a fração de vazio (α) e a distribuição dos tamanhos de bolhas.

Várias técnicas têm sido utilizadas para a medida da fração de vazio. Um relato desses vários métodos foi feito por Gouse⁽⁴⁾, que resumiu em forma de tabelas os respectivos resultados.

Dentre esses vários métodos citamos os seguintes: Johnson e Abou Sobe⁽⁶⁾ colocaram válvulas de discos especiais em cada extremidade da seção de ensaio. As válvulas com molas são fechadas rápida e simultaneamente para isolar o conteúdo da seção de ensaio. Desse modo tem-se a fração de vazio média entre as válvulas da seção de ensaio.

Zuber e Hench⁽¹⁵⁾ e depois com outros colaboradores empregaram técnica semelhante (técnica da perda de carga) com algumas modificações.

Método idêntico foi empregado mais recentemente por Roumy⁽¹²⁾ variando o diâmetro do tubo da seção de ensaio.

Dengler⁽²⁾ usou a técnica do traçador radioativo. Um sal radioativo foi dissolvido na fase líquida para o estudo da fração de vazio em escoamentos verticais com água vaporizando em tubos aquecidos. Os resultados concordam, em linhas gerais, com os encontrados por outros investigadores.

O método de atenuação de raios gama foi estudado por Hooker e Popper⁽⁵⁾. Esta técnica emprega uma fonte radioativa e um detector de cristal. A intensidade do feixe, atenuado ao passar através da corrente, é função da densidade de corrente e portanto relacionada a fração de vazio. Petrick⁽¹⁰⁾ melhorou este método fazendo um feixe estreito varrer a largura total do canal, obtendo um perfil de densidades. Esta técnica foi ainda extensivamente utilizada, mais recentemente, por outros pesquisadores: Richardson⁽¹¹⁾, Fohrman⁽³⁾.

Raios beta também têm sido usados em lugar dos raios gama. Yosef⁽¹⁴⁾, mas com resultados não tão bons.

Ainda Neal⁽⁹⁾ construiu uma sonda elétrica para medir parâmetros locais num escoamento bifásico de mercúrio e nitrogênio. Solomon⁽¹³⁾ e Nassos⁽⁸⁾ estenderam esta técnica para o caso de escoamento ar-água.

Técnica semelhante foi utilizada por Lafferty e Hammith⁽⁷⁾, empregando uma sonda elétrica condutora alimentada por uma corrente d.c.

Delhaye⁽¹⁾ mediu a fração de vazio local num escoamento bifásico ar-água, utilizando um anemômetro de fio quente e comparou os resultados com medidas feitas pelo método de atenuação de raios gama.

O propósito deste trabalho não foi o de desenvolver ou melhorar uma técnica, mas o de aplicar uma dessas técnicas e adquirir uma capacidade de realização experimental e análise de resultados pelo grupo, dentro do campo de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Assim, diante dos problemas encontrados e dados obtidos, poderemos estar mais aptos para empreender trabalhos de pesquisa mais complexos e de maior responsabilidade.

Pela disponibilidade de materiais e equipamentos próprios o método adotado para a

medida da fração de vazio e descrito a seguir, foi o de utilização de um traçador radioativo (sal de um elemento radioativo), emissor de raios gama, que é dissolvido na água do circuito e percorre a seção de ensaio juntamente com o ar nela injetado

II - Técnica Experimental na Medida de Fração de Vazio Utilizando Traçador Radioativo.

1 - Introdução:

Num sistema estatico "nonflow system", a relação entre o título (x) e a fração de vazio (α) numa mistura homogênea de vapor e líquido em equilíbrio térmico (saturados) e dada por:

$$\alpha = \frac{1}{1 + [(1-x)/x]v_f/v_g} \quad (1)$$

onde v_f e v_g são os volumes específicos do líquido e vapor, respectivamente, tomados à pressão do sistema

Num sistema onde as fases estão em movimento na direção vertical "flow system", como num canal entre elementos combustíveis, o vapor tende a se mover com velocidade em geral maior do que a do líquido. Existe um escorregamento entre as duas fases representado pela relação entre a velocidade do vapor (V_g) e a velocidade do líquido (V_f), denominada taxa de escorregamento "slip ratio":

$$S = V_g/V_f$$

Assim, S modifica a relação existente entre α e x dada pela expressão (1). Considerando-se as áreas A_f , A_g e as respectivas velocidades de cada fase (fig 1), pode-se deduzir a expressão modificada de α em função de x e S

$$\alpha = \frac{1}{1 + [(1-x)/x]v_f/v_g S} \quad (2)$$

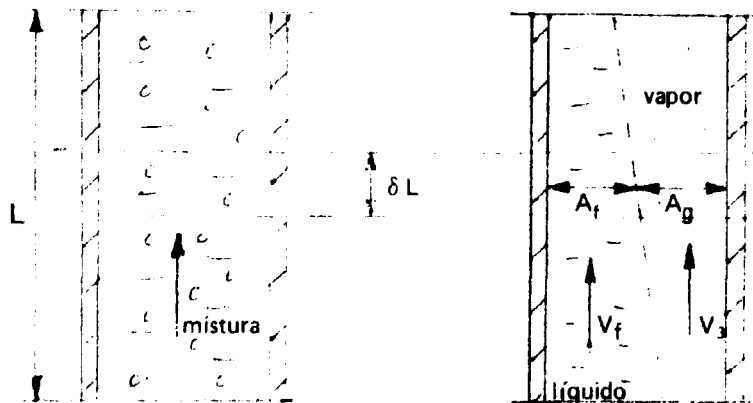


Fig. 1

Escoamento bifásico com vapor em formação, Modelo Teórico.

Nessa expressão notamos que o efeito de S é decrescer (em geral) o valor de α , em relação ao dado pela expressão (1). Assim, o valor de S influencia tanto na moderação como na transferência de calor do caroço de um reator nuclear.

Portanto, se um dos passos para o projeto de canais do caroço é o de tomar um valor máximo para α na saída do canal mais quente (determinado de considerações nucleares), precisamos seleccionar um valor de S para calcularmos o valor de x e o calor gerado no canal.

Torna-se importante então estabelecer as relações empíricas entre x e α ou x e S baseadas em dados experimentais obtidos em condições similares às do projeto.

2. Aspectos teóricos do método de traçador radioativo

A análise é baseada no tipo de sistema usado por Dengler, onde uma porção do canal não teria ebulição e poderia ser utilizada como referência de não ebulição.

As hipóteses foram as seguintes:

- A fase de vapor não contém o sal radioativo (válido para pressões não altas)
- A absorção interna da radiação na solução deve ser desprezível
- O detector "vê" a mesma porção do canal em cada posição ao longo da secção de ensaio.

No caso deste trabalho não temos ebulição no canal e a fase de vapor é simulada por ar que é injetado na corrente, antes da secção de ensaio. Desse modo a vazão em massa, do ar e da água não variam ao longo da secção de ensaio e a referência utilizada é a do canal completamente cheio d'água, i.e., vazão de ar nula.

Seja L o comprimento da secção de ensaio "vista" pelo detector dos raios gama emitidos pelo sal radioativo dissolvido na fase líquida.

Conforme está ilustrado na figura 2, temos dois casos: no caso (1) a corrente fluida é somente d'água e é usada como referência neste método; no caso (2), temos um sistema bifásico composto de uma corrente de água e outra de ar que, para simplificar a dedução teórica, são supostas correndo separada e paralelamente a parede do tubo.

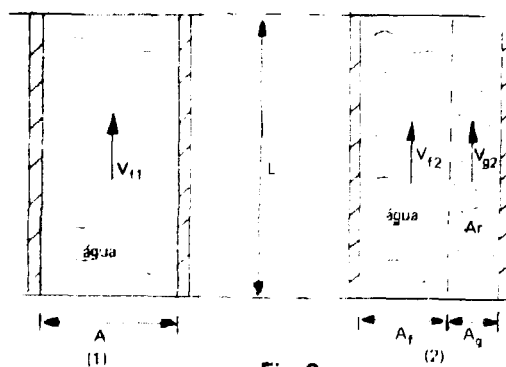


Fig 2

(1) Escoamento de água - referência de medida

(2) Escoamento bifásico de água e ar com vazões constantes.

Sejam ainda as áreas de secção de passagem das correntes líquida e gasosa aproximadamente constantes ao longo do comprimento L e dadas respectivamente por A_f e A_g , de modo que sua soma seja igual à área A da secção interna do tubo.

Pela definição de fração de vazio verifica-se:

$$\alpha = \frac{A_g L}{A_g L + A_f L} = \frac{A_g}{A}$$

e portanto

$$A_g = \alpha A$$

$$A_f = (1 - \alpha) A \quad (3)$$

Supondo que as vazões em massa do sal radioativo sejam iguais nos casos (1) e (2) - corresponde a considerar o balanço de massa do sal radioativo entre uma secção do tubo antes da injeção de ar e uma outra depois da injeção de ar e que não há perdas entre essas secções - resulta a expressão:

$$c_1 \dot{m}_{f1} = c_2 \dot{m}_{f2}$$

ou

$$c_1 \rho_{f1} V_{f1} A = c_2 \rho_{f2} V_{f2} A_f$$

que com as expressões (3) resulta:

$$c_1 \rho_{f1} V_{f1} A = c_2 \rho_{f2} V_{f2} (1 - \alpha) A \quad (4)$$

onde:

\dot{m}_{f1} e \dot{m}_{f2} - vazão em massa do líquido nos casos (1) e (2), respectivamente.

c_1 e c_2 - concentração do sal radioativo no líquido nos dois casos

V_{f1} e V_{f2} - velocidades médias da fase líquida na secção de passagem e no comprimento L .

Admitindo as taxas de contagem em cada caso, dadas por N_1 e N_2 , como proporcionais às massas do traçador radioativo contidas no comprimento L do tubo, respectivamente m_{s1} e m_{s2} e sendo o regime constante, vem:

$$\text{caso (1)} \rightarrow N_1 = K m_{s1} = K c_1 \dot{m}_{f1}$$

$$\text{caso (2)} \rightarrow N_2 = K m_{s2} = K c_2 \dot{m}_{f2}$$

ou introduzindo (3) :

$$N_1 = K c_1 \rho_{f1} L A \quad (5)$$

$$N_2 = K c_2 \rho_{f2} L (1 - \alpha) A \quad (6)$$

Substituindo as expressões (5) e (6) em (4) resulta

$$N_1 V_{f1} = N_2 V_{f2}$$

ou

$$V_{f2} = \frac{N_1}{N_2} V_{f1} \quad (7)$$

Pode-se assim determinar a velocidade média do líquido de um escoamento bifásico conhecendo-se a velocidade do líquido antes do início da ebulição ou da injeção de ar, na secção de ensaio

Se considerarmos que a concentração do sal radioativo na água é a mesma para os casos (1) e (2) deste nosso estudo (so água e água com ar) e que a densidade da água não varia nas condições da experiência (pequena variação de pressão e temperatura constante), ter-se-á:

$$c_1 = c_2 = c$$

$$\rho_{f1} = \rho_{f2} = \rho_f$$

portanto

$$N_1 = K c \rho_f L A \quad (8)$$

$$N_2 = K c \rho_f (1 - \alpha) A \quad (9)$$

Dividindo-se a expressão (9) pela expressão (8) resulta

$$\frac{N_2}{N_1} = (1 - \alpha)$$

ou

$$\alpha = 1 - \frac{N_2}{N_1} \quad (10)$$

Lembrando ainda que nas taxas de contagem N_2 e N_1 , devemos subtrair a radiação de fundo (background) N_B , teremos finalmente:

$$\alpha = \frac{N_1 - N_2}{N_1 - N_B} \quad (11)$$

O valor de α obtido desse modo é a fração de vazão média no volume contido no comprimento L da secção de ensaio "visto" pelo detector

Conhecido o valor de α , pode-se também calcular a densidade média da mistura no escoamento:

$$\bar{\rho} = (1 - \alpha) \rho_f + \rho_g \alpha$$

e se ρ_g for desprezível face a ρ_f tem-se

$$\bar{\rho} = \left(1 - \frac{N_1 - N_2}{N_1 - N_B}\right) \rho_f \quad (12)$$

3 Dispositivo Experimental

O dispositivo experimental é composto de um circuito de água, um circuito de ar, a secção de ensaio e o equipamento de medida

3.1 Circuito de água "Loop"

Esse circuito opera em pressões e temperaturas pouco acima das ambientes e está formado pelos componentes seguintes

- A Uma bomba centrífuga com capacidade para $2\text{m}^3/\text{h}$ de vazão e 20m de altura de coluna d'água, acionada por um motor de 3/4 de HP
- B Um reservatório de água com capacidade para 150 litros, utilizado para alimentação e a deaeração da água do circuito.
- C Um filtro da água de admissão no circuito, tipo "Cuno".
- D Um medidor de vazão d'água, tipo rotâmetro com capacidade entre 0,2 e $2,0\text{m}^3/\text{h}$ (a 20°C e pressão normal).
- E Uma válvula de 1" na linha de admissão da bomba e 6 válvulas de 3/4" para o controle de vazões (e pressão) no circuito.
- F Dois manômetros, tipo "Bourdon" com capacidade até $4\text{Kg}/\text{cm}^2$, que indicam a pressão na saída da bomba e na entrada da secção de ensaio.
- G Um termômetro, tipo "Bourdon", de 0 a 120°C que indica a temperatura da água na entrada da secção de ensaio.
- H Tubulação de ferro galvanizado com 1" de diâmetro entre o reservatório e a bomba e com 3/4" de diâmetro no restante do circuito.

No circuito da figura 3, a água vem do reservatório, é bombeada, passa pelo rotâmetro, circula pela secção de ensaio no sentido ascendente e volta ao reservatório. Existe ainda um desvio da linha antes do rotâmetro para possibilitar a operação da bomba sem passar a água pelo circuito todo. A vazão é controlada pelas válvulas V2 ou V4.

3.2 - Circuito de Ar

O ar é admitido no circuito de água cerca de 70cm antes da secção de ensaio, através de um pequeno difusor disposto na linha central do tubo (fig 4). Esse ar é alimentado por um compressor de pistão com capacidade de 8,4 atm de pressão máxima admissível e deslocamento de 140 litros por minuto.

O difusor foi construído para que o ar injetado na água fique disperso mais homogêneo e na forma de pequenas bolhas (pequenas vazões).

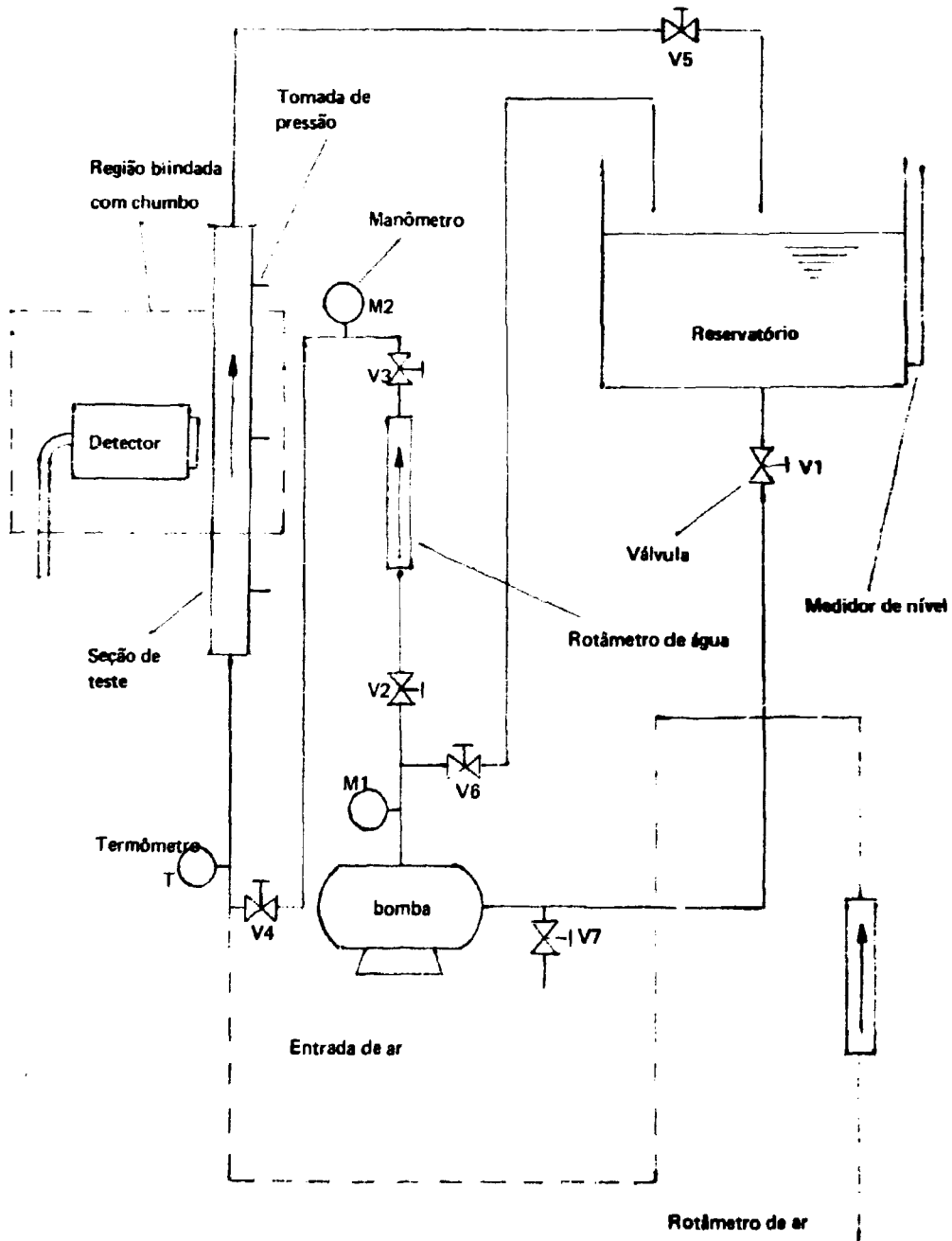


Fig. 3

Esquema de circuito de água, secção de ensaio, detector e entrada de ar.

Durante a operação em regime, o ar dentro do reservatório do compressor é mantido a uma pressão constante em torno de $2,0 \text{ Kg/cm}^2$ (relativa). O ar passa por um filtro simples de óleo e por meio de um sistema de 3 válvulas (tipo agulha), e regulada manualmente a pressão e a vazão de ar num rotâmetro com capacidade de $0,1$ a $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ a pressão de 1 Kg/cm^2 e temperatura de 20°C (fig 5). Um manômetro tipo "Bourdon" indica a pressão do ar que entra no rotâmetro e vai para o difusor mencionado.

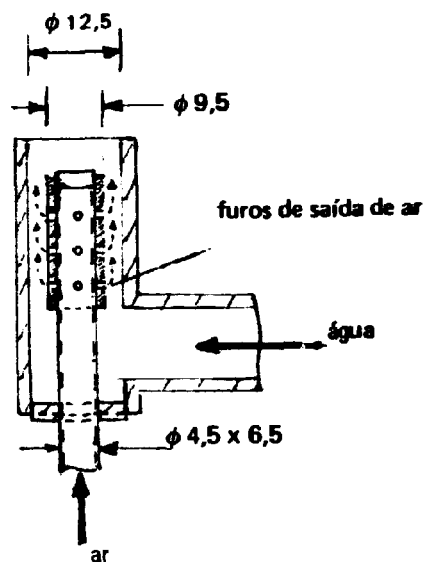


Fig. 4

Esquema do dispositivo de injeção de ar na corrente de água

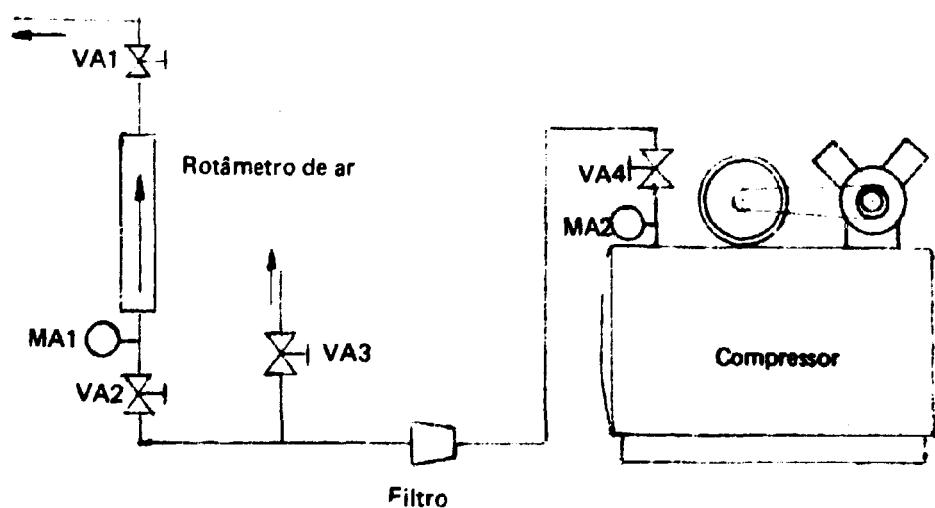


Fig. 5

Esquema do circuito de alimentação de ar para a secção de ensaio

3.3 Secção de ensaio

A secção de ensaio consiste em um tubo circular de lucite na posição vertical, com 36 mm de diâmetro interno, 2,8 mm de parede e 1,0 m de comprimento. É fixada por flanges e quatro barras de suporte a tubulação do circuito (fig 6).

Uma tomada de pressão estática da mistura de água e ar está instalada no tubo de lucite, aproximadamente na metade do seu comprimento (posição do detector), conforme ilustração pormenorizada da figura 6.

Mede-se e registra-se a pressão por meio de um transdutor de pressão com "strain gauge" ($1,5 \text{ Kg/cm}^2$ e precisão de 1%), um sistema de energização e um registrador. Na calibração do transdutor usou-se um manômetro diferencial de mercúrio que também serviu como um segundo medidor de pressão.

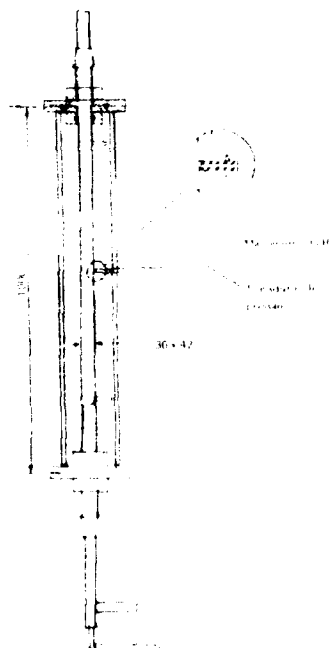


Fig 6

Esquema da secção de ensaio de tubo circular com tomadas de pressão

3.4 Equipamento de medida de radiação e blindagem do sistema detector - secção de ensaio.

O sistema de medidas é composto de um detector com pré-amplificador, uma fonte de alta tensão, um analisador multicanal e uma impressora (fig 7).

O detector é formado de um cristal de cintilação de NaI ativado com Talio (marca "Harshaw" 7DS), e uma fotomultiplicadora (marca "RCA" 32L7 R), com um protetor magnético.

O pré-amplificador, com voltagem máxima de 2KV (TMC DS 13), liga-se a uma fonte de

alta tensão (marca Hammer Eletronics Co N 401), que opera a uma voltagem de 1000V, de acordo com a característica do detector

Usou se ainda, um analisador multicanal (100 canais), tipo "Gammascopie II" ("TMC" 102), e uma impressora rápida ("TMC" 500-A).

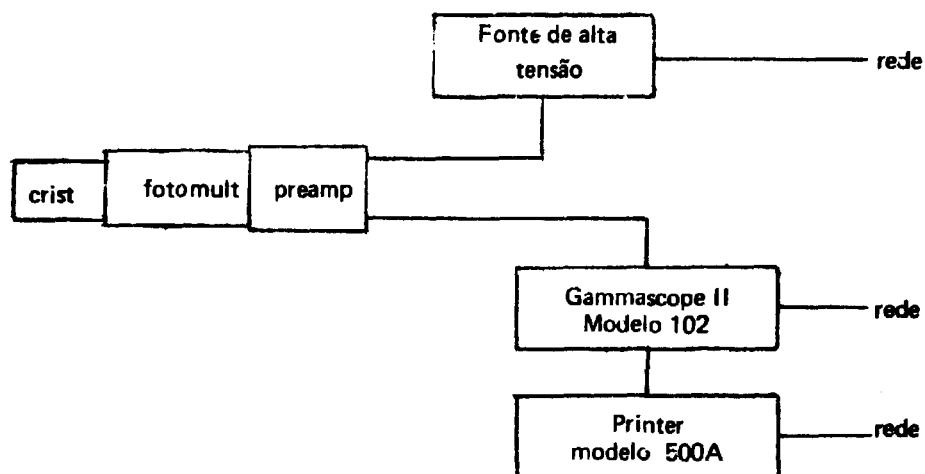


Fig 7

Equipamento de detecção das radiações e registro dos pulsos

Com a finalidade de minimizar a alta radiação de fundo causada pelo sal radioativo, presente na água do circuito reservatório, tubulações e extremidades da secção de ensaio construiu-se um arranjo para blindagem do sistema de detecção

O detector e o pré-amplificador foram colocados dentro de um tubo de chumbo com 2,5 cm de parede e próximo à secção de teste de modo que a face do detector fica distanciada de 8,25 cm da linha central do tubo de lucite (fig.8)

Esse conjunto e um trecho de 20 cm de comprimento do tubo de lucite (fonte radioativa "vista" pelo detector), está todo contido numa segunda blindagem formada de paredes de tijolos de chumbo de 5 cm de espessura e que rodeiam o detector e esta parte do tubo.

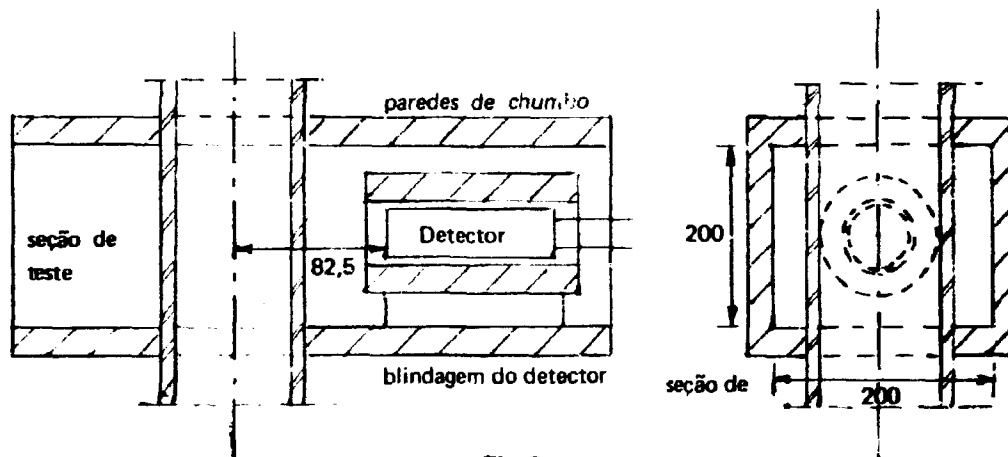


Fig 8

Arranjo das blindagens de chumbo do detector e do trecho da secção de ensaio "visto" pelo detector

3.5 - Procedimento operacional e condições da experiência

Na escolha do sal radioativo a ser utilizado na experiência, consideraram-se os fatores seguintes:

- Que o isótopo tivesse um espectro gama com o pico de maior intensidade em torno de 1 MeV (minimizar a auto absorção).
- Que a meia vida do isótopo radioativo não fosse nem grande demais (segurança), nem curta demais (taxas de contagem insuficientes no fim da experiência).
- Que não houvesse perdas do sal por deposição no circuito ou evaporação no reservatório.

De acordo com indicação da CPMR (Coordenadoria de Processamento de Material Radioativo), escolheu-se o Bromo 82 na forma de Brometo de Sódio. O Br-82 tem uma meia vida de 35,4 h e o espectro gama apresenta vários picos, sendo de maior interesse os de 0,777 MeV e 1,044 MeV.

O material processado para esta experiência tinha uma atividade total de 3,8 mCi, uma atividade específica de 75,1 $\mu\text{Ci}/\text{mg}$ Br 82 e uma concentração de 50,6 mg Br/ml.

Com o assessoramento do CPMR e do CPRD (Coordenadoria de Proteção Radiológica e Dosimetria), o material radioativo foi colocado no reservatório do circuito com um volume aproximado de 40 l de água.

Para a homogeneização da solução, fez-se circular a água do reservatório passando pelo desvio do circuito após a bomba. Em seguida, fizemos circular o líquido passando pela secção de ensaio a fim de molhar o tubo de lucite e em continuação drenamos o líquido da secção de ensaio para estabelecer as condições iniciais da experiência. Fez-se, então, a primeira medida do "background" na secção de ensaio. Devido ao decaimento radioativo do isótopo, este instante foi tomado como início da experiência, considerando a necessidade de correção nas taxas de

contagens obtidas nas séries de medidas seguintes.

Em seguida, com a vazão de ar nula, procedeu-se a uma série de medidas da atividade da solução circulando pela secção de ensaio, (repetidas no fim da experiência para teste de reprodutibilidade). A taxa de contagem média obtida nesta série foi tomada como referência (fração de vazio nula), para o cálculo da fração de vazio dos escoamentos bifásicos com taxas de contagens mais baixas.

Variando a vazão de água de 0,4 m³/h até 2,0 m³/h e a vazão de ar de 0,2 m³/h até 1,0 m³/h, fizeram-se várias séries de medidas da atividade, correspondentes a cada mistura ar-água resultante na secção de ensaio. Simultaneamente, mediram-se as respectivas pressões estáticas resultantes, em cada mistura, na região da secção de ensaio próxima ao detector de radiação. A temperatura da mistura foi admitida igual à da água entrando na secção de teste e quase constante no decorrer da experiência.

O intervalo de variação das vazões teve seus extremos limitados principalmente pelas capacidades dos rotâmetros, e depois pelas características dos escoamentos resultantes. As velocidades da água escoando-se na secção de ensaio variaram de 11,0 cm/s (Nre=3900) até 54,6 cm/s (Nre=19.550). O título da mistura, nessas condições, variou de: $x = 0,00012$ até 0,0012.

As contagens feitas com o analisador multicanal, no modo "scaler", foram somadas nos 100 canais (4 seg/canal), e resultaram para cada medida da ordem de 100.000 (120.000 a 80.000). Esse valor dá um desvio estatístico da ordem de 0,3%.

Visando a um teste de reprodutibilidade, realizamos uma nova série, repetindo algumas das medidas feitas na 1ª série, um dia após.

III - Resultados e Análise

1. Cálculo da Fração de Vazio a partir das Taxas de Contagens

No decorrer da experiência, a atividade específica do sal radioativo dissolvido na água diminui (decaimento radioativo do isótopo). Por esse motivo, a taxa de contagem na medida com cada uma das misturas de água e ar, feita num dado instante t (duração da medida desprezível face à meia-vida do isótopo), deve ser corrigida segundo a lei do decaimento radioativo:

$$N_0 = N \exp\left(\frac{0,693}{T_{1/2}} t\right) \quad (13)$$

onde:

t - tempo decorrido entre o instante inicial de referência (medida do background) e o instante em que foi feita a medida.

N_0 - taxa de contagem correspondente ao instante inicial de referência,

N - taxa de contagem obtido no instante t em que foi feita a medida.

$T_{1/2}$ - Meia vida do isótopo radioativo.

Assim, para cada medida feita, calcularam-se o fator de correção $\exp(0.693/2124 t)$ a meia vida do Br 82 é de 2124 minutos e o valor de N_0 correspondente a cada N . Os resultados desses cálculos estão na Tabela I, na ordem cronológica das medidas.

As medidas do "background" foram feitas no início e no fim da experiência e adotado o valor médio entre estas duas medidas para o cálculo dos α . Da mesma forma, foram repetidas as medidas com tubo cheio só de água (em várias vazões), tanto no início como no fim da experiência e tomada a média entre todas essas medidas para valor de referência no cálculo da fração de vazio. Esses valores médios são respectivamente: $N_B = 2025$ e $N_1 = 116.986$, e foram utilizados na expressão (11) do cálculo de α :

$$\alpha = \frac{N_1 - N_2}{N_1 - N_B} = \frac{116.986 - N_2}{116.986 - 2.025} = \frac{116.986 - N_2}{114.961} \quad (14)$$

O desvio estatístico de cada valor de α assim obtido foi calculado a partir do desvio estatístico de cada uma das taxas de contagem da fórmula acima e com a expressão obtida pela teoria dos erros:

$$\sigma(\alpha) = \left\{ \left[\frac{\partial \alpha}{\partial N_1} \sigma(N_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial \alpha}{\partial N_2} \sigma(N_2) \right]^2 + \left[\frac{\partial \alpha}{\partial N_B} \sigma(N_B) \right]^2 \right\}^{1/2}$$

e sendo:

$$\sigma(N_1) = (N_1)^{1/2}$$

$$\sigma(N_2) = (N_2)^{1/2}$$

$$\sigma(N_B) = (N_B)^{1/2}$$

vem:

$$\sigma(\alpha) = \frac{1}{(N_1 - N_B)} \left[\left(\frac{N_1 - N_2}{N_1 - N_B} \right)^2 \cdot N_B + \left(\frac{N_2 - N_B}{N_1 - N_B} \right)^2 \cdot N_1 + N_2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

Os valores de α e σ calculados pelas expressões (14) e (15) respectivamente, variaram nas condições da experiência entre os valores α de 0,050 e 0,304 e σ de 0,0040 a 0,0032, conforme pode ser notado na Tabela II.

2. Comparação entre os Valores medidos e os obtidos de cálculos efetuados a partir das vazões de água e ar.

Com a finalidade de comparar os valores de α obtidos neste trabalho com o emprego do método do traçador radioativo, com os valores de α calculados a partir das vazões medidas de água e ar, recorreremos a fórmulas empíricas deduzidas por alguns dos pesquisadores já citados no início.

Assim, com a expressão (2), para calcularmos α em função de x , a taxa de escorregamento S deve ser conhecida ou obtida de relações empíricas com as vazões medidas.

Estudando problemas de escoamento bifásicos de água e ar em tubos horizontais, em pressão atmosférica, Richardson⁽¹¹⁾ propôs a seguinte correlação para a taxa de escorregamento

$$S = 37 x^{1/2} \quad (16)$$

Considerando o efeito da viscosidade do componente líquido em várias misturas bifásicas e em escoamentos horizontais, Fohrman⁽¹³⁾ propôs uma correlação de S modificada para:

$$S = 80 \mu^{0,30} x^{0,77} \quad (17)$$

μ - - e a viscosidade do líquido nas condições da experiência.

Esses dois pesquisadores chegaram às expressões de S estudando os diferentes regimes de escoamentos bifásicos com variações das vazões dos componentes e tamanhos (áreas de passagem) da seção de ensaio e utilizando o método de atenuação de raios gama.

Considerando somente as experiências feitas com água e ar, as faixas de variações dos vários parâmetros estão resumidos no quadro abaixo.

QUADRO

PARÂMETROS	RICHARDSON*	FOHRMAN*
Secção de ensaio (pol ²)	0,25 - 2,00	
Vazão de água (lb/s)	0,30 - 3,66	0,20 - 0,30
Vazão de ar (lb/s)	0,001 - 0,06	0,001 - 0,015
Título (x)	0,0005 - 0,0517	0,005 - 0,0184
Fração de vazio (α)	0,20 - 0,84	0,73 - 0,80
Taxa de Escorregamento (S)	0,56 - 6,70	1,30 - 4,60
Precisão de correlação (%)	± 30	± 10 em 70% de casos

* Viscosidade do líquido variou de 0,75 - 500 cp

Intervalos de variação dos parâmetros nas experiências de Richardson e Fohrman

Roumy⁽¹²⁾ também estudou a estrutura dos escoamentos bifásicos água-ar e estabeleceu correlações da fração de vazio em função das vazões, para o regime de "bolhas independentes" em escoamentos verticais ascendentes à pressão atmosférica. Com secções de teste tubulares de três diferentes diâmetros e empregando a técnica de medida com válvulas de fechamento rápido e simultâneo, chegou às expressões:

Diâmetro interno da secção de ensaio	Expressão	
D = 16mm	$\alpha = 0,900 \left(\frac{V_{sg}}{V_{sf} + 20} \right)^{1,0}$	(18a)
D = 20mm	$\alpha = 0,986 \left(\frac{V_{sg}}{V_{sf} + 20} \right)^{1,01}$	(18b)
D = 32mm	$\alpha = 0,731 \left(\frac{V_{sg}}{V_{sf} + 20} \right)^{0,884}$	(18c)

onde:

V_{sg} - é a velocidade superficial do gás definida pela razão entre a vazão do gás e a área da secção de passagem do tubo:

$$(V_{sg} = \frac{Q_g}{S})$$

dada em cm/s

V_{sf} - é a velocidade superficial do líquido definida pela razão entre a vazão do líquido e a área da secção de passagem do tubo:

$$(V_{sf} = \frac{Q_f}{S})$$

dada em cm/s

Embora as variações de velocidades superficiais durante todo o estudo fossem V_{sf} de 0 a 4 m/s e V_{sg} de 0,4 a 3 m/s, no caso do regime de bolhas independentes, para o qual foram deduzidas as expressões (18), as variações foram:

$$V_{sf} = 0 \text{ a } 311 \text{ cm/s}$$

$$V_{sg} = 0,45 \text{ a } 87 \text{ cm/s}$$

$$\alpha = 0,025 \text{ a } 0,200$$

Primeiramente, procuraremos comparar as taxas de escorregamento S, dadas pelas expressões (16) e (17), com as taxas de escorregamento calculadas a partir dos valores de α medidos das vazões de água e ar com o emprego da expressão (2) colocada na forma

$$S = \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot \frac{x}{1-x} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_g} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot \frac{Q_g}{Q_f} \quad (19)$$

onde:

- ρ_f densidade da água nas condições da secção de ensaio
- ρ_g densidade do ar nas condições de pressão e temperatura da secção de ensaio
- Q'_g e a vazão de ar na secção de ensaio obtida da vazão de ar medida no rotâmetro (Q_g) pela relação $Q'_g = Q_g(\rho_g/\rho'_g)$
- Q_f e a vazão de água medida no rotâmetro

No cálculo dos valores de S_1 pela expressão (19), S_2 pela expressão (16) e S_3 pela expressão (17), consideramos os seguintes valores para as condições atmosféricas locais e as correspondentes propriedades físicas da água:

- Temperatura = 23°C
- Pressão = 0,9437 Kg/cm²
- Densidade da água $\rho_f = 998,2329$ g/l
- Viscosidade da água $\mu = 1,1$ cp

A densidade do ar na secção de ensaio foi obtida pela lei dos gases perfeitos $P = R\rho T$, conhecendo-se as pressões e as temperaturas na secção de ensaio e a densidade do ar nas condições de calibração do rotâmetro:

- Temperatura = 20°C
- Pressão = 760 mm Hg
- Densidade do ar $\rho_g = 1,2047$ g/l

Os resultados desses cálculos estão na Tabela III e uma comparação gráfica entre os valores de S esta representada em escala bilogaritmica na figura 9

Nessas comparações podemos verificar a grande discrepância entre os valores de S_1 com S_2 e S_3 , no intervalo de variação do título x de nossa experiência. Nossos resultados mostram, pela existência de várias curvas ($S_1 = f(x)$), que a taxa de escorregamento S_1 não variou somente com o x (propriedades da água constantes). Devemos considerar, entretanto, que os intervalos de variação de x abrangidos nos três casos são diferentes, e que o intervalo de nossa experiência está quase totalmente fora daqueles que Richardson e Fohrman consideraram para a dedução das suas expressões. Podemos notar, além disto, que os valores de S obtidos pela expressão (16) e os obtidos pela expressão (17) se aproximam bastante para os valores de x maiores do que 0,01.

Passamos, em seguida, a comparação entre os valores de α_a resultantes das expressões (18), com os valores de α_1 obtidos da expressão (14). Para isso construímos inicialmente um gráfico onde, em papel bilogaritmico, traçamos as retas representativas das expressões (18) e lançamos os valores de α obtidos de (14) com as abcissas calculadas em função das vazões ao invés das velocidades superficiais, uma vez que:

$$\frac{V'_{sg}}{V_{sf} + 20} = \frac{Q'_g}{Q_f + 0,733}$$

onde:

- V'_{sg} e V_{sf} são dados em cm/s
- Q'_g e Q_f são dados em m³/h

Conforme mostra a figura 10, os pontos representativos de $\alpha_1 = f\left(\frac{Q_g}{Q_f + 0,733}\right)$ estão distribuídos ao longo e pouco abaixo das três retas representativas das expressões (18)

A reta 1, da expressão (18c), é a que mais se aproxima da reta ajustada a esses pontos. Assim, essa expressão que corresponde aos resultados com a secção de ensaio de maior diâmetro interno ($D = 32 \text{ mm}$) foi a empregada para calcular os valores de α_4 que foram comparados aos valores de α_1 .

Na Tabela IV encontra-se a comparação entre os valores de α calculados pelas respectivas expressões: α_1 pela (14), α_4 pela (18c), α_2 pela (16) e α_3 pela (17). Nela podemos notar que a expressão (18c) é a que resulta em valores de α mais próximos dos obtidos em nosso trabalho e que os cálculos a partir de (16) e (17) estão muito afastados dos valores por nós obtidos, conforme já foi observado na comparação dos valores da taxa de escorregamento. Na figura 11 traçamos em papel bilogarítmico as "curvas" de α em função da vazão de ar Q_g , para cada vazão de água Q_f (no intervalo utilizado em nossa experiência), utilizando os valores da Tabela IV. Por esta figura podemos notar as diferentes tendências das curvas obtidas pelos três pesquisadores com o aumento da vazão de ar. A figura 12 representa um gráfico dos desvios dos α_1 medidos em relação aos α_4 calculados com as mesmas vazões.

Acreditamos que esta disparidade se deva ao fato de as expressões de S propostas por Richardson e Fohrman, terem sido obtidas com medidas feitas com escoamentos bifásicos em regimes diferentes dos que tivemos em nossa experiência. Conforme foi notado por Roumy, no regime de bolhas é necessário considerar também as massas específicas como parâmetros, enquanto nos regimes anular e semi-anular α depende basicamente de Q_g/Q_f .

IV - Conclusão

Na análise comparativa feita, ficou evidente que nossos resultados não concordam com os valores obtidos pelas expressões (16) e (17) e estão em grande parte próximos e abaixo dos previstos pelas expressões (18) de Roumy para o regime de escoamento em que nós trabalhamos, isto é, o regime de bolhas. Entretanto, devemos fazer as observações seguintes:

- a.) nós trabalhamos, algumas vezes, com o regime de bolhas aglomeradas enquanto a expressão (18) é proposta para o regime de bolhas independentes.
- b.) Roumy chegou a diferentes expressões (a,b,c) para os três diferentes diâmetros da secção de ensaio: 16,20 e 32 mm enquanto nós utilizamos um tubo de 36 mm de diâmetro interno que deveria então resultar em uma expressão também diferente e provavelmente com valores de α menores que concordam com os resultados encontrados por Delhaye⁽¹⁾.
- c.) Os resultados previstos em (18c) devem ter uma margem de incerteza em torno de $\pm 30\%$ (própria de medidas em escoamentos bifásicos) que vão abranger a maioria dos valores de α encontrados em nossas medidas.

Tomando por base esses dados podemos concluir por uma razoavelmente boa concordância de nossas medidas de fração de vazio, obtidas com a utilização do método do

traçador radioativo, com os resultados encontrados na literatura e obtidos por outros métodos.

Os autores acham, entretanto, que para uma conclusão clara, baseada em nossas próprias experiências sobre a qualidade e aplicabilidade deste método, deveriam repetir e estender a experiência considerando variações na geometria da seção de ensaio, e nos regimes de escoamento, além de procurar uma possível melhoria na técnica de aplicação. O método deveria ser aplicado para misturas de água vapor e comparar os resultados com os obtidos por Dengler⁽²⁾ que utilizou este método.

Enfim, no que refere ao treinamento do pessoal em trabalhos de pesquisa experimental, achamos que os objetivos propostos de início foram satisfeitos e poderão motivar novos trabalhos, dessa natureza, em continuação ao realizado ou na mesma área de estudo.

Tabela I

Taxas de contagens medidas e corrigidas pelo decaimento radioativo de Br 82. Meia Vida $T_{1/2} = 2124$ min

Série Medida	Q_g (m ³ /h)	Q_f (m ³ /h)	t (min)	$\exp\left(-\frac{693}{2124}t\right)$	N (cont)	N_o (cont)
B.G.1	0	0	0	1,0000	1.620	1.620
1-1	0,0	1,2	11	1,0036	119,806	120,237
1-2	0,0	0,4	23	1,0075	118,100	119,600
1-3	0,0	0,8	31	1,0102	117,534	118,729
1-4	0,0	1,6	40	1,0131	116,866	118,401
1-5	0,0	2,0	50	1,0164	116,450	118,365
2-1	0,2	0,4	90	1,0298	100,328	103,318
2-2	0,2	0,8	100	1,0332	101,526	104,893
2-3	0,2	1,2	115	1,0382	102,937	106,873
2-4	0,2	1,6	121	1,0403	104,467	108,674
2-5	0,2	2,0	129	1,0430	106,629	111,213
3-1	0,4	0,8	138	1,0461	92,107	96,349
3-2	0,4	1,2	146	1,0488	92,222	96,721
3-3	0,4	1,6	153	1,0512	95,207	100,080
3-4	0,4	2,0	161	1,0539	98,652	103,973
4-1	0,6	0,8	169	1,0567	83,655	88,397
4-2	0,6	1,2	177	1,0595	87,340	92,532
4-3	0,6	1,6	185	1,0622	87,311	92,743
4-4	0,6	2,0	192	1,0646	91,156	97,049
5-1	0,8	1,2	201	1,0678	82,229	87,802
5-2	0,8	1,6	209	1,0706	83,603	89,503
5-3	0,8	2,0	216	1,0730	85,673	91,929
6-1	1,0	1,6	226	1,0765	80,650	86,822
6-2	1,0	2,0	236	1,0800	80,750	87,213
6-3	1,0	1,0	244	1,0829	73,848	79,967
6-4	1,0	1,2	252	1,0857	75,541	82,014
5-4	0,8	0,8	261	1,0889	75,656	82,381
3-5	0,4	0,4	269	1,0917	80,660	88,059
3-6	0,4	1,0	276	1,0942	86,941	95,133
7-1	0,0	0,4	286	1,0978	104,705	114,946
7-2	0,0	0,8	295	1,1010	104,789	115,376
7-3	0,0	1,2	302	1,1036	103,985	114,753
B.G.2	0	0	315	1,1082	2,193	24,300

TABELA II

Fração de vazio α e desvio σ (α) calculados pelas taxas de contagens N_2 de cada mistura e as taxas de contagens N_1 da água e N_B do "background".

$$N_1 = 116\,986 \quad N_B = 2\,025$$

Série Medida	Q_g (m ³ /h)	Q_f (m ³ /h)	$\alpha = \frac{N_1 - N_2}{N_1 - N_B}$	σ (α)
2-1	0,2	0,4	0,1188	0,0038
2-2	0,2	0,8	0,1051	0,0038
2-3	0,2	1,2	0,0879	0,0039
2-4	0,2	1,6	0,0723	0,0039
2-5	0,2	2,0	0,0502	0,0040
3-5	0,4	0,4	0,2516	0,0034
3-1	0,4	0,8	0,1795	0,0036
3-2	0,4	1,2	0,1762	0,0036
3-3	0,4	1,6	0,1470	0,0037
3-4	0,4	2,0	0,1131	0,0038
4-1	0,6	0,8	0,2486	0,0034
4-2	0,6	1,2	0,2127	0,0035
4-3	0,6	1,6	0,2108	0,0035
4-4	0,6	2,0	0,1734	0,0036
5-4	0,8	0,8	0,3010	0,0032
5-1	0,8	1,2	0,2538	0,0034
5-2	0,8	1,6	0,2390	0,0034
5-3	0,8	2,0	0,2179	0,0035
6-4	1,0	1,2	0,3042	0,0032
6-1	1,0	1,6	0,2823	0,0033
6-2	1,0	2,0	0,2589	0,0033
3-6	0,4	1,0	0,1900	0,0036
6-3	1,0	1,0	0,3220	0,0031

TABELA III

Comparação das taxas de escorregamento obtidas pelas medidas da fração de vazão (S_1) e pelas correlações propostas por Richardson (S_2) e Fohrman (S_3)

$$P_{\text{atm}} = 0,9437 \text{ Kg/cm}^2, \quad T_{\text{amb}} = 23^\circ \text{C}, \quad \rho_f = 998,2323 \text{ g/l}, \quad \mu = 1,1 \text{ cp}$$

Série	Q_g	Q_f	P					
Medida	(m^3/h)	(m^3/h)	($\text{l}^2/\text{g}/\text{cm}^2$)	ρ_g/ρ_f	x	S_1	S_2	S_3
2-1	0,2	0,4	0,085	1,0147	0,0006030	3,7626	0,9026	0,273
2-2		0,8	0,110	0,9907	0,0003016	2,1085	0,6427	0,1597
2-3		1,2	0,135	0,9677	0,0002010	1,6732	0,5248	0,1177
2-4		1,6	0,190	0,9207	0,0001508	1,4764	0,4545	0,0931
2-5		2,0	0,250	0,8745	0,0001206	1,6546	0,4063	0,079
3-5	0,4	0,4	0,085	1,0147	0,0012053	3,0177	1,2849	0,466
3-1		0,8	0,110	0,9907	0,0006030	2,2645	0,9086	0,273
3-2		1,2	0,150	0,9544	0,0004021	1,4872	0,7419	0,1993
3-3		1,6	0,200	0,9127	0,0003016	1,3241	0,6426	0,1597
3-4		2,0	0,270	0,8601	0,0002413	1,3488	0,5747	0,1350
4-1	0,6	0,8	0,110	0,9907	0,0009043	2,2457	1,1126	0,373
4-2		1,2	0,155	0,9501	0,0006030	1,7582	0,9086	0,273
4-3		1,6	0,210	0,9048	0,0004523	1,2703	0,7869	0,2181
4-4		2,0	0,275	0,8566	0,0003619	1,2249	0,7038	0,1852
5-4	0,8	0,8	0,110	0,9907	0,0012053	2,3006	1,2849	0,466
5-1		1,2	0,155	0,9501	0,0008039	1,8621	1,0490	0,340
5-2		1,6	0,220	0,8970	0,0006030	1,4281	0,9086	0,273
5-3		2,0	0,295	0,8427	0,0004825	1,2098	0,8127	0,2305
6-4	1,0	1,2	0,160	0,9458	0,0010046	1,8029	1,1727	0,4035
6-1		1,6	0,225	0,8932	0,0007537	1,5700	1,0157	0,3227
6-2		2,0	0,310	0,8326	0,0006030	1,1917	0,9086	0,273
3-6	0,4	1,0	0,130	0,9722	0,0004825	1,6580	0,8127	0,2305
6-3	1,0	1,0	0,135	0,9677	0,0012053	2,0345	1,2849	0,4660

TABELA IV

Comparação das frações de vazio medidas (α_1) com aquelas previstas com a utilização das expressões de Roumy (α_4), Richardson (α_2), Fohrman (α_3).

Série	Q_f	Q_g	x	α_1	α_4	α_2	α_3
Medida	m ³ /h	m ³ /h			Roumy	Richardson	Fohrman
2-1	0,4	0,2	0,0006030	0,1188	0,1597	0,3582	0,6501
3-5		0,4	0,0012053	0,2516	0,2946	0,4412	0,6852
2-2	0,8	0,2	0,0003016	0,1051	0,1195	0,2781	0,6079
3-1		0,4	0,0006030	0,1795	0,2211	0,3528	0,6447
4-1		0,6	0,0009043	0,2486	0,3165	0,4009	0,6657
5-4		0,8	0,0012053	0,3010	0,4079	0,4353	0,6800
2-3	1,2	0,2	0,0002010	0,0879	0,0956	0,2350	0,5780
3-2		0,4	0,0004021	0,1762	0,1743	0,3000	0,6147
4-2		0,6	0,0006030	0,2127	0,2482	0,3433	0,6350
5-1		0,8	0,0008039	0,2538	0,3202	0,3764	0,6507
6-4		1,0	0,0010046	0,3042	0,3884	0,4019	0,6614
2-4	1,6	0,2	0,0001508	0,0723	0,0773	0,2020	0,5527
3-3		0,4	0,0003016	0,1470	0,1418	0,2620	0,5882
4-3		0,6	0,0004523	0,2108	0,2014	0,3012	0,6087
5-2		0,8	0,0006030	0,2390	0,2577	0,3304	0,6216
6-1		1,0	0,0007537	0,2623	0,3129	0,3546	0,6336
2-5	2,0	0,2	0,0001206	0,0502	0,0643	0,1771	0,5253
3-4		0,4	0,0002413	0,1131	0,1171	0,2303	0,5602
4-4		0,6	0,0003619	0,1734	0,1667	0,2674	0,5811
5-3		0,8	0,0004825	0,2179	0,2120	0,2931	0,5938
6-2		1,0	0,0006030	0,2589	0,2555	0,3142	0,6039
3-6	1,0	0,4	0,0004825	0,1900	0,1948	0,3236	0,6278
6-3		1,0	0,0012053	0,3220	0,4366	0,4295	0,6749

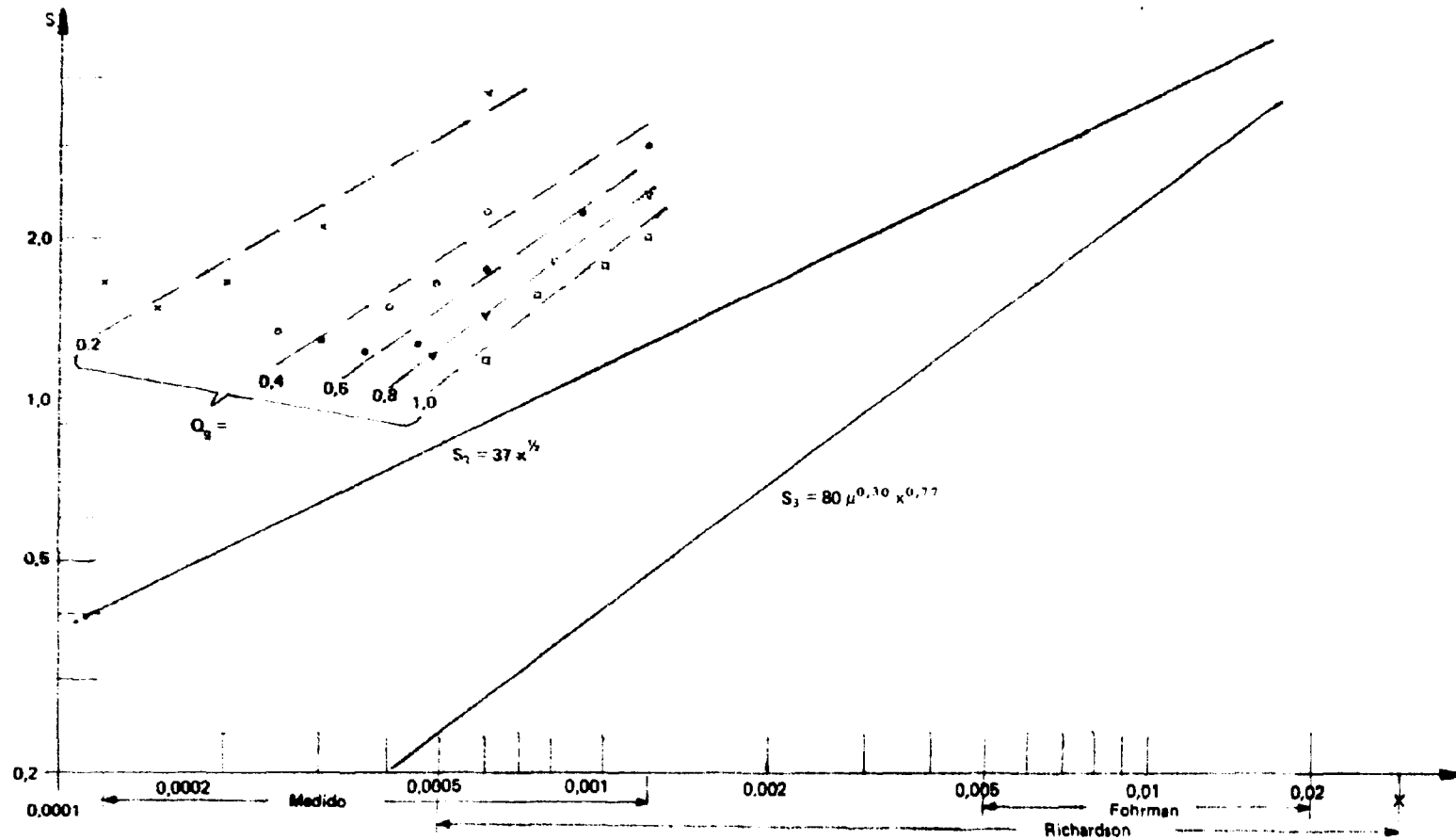


Fig. 9

Taxas de contagem em função do título, segundo Richardson (S_2), Fohrman (S_3) obtidas das medidas de α para cada vazão de ar.

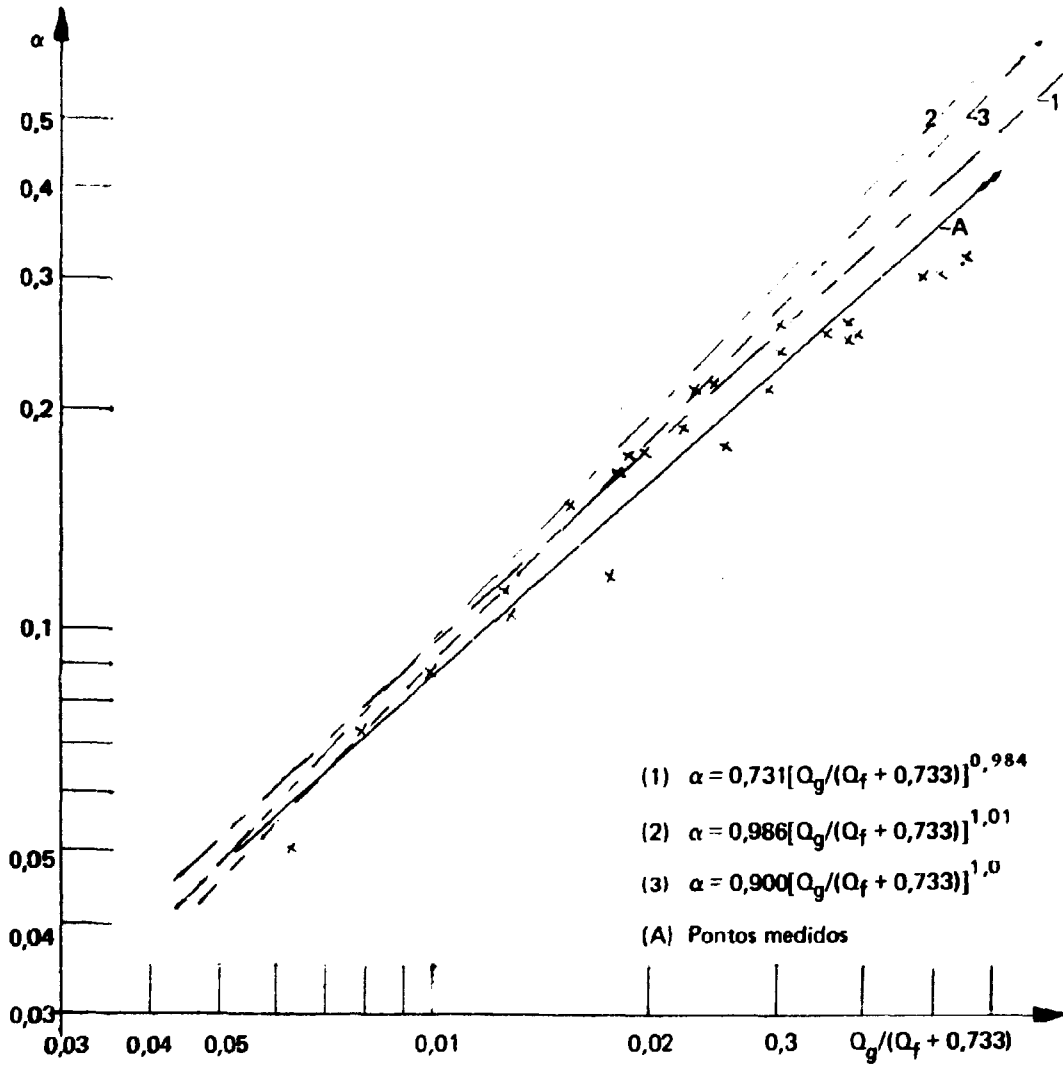


Fig. 10

Fração de vazio em função do parâmetro $Q_g/(Q_f + 0,733)$

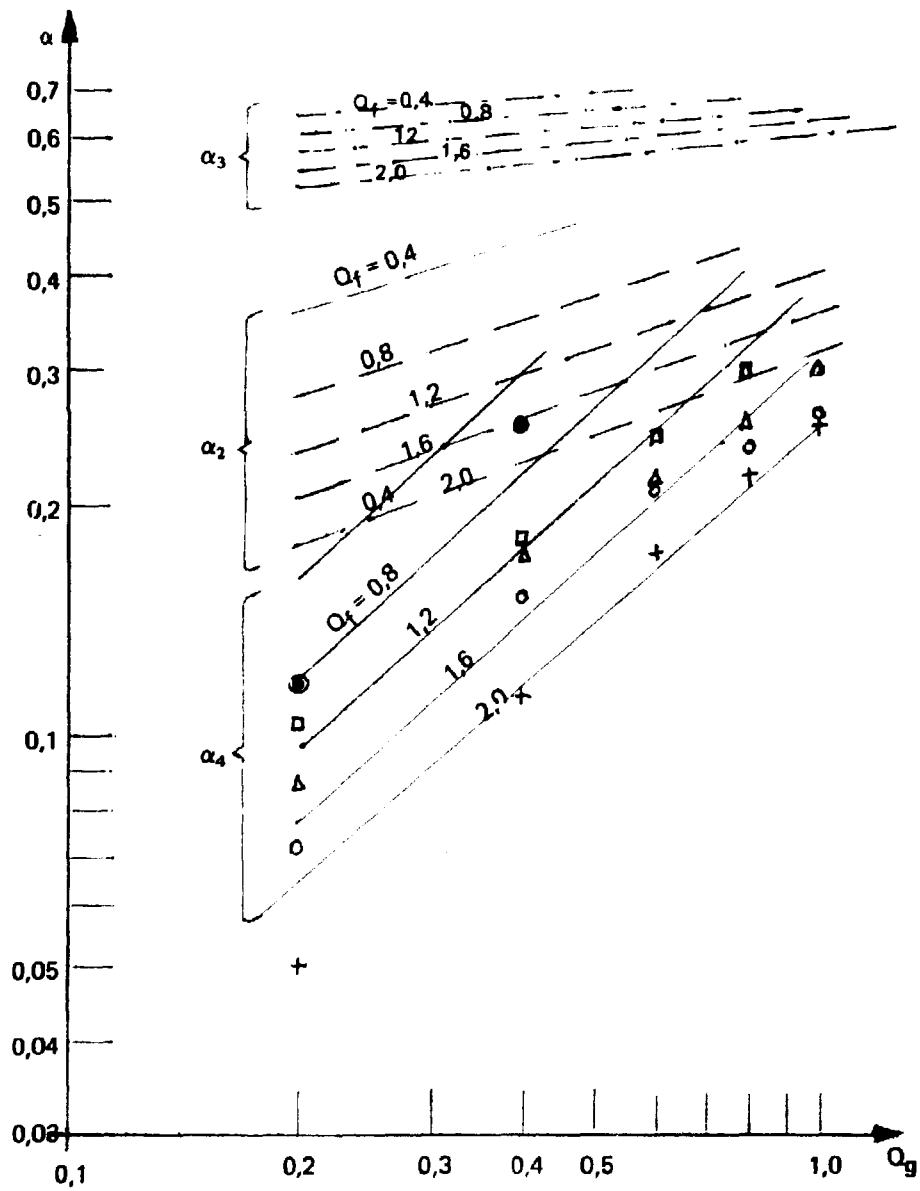


Fig 11

Fração de vazio em função da razão de ar para a vazão d'água

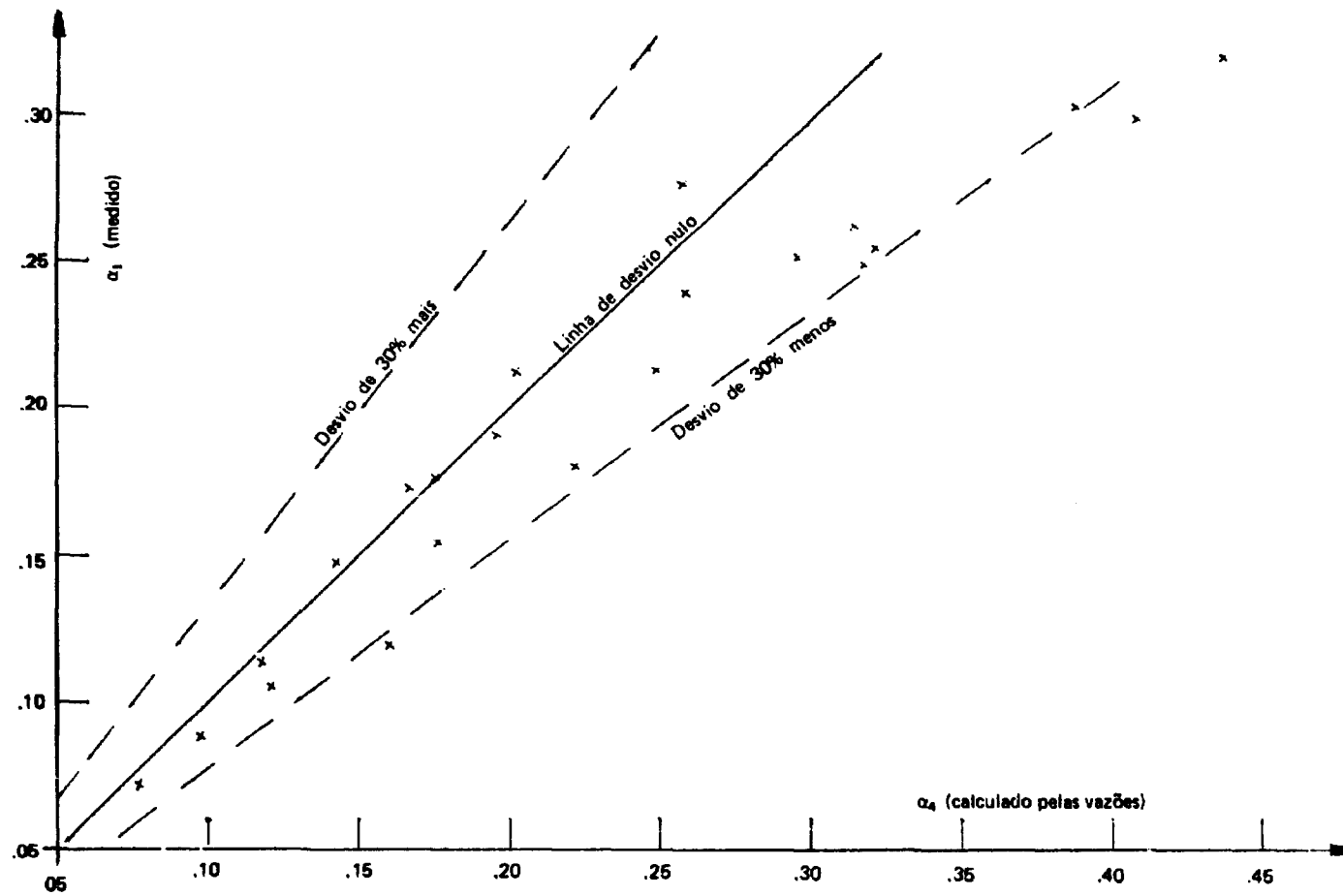


Fig. 12

Comparação entre as frações de vazio medidas e as calculadas pelas vazões, segundo Roumy.

ABSTRACT

This report refers to the utilization of the radioactive trace technique to measure the void fraction in a two phase flow air-water. The radioactive tracer used was a salt of Br 82. The water flow rate was varied between 0,4 and 2,0 m³/h, the air flow rate between 0,2 and 1,0 m³/h. The resulting measured void fraction were between 0,05 and 0,32.

These measured void fraction values were compared with those one calculated with the measured flow rates and by use of empirical formulas obtained by other authors, using different methods.

After a convenient choice of the radioactive isotope the measurements presented any special problems. The results have shown a good accordance with the values calculated by the formulas of R. Roumy, but was not possible yet to conclude in general way about the convenience of application and the grade of confidence of this method.

RÉSUMÉ

Ce travail a trait à l'utilisation de la technique de traceur radioactive afin de mesurer la fraction de vide d'un écoulement biphasique air-eau. Le traceur radioactif utilisé est un sel de brome 82. Le débit de l'eau a été varié de 0,4 à 2,0 m³/h, et celui de l'air de 0,2 à 1,0 m³/h. Les valeurs de la fraction de vide mesurée se situaient entre 0,05 et 0,32.

Ces valeurs ont été comparées avec celles obtenues à partir des débits mesurés et en se servant de formules empiriques établies par d'autres auteurs en utilisant des méthodes différents.

Une fois établi un choix convenable de l'isotope radioactif, les mesures n'ont plus présenté de problème particulier. Les résultats ont montré une bonne concordance avec les valeurs calculées par les formules de R. Roumy; mais il ne fut pas encore possible de conclure, de manière générale, quant à la viabilité de cette méthode et la justification de son emploi.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DELHAYE J. M. *Measurement of the local void fraction in two phase air water flow with a hot-film anemometer*. Grenoble, Fr., CEA, Centre d'Études Nucleaires, Oct. 1968. (CEA R-3465(E))
2. DENGLER, C. E. *Heat transfer and pressure drop for evaporation of water in a vertical tube*. Boston, Mass. MIT, 1952 (Ph. D. Thesis).
3. FOHRMAN, M. J. *The effect of the liquid viscosity in two phase, two-component flow*. Argonne, Ill., Argonne National Laboratory, Nov. 1960. (ANL 6256). (M. S. Thesis)
4. GOUSE, S. W. *Methods of measuring void fractions*. Downey, Calif., North American Aviation, 1960. (NAA SR MEMO 5597). (Microficha).
5. HOOKER, H. H. & POPPER, G. F. *A gamma ray attenuation method for void fraction determinations in experimental boiling heat transfer test facilities*. Lemont, Ill., Argonne National Laboratory, Nov. 1958. (ANL 5766).
6. JOHNSON, H. A. & ABOUSOBE, A. H. Heat transfer and pressure drop for turbulent flow of air-water mixtures in a horizontal pipe. *Trans. Am. Soc. mech. Engrs*, New York, **74**:977, 1952.
7. LAFFERTY, J. F. & HAMMITT, F. G. *A conductivity probe for the measurement of local void fractions in two-phase flow*. Ann Arbor, Mich., Univ. Michigan, Lab. Fluid Flow and Heat Transport Phenomena, Sep. 1966. Tech. Report 0773B-3-T).
8. NASSOS, G. P. *Development of an electrical resistivity probe for void-fraction measurements in air-water flow*. Argonne, Ill., Argonne National Laboratory, Jun. 1963. (ANL-6738)

9. NEAL, L. G. *Local parameters in co-current mercury-nitrogen flow*. Chicago, Ill., Northwestern Univ., 1962 (Ph. D. Thesis).
10. PETRICK, M. *Two phase air-water flow phenomena*. Lemont, Ill., Argonne National Laboratory, Mar. 1958 (ANL-5787).
11. RICHARDSON, B. L. *Some problems in horizontal two-phase two-component flow*. Lemont, Ill., Argonne National Laboratory, Dec. 1958. (ANL-5949). (Ph. D. Thesis).
12. ROUMY, R. *Structure des écoulements diaphasiques eau-air: étude de la fraction de vide moyenne et des configurations d'écoulement*. Grenoble, Fr., CEA, Centre d'Études Nucléaires, Dec. 1969. (CEA-R 3892).
13. SOLOMON, J. V. *Construction of a two-phase flow regime transition detector*. Boston, Mass., MIT, 1962. (M. S. Thesis).
14. YOSEF, M. et alii. A void measurement technique for local boiling. *Nucl. Sci. Engng*, New York, 1:525, 1960 apud NASSOS, G. P. *Development of an electrical resistivity probe for void-fraction measurements in air-water flow*. Argonne, Ill., Argonne National Laboratory, Jun. 1963. (ANL-6738). p.35.
15. ZUBER, N. & HENCH, J. *Steady state and transient void fraction of bubbling systems and their operating limits*. 1. Steady state operation. Schenectady, N.Y., General Electric Co., General Engineering and Consulting Lab., 1962 apud NASSOS, G. P. *Development of an electrical resistivity probe for void-fraction measurements in air-water flow*. Argonne, Ill., Argonne National Laboratory, Jun. 1963. (ANL-6738). p.35.

