

ST6-D

MEDIDA DE FRAÇÃO DE VAZIO NUM TUBO AQUECIDO NAS CONDIÇÕES DE  
REMOLHAMENTO

ROBERTO LONGO FREITAS

Divisão de Termodinâmica e Termohidráulica  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
São Paulo, SP

SUMÁRIO

A modelagem dos fenômenos termohidráulicos encontrados durante a fase de remolhamento quando de um Acidente de Perda de Refrigerante Primário - APRP (LOCA), necessita de um conhecimento considerável das condições do fluido refrigerante. A fração de vazio é um parâmetro de especial importância nesta área, cuja determinação experimental é bastante dificultada pela ampla gama de valores encontrados associados a diferentes regimes de escoamento.

Os métodos de medida de fração de vazio por transmissão e difusão de nêutrons frios, térmicos e epitérmicos foram estudados com peças cilíndricas de alumínio simulando o vapor. Uma grande gama de fração de vazio representativa daquela encontrada na zona molhada foi examinada e uma atenção particular foi dada aos efeitos de sensibilidade dos métodos, principalmente para frações de vazio elevadas. Vários aspectos da técnica de medida foram analisados, tais como efeito da distribuição radial de fases, energia dos nêutrons, temperatura da água, efeito do gradiente axial de vazios.

A técnica de medida de difusão de nêutrons térmicos foi usada para medir o perfil axial de fração de vazio num escoamento bifásico estacionário, onde a pressão, velocidade mássica e o fluxo de calor são representativos das condições de remolhamento.

Resultados experimentais são apresentados e comparados com diferentes modelos de fração de vazio.

## 1. Introdução

A fase de remolhamento de um reator refrigerado a água leve pressurizada, quando de um Acidente de Perda de Refrigerante Primário-APRP (LOCA), é caracterizada por fenômenos complexos ocorrendo no núcleo, os quais devem ser bem compreendidos de modo a prever com razoável confiança o comportamento térmico da parede dos elementos combustíveis. Os modelos utilizados para esta análise necessitam do conhecimento de parâmetros termohidráulicos, dentre os quais a fração de vazio tem uma importância significativa.

Em se tratando de segurança, a região problemática do núcleo do reator é evidentemente a zona seca, onde temperaturas elevadas podem existir. O conhecimento da fração de vazio  $\alpha$  nesta zona é fundamental para a quantificação da transferência de calor por radiação da parede para as gotículas [Deruaz et Petitpain, 1976], assim como da transferência de calor entre o vapor e líquido, onde ambos os modos de transferência dependem fortemente de  $1-\alpha$ . Dentro deste contexto, o essencial do esforço consagrado a termohidráulica do núcleo durante a fase de remolhamento é baseado na descrição detalhada da zona seca, assim como da propagação da frente de remolhamento.

Menos examinada entretanto é a zona molhada do núcleo do reator que concentra pouca atenção em razão dos baixos níveis de temperatura que a caracterizam. Todavia, as condições hidrodinâmicas do fluido na zona molhada efetuam um papel que não pode ser negligenciado:

- o título no fim da zona molhada influencia, juntamente com a pressão e a vazão de remolhamento, a velocidade de propagação da frente de remolhamento [Andréoni, 1975].
- as condições locais do escoamento na zona seca são definidas, no limite inferior da mesma, pelas condições locais do fluido no fim da zona molhada. A influência da retirada de calor na frente de remolhamento é importante somente quando o líquido é localmente subresfriado.
- a vazão mássica de líquido entrando efetivamente no núcleo, depende fortemente da fração de vazio na zona molhada.

A grande maioria dos trabalhos existentes sobre a modelagem da fração de vazio foi realizada nas condições próximas das condições nominais de funcionamento dos reatores a água leve (pres -

surizada ou em ebulição), isto é, no domínio das pressões elevadas (70 a 150 bar), fortes fluxos de calor ( $50$  a  $150 \text{ W.cm}^{-2}$ ) e velocidades elevadas de líquido ( $>1 \text{ ms}^{-1}$ ). Uma necessidade se faz então sentir para melhorar os nossos conhecimentos no domínio das baixas pressões, fracos fluxos de calor e velocidades, os quais constituem as condições de refrigeração de emergência.

O presente trabalho tenta responder a estas necessidades através de um estudo experimental centrado na medida da fração de vazio por difusão neutrônica em uma seção de testes tubular, de diâmetro hidráulico idêntico àquele dos canais de refrigeração dos reatores a água leve pressurizada.

## 2. Critérios de escolha de um método de medida de fração de vazio

A importância da fração de vazio na descrição dos escoamentos bifásicos suscitou um desenvolvimento considerável dos métodos de medida. Nenhuma técnica é universal e a melhor escolha depende de numerosos fatores, dentre os quais podemos destacar principalmente o tipo de fração de vazio que queremos medir, a gama de variação de fração de vazio, os regimes de escoamento associados e as imposições tecnológicas do experimento. Assim sendo, as principais condições as quais devem satisfazer um método susceptível de ser utilizados no nosso problema são as seguintes:

- medida de fração de vazio sobre uma seção reta,
- boa resolução sobre toda a gama de fração de vazio que, levando-se em conta as baixas pressões que caracterizam o remolhamento, varia de 0 a próximo de 1,
- insensibilidade à distribuição radial das fases; os meios bifásicos encontrados abrangem do escoamento a bolhas ao escoamento anular,
- possibilidade de uma seção de testes tubular, de pequeno diâmetro hidráulico ( $D_h \approx 12 \text{ mm}$ , próximo do diâmetro hidráulico de um subcanal de um reator a água pressurizada) ser aquecida diretamente por efeito Joule.

Estas condições impõem a eliminação de numerosos métodos. É o caso por exemplo daqueles que utilizam sondas, sejam elas ópticas ou elétricas. Associado à dificuldade de se determinar valores médios de fração de vazio sobre uma seção a partir de medidas locais, é preciso também considerar o risco de perturbações no escoamento, seja direta

ou indiretamente pelas heterogeneidades do fluxo de calor na parede causadas pela fixação das sondas.

A utilização das radiações X,  $\gamma$  e  $\beta$  permite um acesso direto à fração de vazio médio sobre uma seção e não perturba o escoamento. Todavia a sua aplicação direta torna-se difícil, pois:

- o coeficiente de atenuação da água para os raios X e  $\gamma$  é pequeno, e as paredes metálicas tem um poder de absorção elevado. A resolução do método não pode ser satisfatória para os escoamentos a forte fração de vazio,
- a utilização dos raios  $\beta$  só é possível em canalizações de pequeno diâmetro e de paredes extremamente finas devido ao percurso limitado dos  $\beta$  na matéria.

Por outro lado, os nêutrons interagem fortemente com o hidrogênio da água e são pouco sensíveis as paredes metálicas, tornando-se assim bem mais interessantes. Medidas de fração de vazio usando nêutrons já foram investigadas nas mais diversas formas, a saber: termalização [Jackson et al., 1968] ou moderação e atenuação de nêutrons rápidos [Sha and Bonilla, 1965], atenuação de nêutrons térmicos [Harms et al., 1971; Younis, 1978; Hancox et al., 1972], assim como difusão de nêutrons epitérmicos e rápidos [Rousseau et al. 1976, Banerjee, 1977; Banerjee et al., 1978].

Apesar destes métodos terem sido utilizados em condições bem diferentes daquelas que nos interessa (utilização de absorvedores, canalizações de grande diâmetro), eles nos levam a pensar que soluções existem no tocante

- ao problema da insensibilidade ao regime de escoamento, utilizando-se seja a transmissão, seja a difusão sobre ângulos variados,
- ao problema da boa resolução do método sobre toda a gama de fração de vazio pela escolha adequada da energia dos nêutrons.

Experiências preliminares destinadas a verificar estas possibilidades e definir um método de medida de fração de vazio utilizando nêutrons foram efetuadas.

### 3. Experiências preliminares

Estas experiências foram realizadas no Reator Mélusine de pesquisa do tipo piscina implantado no Centro de Estudos Nucleares de Grenoble-França, onde o dispositivo experimental é mostrado na figura 1.

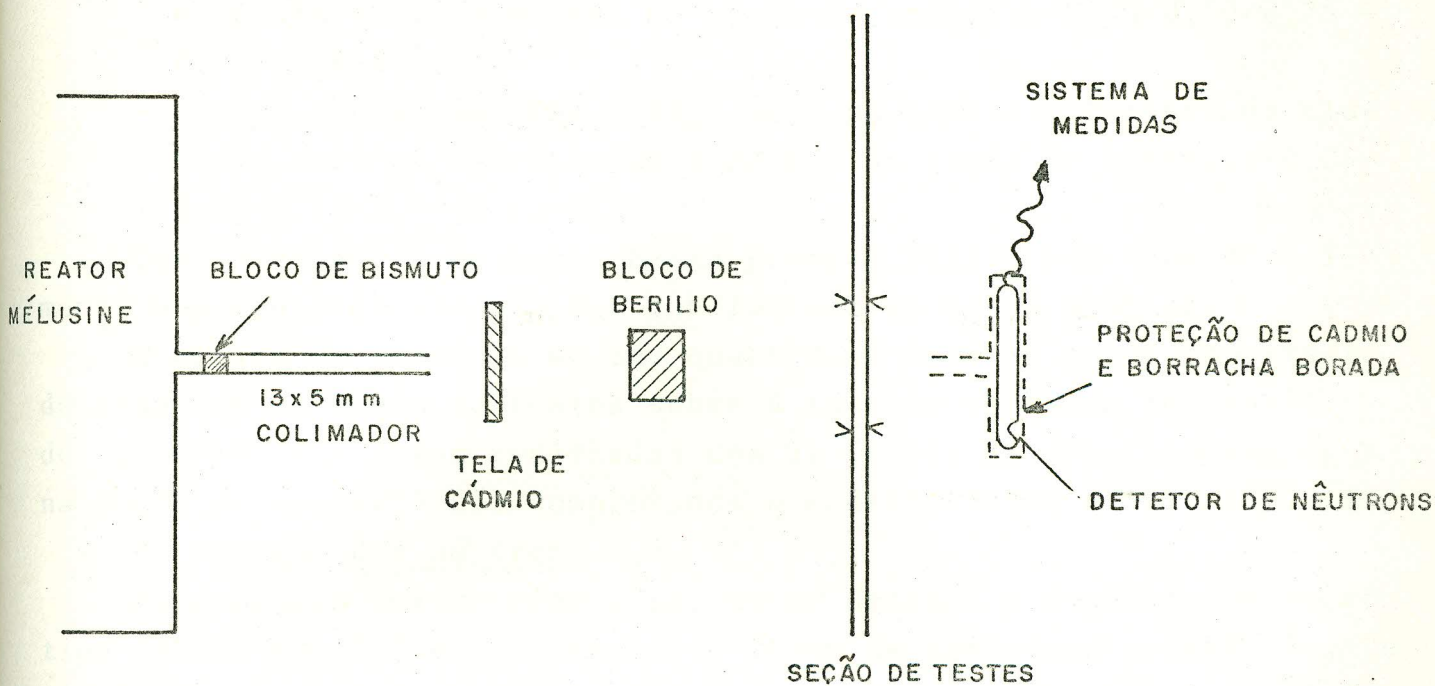


Fig.1 - Esquema da Montagem Experimental para a Medida de Fração de Vazio.

a) Fonte de nêutrons

A tomada do feixe de nêutrons é efetuada na saída do núcleo, depois de atravessar um tanque de água pesada. O feixe de nêutrons é direcionado por um colimador retangular (13mm de largura, 5 ou 1,8 mm de altura) no interior do qual está colocado um filtro de bismuto (80mm de comprimento) para eliminar os raios  $\gamma$ . O espectro de nêutrons é essencialmente térmico e o seu fluxo na saída do colimador é de  $4 \times 10^7 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

A interposição de um bloco de berílio no feixe nos possibilita obter nêutrons frios ( $E_n \leq 0,005 \text{ eV}$ ). Neutrons epitérmicos ( $0,5 < E_n < 1000 \text{ eV}$ ) são obtidos colocando-se na saída do colimador uma tela de cádmio de 0,5mm de espessura.

b) Seção de Testes

O feixe de nêutrons é dirigido perpendicularmente à seção de testes, que foi centrado no feixe por neutrografia. A seção de testes é constituída de um tubo em inonel de diâmetro 12x14mm não aquecida.

A fração de vazio foi simulada por formas em alumínio (material transparente aos neutrons), de pequena espessura (0,5mm) para duas configurações diferentes de escoamento :

- regime anular (RA): ar no centro, interface de alumínio e água em contato com a parede da seção de testes.  $\alpha=0,25-0,50-0,75-0,80-0,90-0,93$ .
- regime anular inverso (RAI): água no centro, interface de alumínio e ar em contato com a parede da seção de testes.  $\alpha=0,25-0,50-0,75-0,80-0,85-0,90$ .

Como o regime a bolhas a baixa pressão existe sobre um comprimento bem reduzido, ele não foi considerado em nossa análise.

O efeito da presença de uma quantidade mais ou menos importante de alumínio na seção de testes sobre a taxa de contagem foi verificado. Experiências foram realizadas com as formas de alumínio sem água na seção de testes e nós comprovamos que este efeito é inferior a 1%.

### c) Deteção dos nêutrons

As contagem foram efetuadas com um detetor a depósito de boro tipo CPNB20 de 25,5mm de diâmetro e 284mm de comprimento útil. O detetor é conectado a um sistema eletrônico SAITB constituído essencialmente de um amplificador e de um filtro que elimina os sinais devido ao ruído de fundo e aos raios X e  $\gamma$ , permitindo assim obter um sinal proporcional ao número de nêutrons contados. O detetor é protegido dos nêutrons parasitas por folhas de cádmio e borracha borada.

Segundo a posição do detetor de nêutrons em relação a seção de testes, dois métodos de medida de fração de vazio são possíveis, como mostra a figura 2.

- transmissão de nêutrons:  $\theta = 90^\circ$
- difusão de nêutrons:  $\theta \neq 90^\circ$

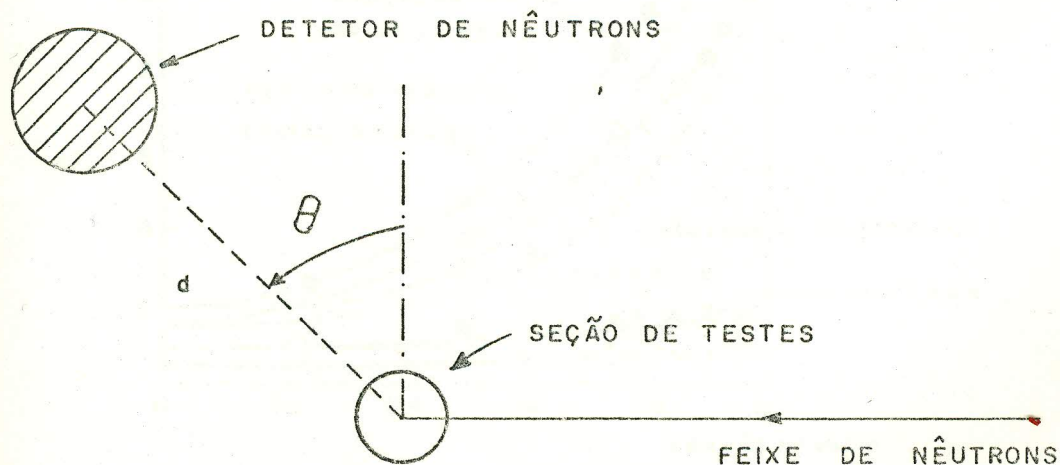


Fig.2 - Princípio dos Métodos de Medida por Transmissão e Difusão de Nêutrons.

No método de difusão de nêutrons, a distância  $d$  e o ângulo  $\theta$  entre a seção de testes e o detetor, resultam de um compromisso em obtermos taxas de contagem e contrastes satisfatórios.

Para todas essas experiências preliminares, a água estava a temperatura ambiente ( $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ) e a taxa de contagem foi acumulada durante 100 segundos.

### 3.1 Resultado das medidas por transmissão

A figura 3 apresenta os resultados obtidos com os três espectros de nêutrons. As seguintes observações podem ser feitas:

- nêutrons frios e térmicos: apresentam um bom contraste (o contraste é definido como razão entre a taxa de contagem para a seção de testes vazia e cheia de água), da ordem de 9,5 e 7 respectivamente, mas o método é sensível a repartição radial das fases. Para os nêutrons frios  $\Delta\alpha/\alpha < 0,22$  e para os nêutrons térmicos  $\Delta\alpha/\alpha < 0,15$ . A resposta ao RAI é mais importante do que para o RA, uma vez que uma parte do feixe atravessa a seção de testes sem encontrar água.
- nêutrons epitérmicos: o contraste é fraco (1,8 a 2) devido aos nêutrons apresentarem uma energia elevada, não chegando portanto a serem absorvidos (a absorção necessita de uma termalização prévia) na seção de testes. Eles são poucos sensíveis a repartição radial de fases  $\Delta\alpha/\alpha < 0,04$ .

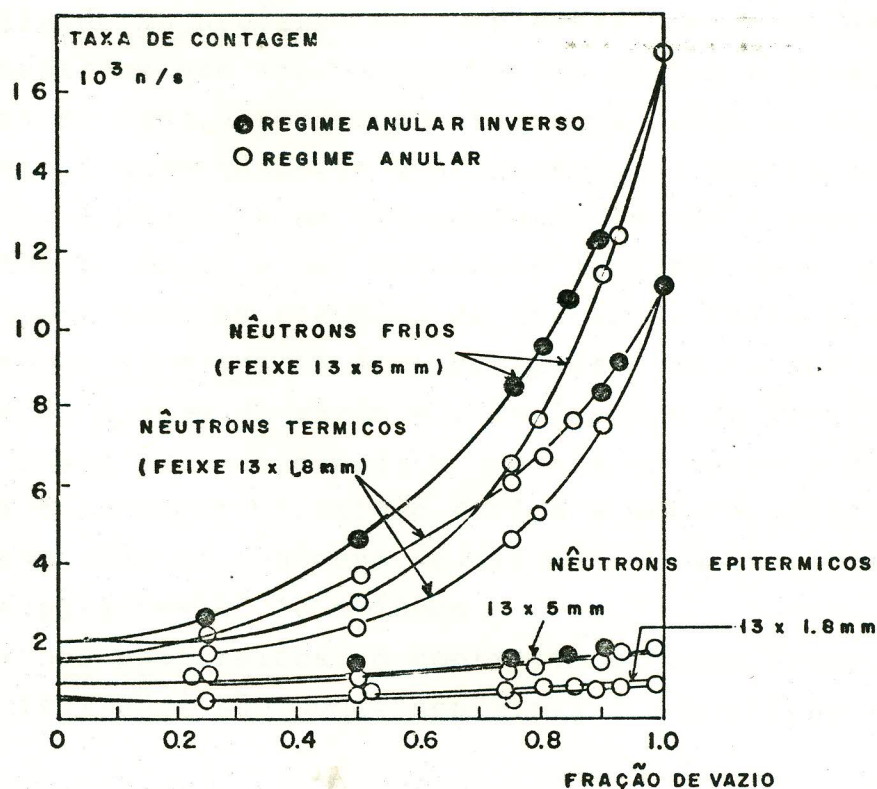


Fig.3 - Medida de Fração de Vazio por Transmissão. Nêutrons Frios, Térmicos e Epitérmicos.

Deste modo, o método de transmissão de nêutrons não parece ser apropriado para a determinação da fração de vazio global. Riegel (1978), Yuen (1978), Frazzoli e Magrini (1979) chegaram a mesma conclusão, fazendo experiências, com seções de testes de diâmetros diferentes (25 a 100mm).

### 3.2 Resultado das medidas por difusão

Nesta campanha de medidas, nos comparamos a resposta do detector de nêutrons para diferentes posições em relação a seção de testes e confirmamos que o contraste é uma função do ângulo  $\theta$  (em difusão, o contraste é o quociente entre as taxas de contagem para a seção de testes cheia d'água e a seção de testes vazia). Quando nós variamos a distância  $d$  entre o detector e a seção de testes, a taxa de contagem é modificada mas a sensibilidade a fração de vazio é praticamente inalterada.

Contrariamente ao método de transmissão, a resposta ao RA é mais forte do que para o RAI, uma vez que o feixe encontra sempre água quando atravessa a seção de testes. As figuras 4 e 5 apresentam os resultados obtidos e as seguintes observações podem ser feitas para cada energia dos nêutrons:

- nêutrons frios: a resposta ao RA não é monôtona para  $\theta=30^\circ$ . Isto é devido ao fato do processo de difusão ser estreitamente ligado ao processo de transmissão em um meio hidrogenado e os nêutrons que são difundidos não chegam a atravessar a barreira de água, provocando assim uma baixa na taxa de contagem quando a quantidade de água na seção de testes torna-se importante. A resposta em retrodifusão ( $\theta=-30^\circ$ ) apresenta um bom contraste (6,5) e uma excelente sensibilidade, principalmente para valores elevados de fração de vazio ( $\alpha > 80\%$ )
- nêutrons térmicos: a sensibilidade é muito boa sobre toda a gama de fração de vazio e a influência da repartição radial das fases diminui a medida que nós variamos o detector de  $\theta$  positivo a  $\theta$  negativo. Isto é devido a menor participação da transmissão no fenômeno de difusão. O melhor resultado obtido é para  $\theta=-30^\circ$  e  $d=100\text{mm}$ .
- nêutrons epitérmicos: o contraste é muito fraco (1,18), mas os resultados são pouco sensíveis a repartição radial das fases.

### 3.3 Conclusão das experiências preliminares

Os resultados obtidos nesta campanha preliminar, cujos aspec

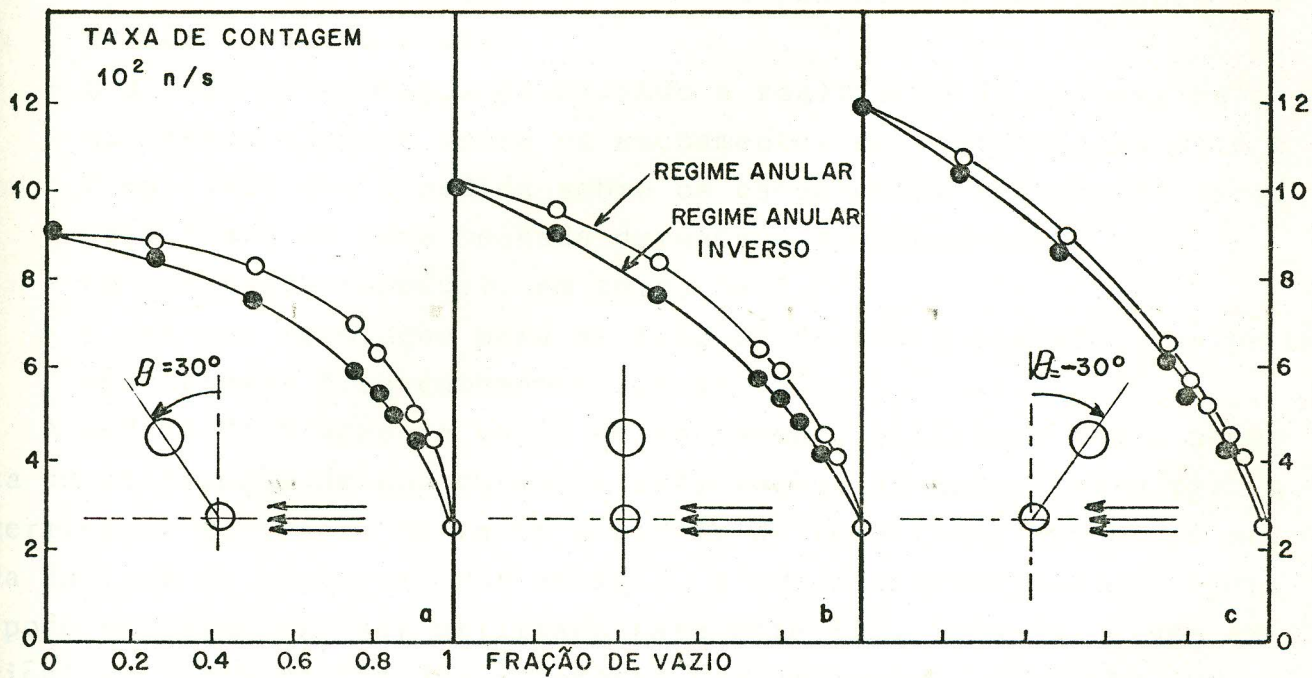


Fig.4 - Difusão de Nêutrons Têrmicos

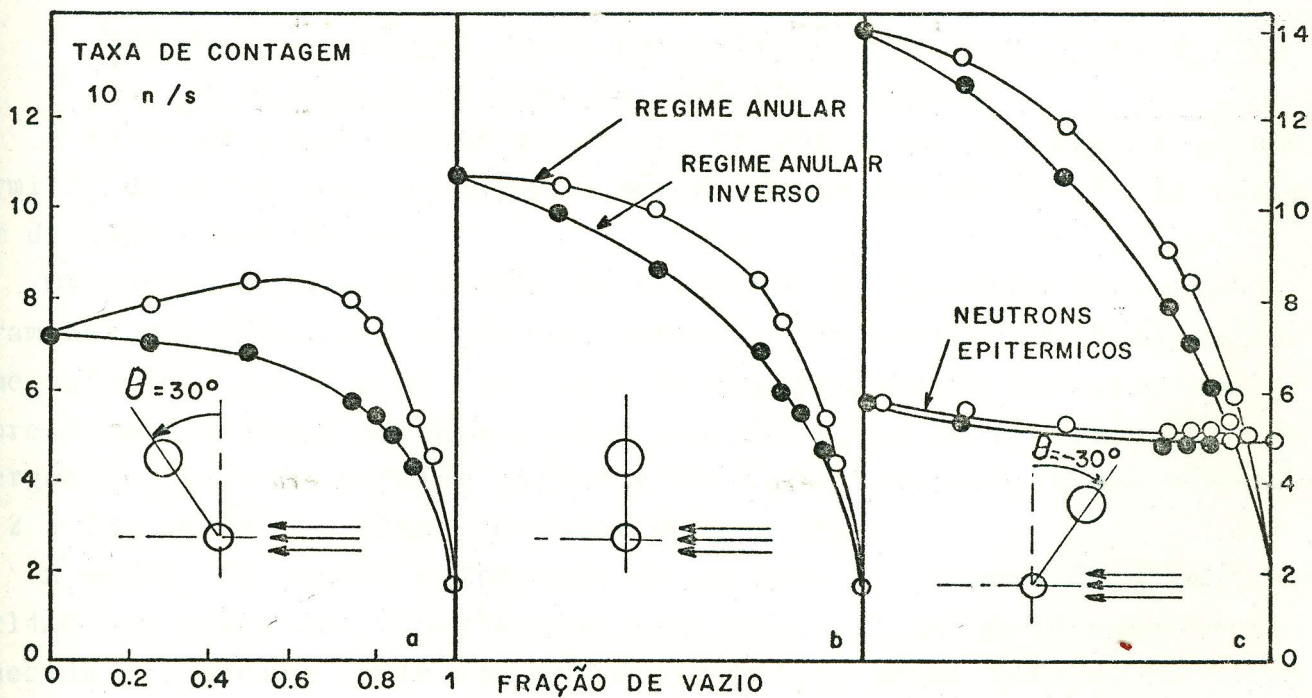


Fig.5 - Difusão de Nêutrons Frios e Epitérmicos

tos essenciais estão resumidos na tabela 1, mostram que o método utilizando a retrodifusão ( $\theta=30^\circ$ ) de nêutrons térmicos é o melhor adaptado ao nosso problema. Ele se caracteriza principalmente por:

- um efeito limitado da distribuição radial das fases sobre a fração de vazio medida.
- uma taxa de contagem permitindo a realização de medidas relativamente rápidas sobre os escoamentos em regime permanente e compatível com a medida sobre os escoamentos lentamente variáveis (caso da zona molhada durante o remolhamento),
- um contraste razoável, em torno de 4.
- e uma boa resolução para as frações de vazio elevadas, as quais nós teremos frequentemente acesso.

A medida de fração de vazio em escoamento bifásicos reais necessita da utilização de uma curva de calibração, de modo a permitir a determinação da fração de vazio a partir de resultados brutos de medida da taxa de contagem. Por exemplo, a curva apresentada na figura 4c pode em princípio ser utilizada para este fim. Todavia, essas experiências foram realizadas a temperatura ambiente, enquanto que a temperatura da água nos escoamentos reais pode atingir valores de ordem de  $160^\circ\text{C}$ . O efeito sobre a taxa de contagem deste parâmetro suplementar será quantificado na instalação real, realizada para permitir a medida da fração de vazio nos escoamentos encontrados na zona molhada quando do remolhamento.

#### 4. Medida de fração de vazio nas condições de remolhamento através do método de difusão de nêutrons térmicos

A série de experiências preliminares descritas na Seção 3 nos permitiu de selecionar e ajustar o método de medida de fração de vazio por difusão neutrônica.

Os perfis axiais de fração de vazio nos escoamentos água-vapor foram determinados numa seção de testes inteiramente remolhada em regime estacionário. A gama de variação dos parâmetros investigados é representativa daqueles encontrados nas condições de refrigeração de emergência, isto é, pressão variando de 1 a 6 bar, velocidade mássica de 2 a  $15\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  e fluxo de calor de 1 a  $6\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

A seção de testes é composta de um tubo em inconel de diâmetros  $12\times 14\text{mm}$  (a mesma das experiências preliminares) de 2m de comprimento aquecida por efeito Joule com uma distribuição axial informe de potência. Esta seção de testes faz parte do circuito experimental DADINE (Détermination d'Alpha par Diffusion Neutronique) que se desloca em toda a sua extensão na frente do feixe de nêutrons colimado por meio de um macaco hidráulico.

Nêutrons	Método de medida feixe (mm)	Taxa de contagem (c/s)		Contraste		Efeito da Distribuição Radial de Fração de Vazio			
		$\alpha=1,0$	$\alpha=0,0$	global $\alpha=0,0$ $\alpha=1,0$	médio $\alpha=0,8$ $\alpha=1,0$	$\alpha=0,2$	$\alpha=0,4$	$\alpha=0,6$	$\alpha=0,8$
	Transmissão(13x5)	17090	1920	8,9	2	0,218	0,19	0,125	0,065
Frios	Difusão (13x5) $\theta = \left[ \begin{array}{l} 30^\circ \\ 0^\circ \\ -30^\circ \end{array} \right.$	18	75	4,2	3,5	0,62	0,43	0,26	0,1
		17	108	6,3	3,8	0,25	0,25	0,168	0,07
		22	143	6,5	3,7	0,11	0,145	0,118	0,065
Térmicos	Transmissão(13x5) $\theta = \left[ \begin{array}{l} 30^\circ \\ 0^\circ \\ -30^\circ \end{array} \right.$	249	898	3,6	2,3	0,218	0,235	0,145	0,065
		249	1012	4	2,2	0,125	0,1	0,082	0,047
		270	1190	4,4	2,2	0,04	0,04	0,021	0,017
Epitérmi- COS	Transmissão(13x1,8) (13x5)	862	467	1,85	1,16	0,057	0,04	0,035	0,027
		1780	872	2	1,2	0,042	0,04	0,035	0,023
	Difusão (13x5) $\theta = -30^\circ$	49	58	1,18	1,02	0,06	0,077	0,078	0,06

Tabela 1 - Experiências preliminares: Taxa de contagem, contraste e efeito da distribuição radial de fração de vazio.

#### 4.1 Efeito da temperatura de água sobre a taxa de contagem

A quantificação do efeito da variação da temperatura da água sobre a taxa de contagem é necessária quando da obtenção da curva de calibração utilizada em escoamento bifásico. Na experiência DADINE, a temperatura da água varia entre 20 e 160°C implicando numa diminuição relativa da massa volumétrica de 10%.

Para estudar experimentalmente esta influência, experiências suplementares foram realizadas com nêutrons frios e térmicos, onde a fração de vazio foi simulada com formas em alumínio para diferentes temperatura da água (20 a 160°C). Os resultados são apresentados na figura 6, onde para todos os pontos experimentais obtidos foram subtraídos a taxa de contagem devido a difusão dos nêutrons na seção de testes vazia ( $\alpha=1$ ).

Nós podemos notar da figura 6 uma diminuição da taxa de contagem para uma dada fração de vazio quando a temperatura varia na gama estudada; para os nêutrons térmicos esta variação é de aproximadamente 20%. Nós observamos também que a diminuição da taxa de contagem a uma dada temperatura é menos sensível para valores de fração de vazio elevados, uma vez que a superfície da água "vista" pelos nêutrons é menor, reduzindo assim a interação.

A diminuição da massa volumétrica da água não é suficiente para explicar as diferenças observadas sobre a taxa de contagem que é certamente influenciada por um efeito de velocidade dos nêutrons.

Na realidade, quando os nêutrons interagem com os núcleos de hidrogênio, eles podem ser acelerados e este efeito será tanto maior quanto a temperatura do meio é mais elevada. A seção de choque de absorção do boro 10 que compõe o detetor é inversamente proporcional a velocidade dos nêutrons e uma baixa de contagem é então registrada, a diminuição da taxa de absorção sobre o boro 10 para uma temperatura da água variando de 20 a 160°C é de aproximadamente 10% [Musso, 1980].

Em razão disto, é evidente que deve ser levado em conta para a determinação da curva de calibração, o efeito global da temperatura da água sobre a taxa de contagem. A omissão deste efeito acarretaria erros consideráveis na fração de vazio quando da análise das experiências reais.

A curva de calibração para os nêutrons térmicos levando em conta o efeito da temperatura da água é apresentada na figura 7 sob a forma da taxa de contagem normalizada definida por:

$$R(\alpha, T) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N(\alpha, T) - N(\alpha=1)}{N(\alpha=0, T) - N(\alpha=1)} \quad (1)$$

onde  $N(\alpha, T)$  é a taxa de contagem para a fração de vazio à temperatura  $T$ ,  $N(\alpha=1)$  é a taxa de contagem para a fração de vazio igual a 1 (seção de testes vazia),  $N(\alpha=0, T)$  é a taxa de contagem para a fração de vazio igual a 0 (seção de testes cheia de água).

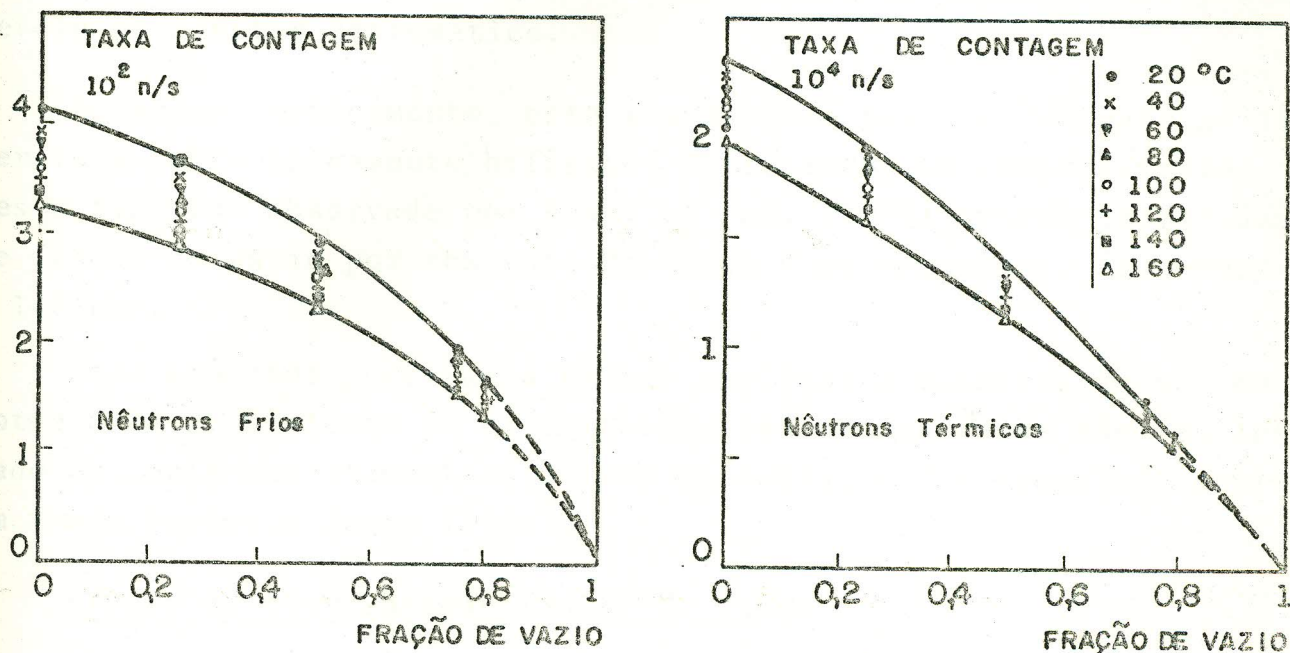


Fig.6 - Efeito de Temperatura da Água Sobre a Taxa de Contagem.

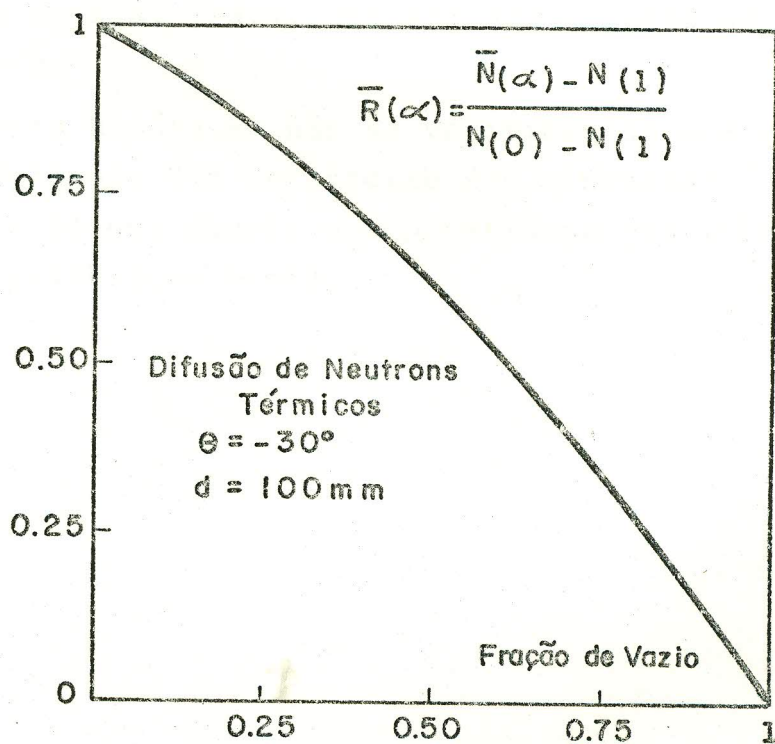


Fig.7 - Curva de Calibração para os Nêutrons Térmicos

Sobre este último ponto observamos a uma distância mais ou menos afastada da zona a forte gradiente axial de vazio, um decréscimo de  $\alpha$  a  $z$  crescente. Este efeito inexplicável, é mais ou menos pronunciado segundo a variação dos parâmetros da experiência, porém revela um caráter sistemático.

Ao nosso conhecimento, este resultado é pouco encontrado na literatura sobre escoamento bifásico. Entretanto, um comportamento deste tipo foi observado por Roumy et al. (1979) quando de medidas de fração de vazio por absorção de raios  $\gamma$  em escoamento água-vapor a 140 bar.

Dois aspectos poderiam a priori explicar a natureza da não monotonia de  $\alpha$ : o efeito da distribuição radial das fases não foi levado em conta corretamente e a taxa de contagem foi acumulada sobre um tempo bastante longo (100s).

#### Efeito de distribuição radial de fases

Num escoamento real, taxas de contagem diferentes podem ser associadas a um único valor de fração de vazio, sendo isto possível devido ao fato de termos distribuição radiais de fases diferentes. O decréscimo de  $\alpha$  observado poderia em princípio ser explicado por uma evolução da estrutura do escoamento não levado em conta quando da obtenção de  $R(\alpha, T_{sat})$ , uma vez que a curva de calibração normalizada é única.

Todavia esta hipótese não se verificou do ponto de vista quantitativo. A amplitude dos decréscimo dos  $\alpha$  medidos é na maioria dos casos maior do que aquela que poderia se justificar a partir das curvas de calibração bruta.

#### 4.2 Medidas de fração de vazio em escoamento bifásico

Mais de 60 perfis axiais de fração de vazio foram determinados na experiência DADINE [Freitas, 1981]. É evidente que não temos espaço suficiente para apresentar todos os resultados obtidos, todavia alguns exemplos são mostrados na figura 8 onde podemos notar o seguinte:

- a forma do perfil axial de fração de vazio é característico de sistemas a baixa pressão com uma evolução muito rápida da fração de vazio para valores elevados ( $\alpha > 0,80$ ), imediatamente após o início da ebulição,
- a cota onde foi detectada a aparição do vapor com os nêutrons térmicos é próxima daquela, calculada fazendo-se a hipótese do balanço térmico.
- a distribuição axial da fração de vazio na zona "plana" do perfil não é monótona.

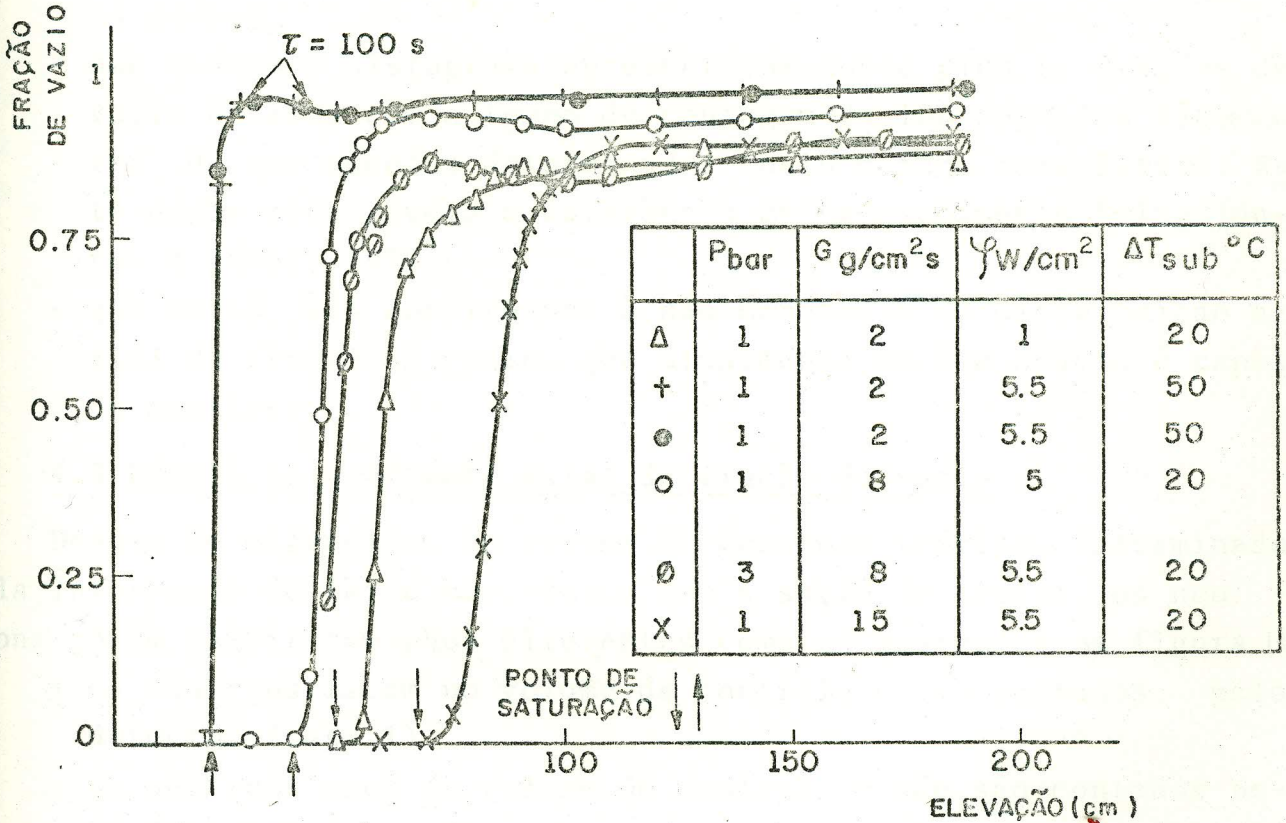


Fig. 8 - Distribuição Axial de Fração de Vazio Obtida na Experiência DADINE.

### Efeito do modo de contagem

Como a resposta da aparelhagem de medidas não é linear, o cálculo do valor médio da fração de vazio nos escoamentos flutuantes ("slug, por exemplo) deve ser feito através de um método estatístico que consiste em se fazer medidas sobre um intervalo de tempo curto perante ao período dominante das flutuações de fração de vazio e a estabelecer os histogramas correspondentes que darão acesso a média estatística de  $\alpha$ . Harms e Forrest (1971) e Hancox et al (1972) analisaram este problema e confirmaram seus resultados pela experiência no caso da medida de fração de vazio por transmissão de nêutrons.

Experiências complementares foram realizadas empregando esta técnica onde para cada ponto de medida, 1100 contagens foram efetuadas durante um tempo de 60ms. Os resultados são apresentados na figura 9 e podemos verificar:

- que os  $\alpha$  obtidos com esta técnica de contagem não podem ser consideradas significativamente diferentes daqueles obtidos com um tempo de contagem de 100 segundos.
- que quando o histograma apresenta um único pico, os valores medidos de fração de vazio pelas duas técnicas de contagem são os mesmos,
- que quando o histograma apresenta um duplo pico, as frações de vazio obtidas com a tempo de contagem de 100 segundos são maiores do que aquelas determinados pelo método estatístico. Este duplo pico revela a existência de um escoamento "slug" [Jones e Zuber, 1975],
- que enfim nós confirmamos a não monotonia da distribuição axial da fração de vazio, que atualmente nenhum modelo é capaz de analisar.

### 4.3 Efeito de gradiente axial de fração de vazio

Depois de difundidos no volume de controle teórico, determinado pela interseção do feixe neutrônico com a seção de testes, os nêutrons podem seguir caminhos diferentes como os mostrados na figura 10

- os nêutrons ficam no volume de controle e são contados pelo detector (caso 1),
- os nêutrons saem do volume de controle e não são contados pelo detector (caso 2),
- os nêutrons saem do volume de controle, sofrem novos choques e retornam ao detector (caso 3).

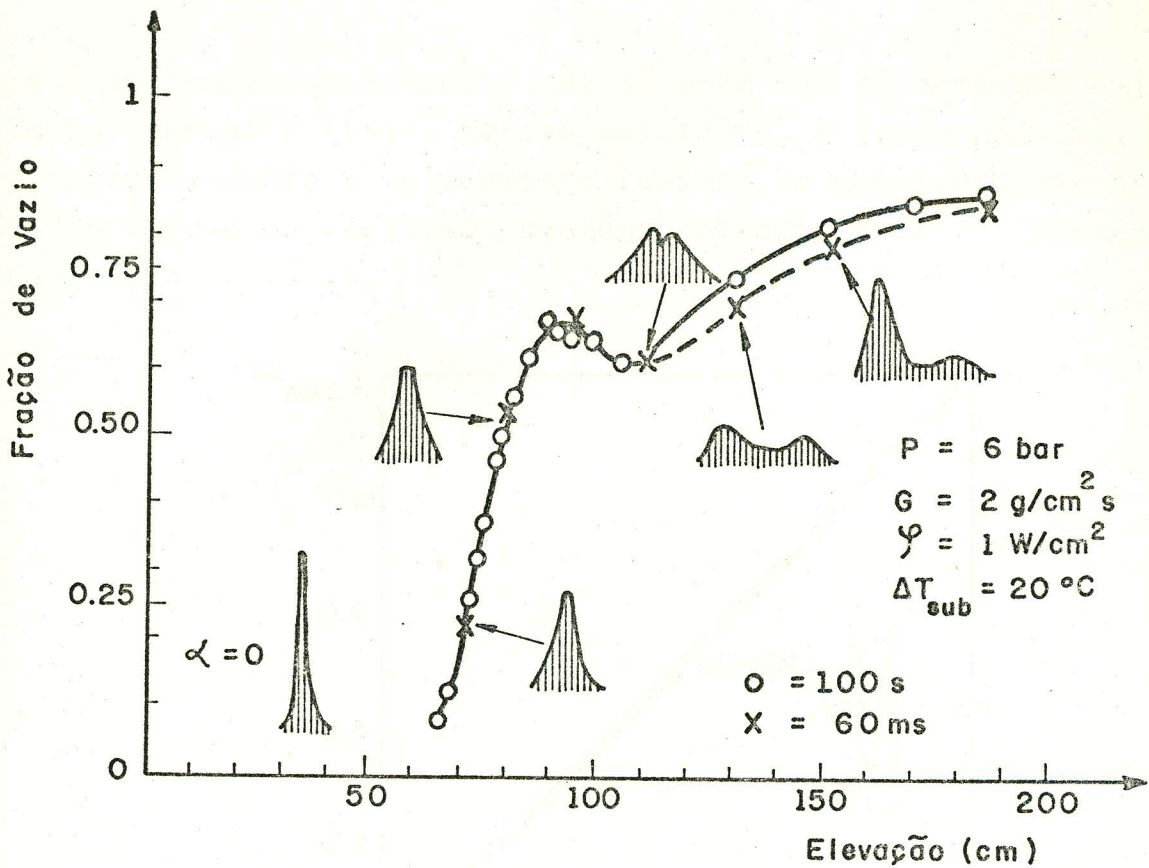


Fig.9 - Distribuição Axial de Fração de Vazio Associada aos Histogramas de Taxa de Contagem.

Para estimar a importância deste fenômeno, experiências foram realizadas com um cone de alumínio cheio de ar simulando gradientes axiais de fração de vazio  $d\alpha/dz$  variando até  $0,1 \text{ cm}^{-1}$ , isto é, variações de  $\alpha$  de 0 a 1 em 10cm)

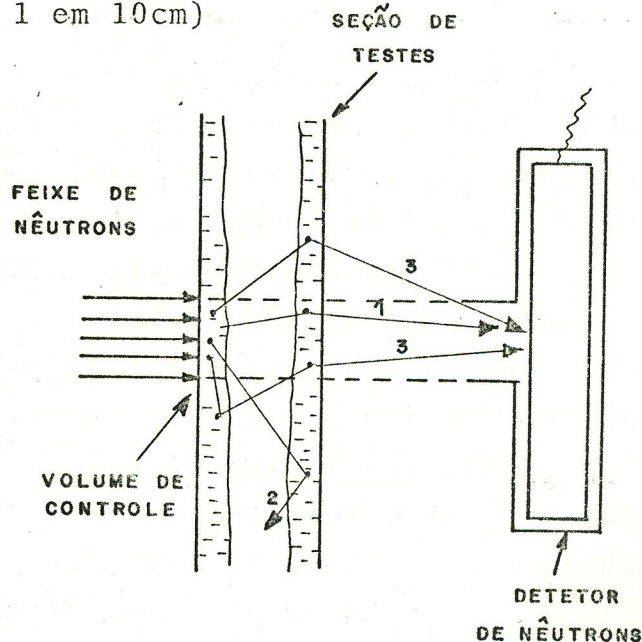


Fig.10 - Trajetória Seguida Pelos Nêutrons Depois de Difundidos no Volume de Controle.

A figura 11 mostra que a fração de vazio medida difere muito pouco da fração de vazio real, onde o erro encontrado é da ordem de 2%. Este resultado está ligado ao pequeno diâmetro da seção de tes-

tes e à colimação do detector que só pode ver os nêutrons cujo ângulo de incidência é fraco. Nestas condições, e tendo em vista que o erro correspondente em escoamento real só se manifesta nas proximidades do início da ebulição, nenhuma correção é feita para o cálculo da fração de vazio.

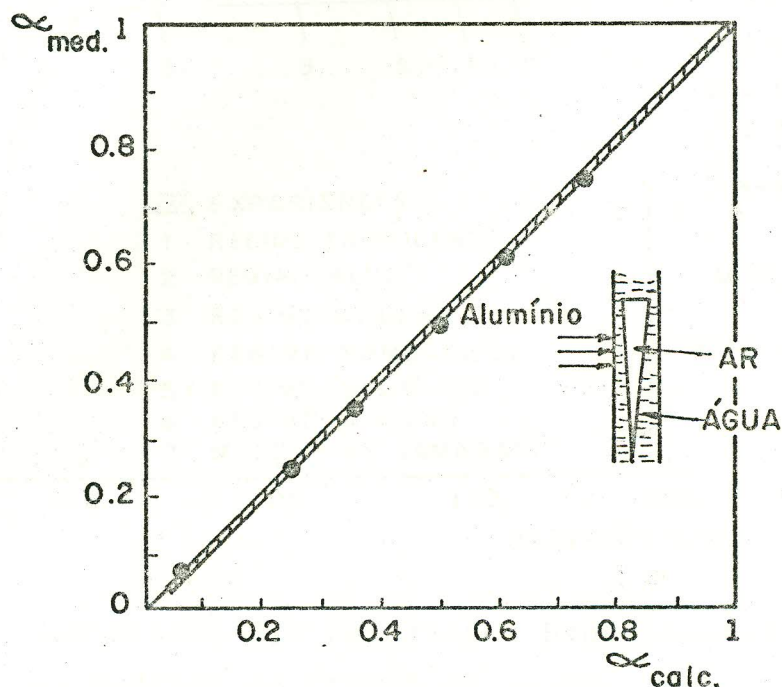


Fig.11 - Efeito do Gradiente Axial de Fração de Vazio

### 5 Comparação entre os resultados experimentais e os modelos de fração de vazio

As figuras 12 e 13 ilustram a tendência geral dos resultados obtidos nesta comparação e as seguintes observações podem ser feitas:

- (i) o modelo homogêneo superestima sistematicamente a fração de vazio, uma vez que a velocidade relativa entre as fases nas condições de remolhamento é significativa.
- (ii) ao contrário, o modelo "Drift Flux" [Zuber, Staub e Bijwaard-1966] fornece valores de fração de vazio sempre inferiores aos resultados experimentais obtidos.
- (iii) um progresso significativo é obtido quando aplicamos ao modelo "Drift Flux", o parâmetro de distribuição proposto por Dix (1971) e a velocidade de deriva ponderada do escoamento "slug".
- (iv) valores de fração de vazio bem próximo dos resultados experimentais são obtidos com o modelo de Yamazaki e Yamaguchi (1976) que utiliza uma lei de deslizamento independente do regime de escoamento.

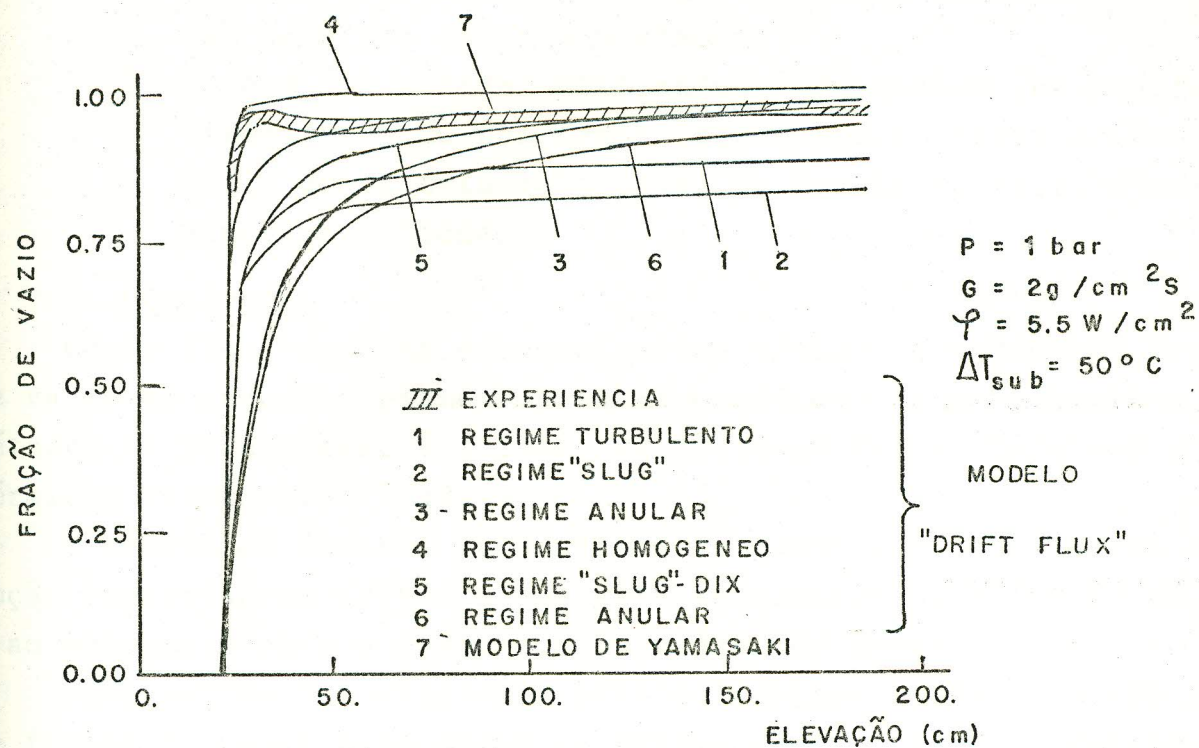


Fig.12 - Comparação dos Resultados Experimentais com os Modelos de Fração de Vazio.

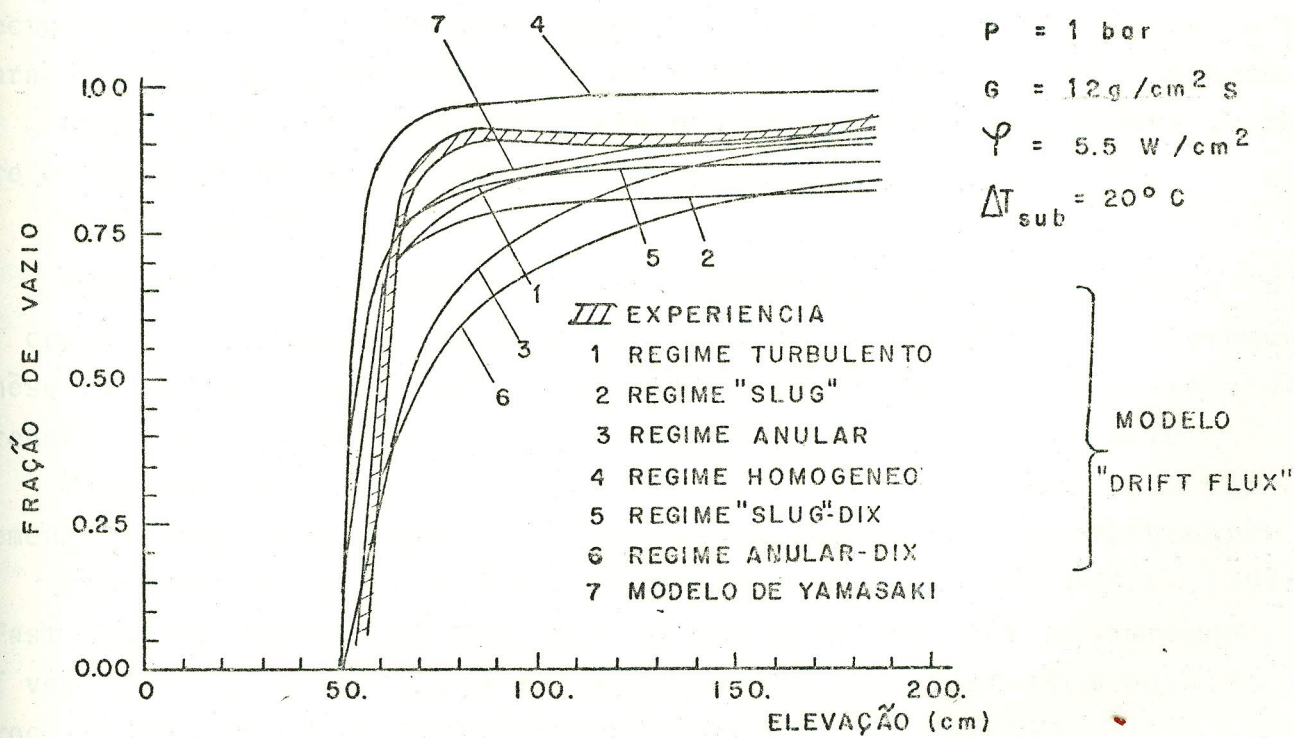


Fig.12 - Comparação dos Resultados Experimentais com os Modelos de Fração de Vazio.

- (v) o ponto de geração franca de vapor calculado pelo modelo de Saha e Zuber (1974) é próximo do início de ebulição detetado experimentalmente.
- (vi) nenhum dos métodos utilizados, nem nenhum dos modelos da literatura que nos temos conhecimento, preve a não monótonia de distribuição axial de fração de vazio observada experimentalmente.

## 6 Conclusões

Com a finalidade de desenvolver um método de medida de fração de vazio em pequenos diâmetros sobre condições de remolhamento, os métodos de transmissão e difusão de nêutrons frios, térmicos e epitérmicos foram investigados.

O método de difusão de nêutrons térmicos foi considerado uma solução interessante devido a sua alta sensibilidade à fração de vazio e ao pequeno efeito à distribuição radial de fases.

Este método foi utilizado para determinar a distribuição axial de fração de vazio numa seção de testes com aquecimento direto, de diâmetro hidráulico igual àquele de um subcanal de reator, nas condições de pressão, velocidade mássica e fluxo de calor representativas das condições possíveis de um reator acidentado. Estas experiências foram realizadas no dispositivo experimental DADINE onde alguns aspectos importantes foram analisados, tais como os efeitos de temperatura da água, do gradiente axial de vazios e da técnica de contagem.

Resultados típicos foram apresentados assim como a comparação entre os modelos de vazio e os dados experimentais obtidos.

## 7 Bibliografia

ANDREONI, D., (1975), "Echanges thermiques lors de renoyage d'un coeur de réacteur à eau dans le cadre de "l'accident de référence" Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Scientifique et Médicale de Grenoble/Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble

BANERJEE, S., (1977) "Radiation methods for two phase flow measurements". USNRC two phase instrumentation review meeting-Washington.

BANERJEE, S., CHAN, A.M.C., RAMANATHAN, N. and YUEN, P.S.L., (1978), "Fast neutron scattering and attenuation technique for measurements of void fractions and phase distribution in transient flow boiling". Proc. sixth. Int. Heat Transfer Conf. Toronto, 1, 351-355.

DERUAZ, R. and PETITPAIN, B., (1976), "Modeling of heat transfer by radiation during the reflooding phase of a LWR". Specialist's meeting on the behaviour of water reactor fuel elements under accidents conditions. Norway.

DIX, G.E., (1971), "Vapor void fractions for forced convection with subcooled boiling at low flow rates". Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley

FRAZZOLI, F.V. and MAGRINI, A., (1979) "Neutron gauge for measurement of high void fraction in water-steam mixtures". Nuclear Technology, 45, 177-182

FREITAS, R.L., (1981), "Hydrodynamique des écoulements eau-vapeur dans la zone remouillée d'un tube chauffant en renouveau". Thèse de Docteur Ingénieur, Université Scientifique et Médicale de Grenoble/Institut National Polytechnique de Grenoble/Grenoble.

HANCOX, W.T., FORREST, C.F. and HARMS, A.A., (1972), "Void determination in two-phase system employing neutron transmission". ASME 72 - HT-2, 1-5.

HARMS, A.A. and FORREST, C.F., (1971), "Dynamic effects in radiation diagnosis of fluctuating voids". Nuclear Science and Engineering, 46, 408-413

HARMS, A.A., LO, S. and HANCOX, W.T., (1971), "Measurement of time averaged voids by neutron diagnosis". J. of Applied Physics, 42, n°10, 4080-4082.

JACKSON, C.N., ALLEMAN, R.T. and SHEAR, W.G., (1968), "Neutron densitometer for measuring void fraction in steam-water flow". ANS Transactions, 11, n°1.

JONES, O.C. and ZUBER, N., (1975), "The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two phase flow". Int. J. Multiphase Flow. 22, 273-306.

MUSSO, J.F., (1980), "Correction de l'effet de température sur les mesures de taux de vide du dispositif DADINE". Note physique n°318, Pi/Phys. 7048/183/80-CENG-Grenoble.

RIEGEL, B., (1978) "Contribution à l'étude de la décompression d'une capacité en régime diphasique". Thèse de Docteur Ingénieur USMG-INPG, Grenoble.

ROUMY, R., MAYET, G. et ROSIN, L., (1979), "Mesure de la fraction de vide, par atténuation de rayonnement gamma dans le cas d'un écoulement eau vapeur à haute pression, dans un canal rectangulaire d'entrefer 6mm". CENG/STT-Note T.T. n°617-France.

ROUSSEAU, J.C., CZERNY, J. and RIEGEL, B., (1976), "Void fraction measurements during blowdown by neutron absorption or scattering methods". OECD/NEA, Specialist meeting on transient two phase flow, TORONTO.

SAHA, P. and ZUBER, N., (1974), "Point of net vapor generation and vapor void fraction in subcooled boiling". Heat transfer 1974, Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf. Tokyo, 4, paper B4.7, 175-179.

SHA, W.T., and BONILLA, C.F., (1965), "Out-of-pile steam-fraction determination by neutron-beam attenuation". Nuclear Applications, 1, 69-75.

YAMAZAKI, Y. and YAMAGUCHI, K., (1976), "Void fraction correlation for boiling and non-boiling vertical two-phase flows in tube". J. of Nuclear Science and Technology, 13, 701-707.

YOUNIS, M.H., (1978), "Void disturbances in two phase flow systems". Ph.D. Thesis, McMaster University.

YUEN, P.S.L., (1978), "Fast neutron scattering and attenuation technique for measurement of void fraction and phase distribution in transient flow boiling". M.Eng. Thesis, McMaster University, Canada.

ZUBER, N., STAUB, F.W. and BIJWAARD, G., (1966), "Vapor void fraction in subcooled boiling and in saturated boiling systems". Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf., Chicago, 5, paper n°154, 24-38.