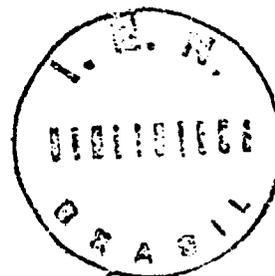


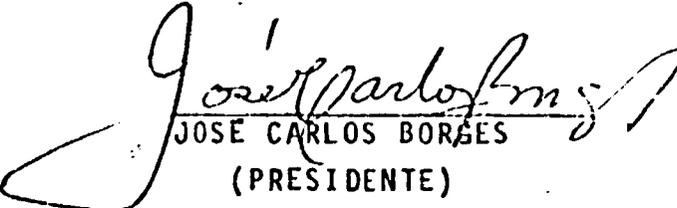
MEDIDAS DE FRAÇÃO DE VAZIO EM ESCOAMENTOS
BIFÁSICOS POR TRANSMISSÃO E DIFUSÃO DE NÊUTRONS

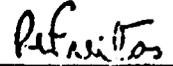
Mauro Carlos Lopes Souza



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 CIÊNCIAS (M. Sc.)

Aprovada por:


JOSE CARLOS BORGES
(PRESIDENTE)


ROBERTO LONGO FREITAS


ANTONIO CARLOS GONÇALVES

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 1984

SOUZA, MAURO CARLOS LOPES

Medidas de Fração de Vazio em Escoamentos Bifásicos por Transmissão e Difusão de Nêutrons
IX, 115p. 27,7 cm (COPPE-UFRJ, M.Sc, Engenharia Nuclear, 1984)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Engenharia de Reatores Aplicada I.COPPE/
UFRJ II. Título (série)



A Maria Ines,
Erica e Igor

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

A todos os professores do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE e em especial aos professores José Carlos Borges e John Douglas Rogers, pela orientação, sugestões e interesse com que sempre acompanharam o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto de Engenharia Nuclear/CNEN na pessoa de seu Diretor Dr. Alcyr Maurício e em especial ao Professor Luiz Osório de Brito Aghina, Diretor do Departamento de Reatores do IEN, pelo interesse, sugestões e apoio total, sem o qual esse trabalho não teria provavelmente dado seus primeiros passos e ao Dr. Antonio Carlos Gonçalves do DERE/IEN pelo apoio. Ao Sr. Aldo Boretti Filho, Chefe da Divisão de Oficina do IEN, ao Sr. Luiz Alves Borges do Setor de Soldas, pelo apoio. Ao pessoal do Serviço de Proteção Radiológica do IEN pela monitoração de doses no laboratório de medidas.

Aos professores Roberto Longo Freitas e Raad Y. Qassim que também muito me auxiliaram e apoiaram.

Ao Engenheiro Cezar Antonio Caggiano dos Santos e to dos os colegas do Laboratório de Instrumentação Nuclear da COPPE pelo apoio.

Ao estagiário Joubert Fagundes Maia do IEN pelo auxílio na confecção dos modelos de lucite.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

MEDIDAS DE FRAÇÃO DE VAZIO EM ESCOAMENTOS
BIFÁSICOS POR TRANSMISSÃO E DIFUSÃO DE NÊUTRONS

Mauro Carlos Lopes Souza

ORIENTADOR: José Carlos Borgès

PROGRAMA: Engenharia Nuclear

Foram obtidas curvas de calibração que fornecem valores médios de fração de vazio (α), para misturas bifásicas de água-vapor, para os regimes de escoamento a bolhas, bolsões ("slug"), anular e anular inverso. As medidas foram realizadas em modelos simulados de lucite-ar, para escoamento estacionário, pelas técnicas da transmissão e difusão de nêutrons térmicos.

As curvas de calibração obtidas foram utilizadas para medidas de fração de vazio em um circuito contendo mistura bifásica de água-ar, em escoamento concorrente ascendente, para os regimes a bolsões ($p_{\max}=1,06$ bar) e anular ($p_{\max}=1,33$ bar), pelas mesmas técnicas anteriores.

Em ambos os sistemas, utilizou-se uma seção de testes constituída de tubulação de alumínio (99,9%), com diâmetro interno de 25,25 mm e 2,00 mm de espessura de parede.

O feixe de nêutrons foi obtido de uma fonte isotópica do tipo Am-Be, de 5 Ci, termalizados em uma blindagem cilíndrica de parafina de 500 mm de diâmetro (com $H/D=1$), recoberta com folhas de cádmio de 2 mm, tendo em seu interior um paralelepípedo de polietileno de alta densidade com dimensões de 240 x 240 x 144 mm. Os nêutrons escapavam através de um colimador quadrangular paralelo de 53,00 x 25,25 mm, com 273 mm de comprimento, cavado em uma peça de parafina borada (32% de H_3BO_3).

As medidas experimentais apresentaram boa concordância com os modelos teóricos da literatura especializada.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFPJ AS PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (M.Sc.)

VOID FRACTION MEASUREMENTS IN TWO-PHASE FLOW
BY TRANSMISSION AND SCATTERING OF A NEUTRONS BEAM

Mauro Carlos Lopes Souza

CHAIRMAN: José Carlos Borges
DEPARTMENT: Nuclear Engineering

Calibration curves have been obtained which supply average values of void fraction (α) of water-steam two-phase mixtures for bubble, slug, annular and invert annular flow states. The measurements were carried out in simulated models of lucite-air for the steady-state, using the techniques of transmission and diffusion of a thermal neutrons beam.

The calibration curves obtained were used for measurements of void fraction in a circuit containing two-phase water-air mixtures, in upward concurrent flow, for slug flow ($p_{\max}=1,06$ bar) and annular flow ($p_{\max}=1,33$ bar), using the same techniques.

In both of the systems, a test section made up of an aluminium (99,9%) tube was used with internal diameter of 25,25 mm and 2,0 mm wall thickness.

The beam of neutrons was obtained from a 5 Ci isotopic Am-Be source, thermalised in a cylindrical moderator of paraffin of 500 mm diameter (with $H/D=1$) which was covered by 2 mm thick cadmium sheets and having in its centre a parallelepiped made from high density polyethylene with the dimensions 240 x 240 x 144 mm. The neutrons escape through a rectangular collimator of 53,0 x 25,25 mm, with a length of 273 mm cut out of a single block of borated paraffin (32% of H_3BO_3).

The experimental results are in good agreement with theoretical models in published literature.

I N D I C E

CAPÍTULO	I	- <u>INTRODUÇÃO</u>	1
CAPÍTULO	II	- <u>REVISÃO DA LITERATURA</u>	4
CAPÍTULO	III	- <u>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</u>	10
	III.1	- <u>O Escoamento Bifásico</u>	10
	III.1.1	- Regimes de Escoamento	10
	III.1.2	- Regimes de Escoamento em Canais Verticais	10
	III.2	- <u>Definições e Propriedades Fundamentais</u>	15
	III.3	- <u>Cartas de Escoamento</u>	24
	III.4	- <u>Técnicas de Medidas com Nêutrons</u>	24
	III.4.1	- A Interação dos Nêutrons com o Meio	25
	III.4.2	- Seção de Choque para Nêutrons	27
	III.4.2.1	- Seção de Choque Total	29
	III.4.2.2	- Variação da Seção de Choque com a Energia	30
	III.4.3	- Moderação de Nêutrons	32
	III.4.4	- Processos de Detecção de Nêutrons	32
CAPÍTULO	IV	- <u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	33
	IV.1	- <u>Montagem Experimental para Escoamentos</u> <u>Símulados</u>	33
	IV.1.1	- Modelos Simuladores de Lucite	35
	IV.2	- <u>Montagem Experimental para Escoamento</u> <u>de Água-Ar</u>	40
	IV.3	- <u>A Fonte de Nêutrons</u>	43
	IV.4	- <u>O Sistema de Detecção de Nêutrons</u>	48
	IV.5	- <u>Metodologia</u>	48

IV.5.1	- Intensidade do Feixe Colimado	50
IV.5.2	- Cálculo da Seção de Choque do Material Atenuante	51
IV.5.3	- Identificação do Tipo de Escoamento	51
IV.5.4	- Medidas de Transmissão de um Feixe de Nêutrons	51
IV.5.5	- Medidas de Difusão de um Feixe de Nêutrons	53
IV.5.6	- Medidas na Seção de Testes de Água-Ar	55
CAPÍTULO V	- <u>RESULTADOS</u>	57
V.1	- <u>Calibração das Distâncias do Detector e Seção de Testes</u>	58
V.2	- <u>Medidas do Feixe de Nêutrons na Saída do Colimador</u>	58
V.3	- <u>Medidas de Transmissão de Nêutrons em Modelos de Lucite</u>	61
V.4	- <u>Medidas de Difusão de Nêutrons em Modelos de Lucite</u>	62
V.5	- <u>Medidas de Fração de Vazio no Circuito de Água-Ar</u>	77
V.5.1	- Escoamento a Bolsões	87
V.5.2	- Escoamento Anular	87
CAPÍTULO VI	- <u>DISCUSSÃO E CONCLUSÃO</u>	93
VI.1	- <u>Medidas com os Modelos de Lucite</u>	93
VI.2	- <u>Medidas no Circuito de Água-Ar</u>	98
VI.3	- <u>Sugestões</u>	100
<u>SIMBOLOGIA</u>	101
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	103

APENDICE A107

APENDICE B111

APENDICE C115

C A P Í T U L O I

INTRODUÇÃO

Os fenômenos de transferência de calor e escoamento de fluídos, com troca de fase (líquido para vapor), do refrigerante de um reator nuclear, revestem-se de grande importância uma vez que os reatores de potência utilizam líquidos refrigerantes submetidos a altos fluxos de calor.

Quando o líquido refrigerante escoar com troca parcial de fase há ocorrência de escoamento bifásico que, no caso dos reatores é, em geral, ascendente e concorrente, pois o vapor produzido na superfície das varetas do combustível desloca-se no mesmo sentido da massa líquida ascendente do refrigerante.

A fração volumétrica de vazios do escoamento bifásico é um parâmetro termohidráulico de importância significativa para a análise de segurança e estabilidade dos reatores como, por exemplo, a etapa de remolhamento do núcleo de um reator PWR, quando ocorre um acidente por perda de refrigerante (LOCA).

Por outro lado, mesmo para os reatores do tipo BWR onde a mudança de fase é um fato normal, perfeitamente controlada, e para reatores de pesquisa com núcleos atmosféricos ou não, a fração de vazios é um parâmetro muito importante, pois interfere na reatividade do reator.

A fração de vazios (α) é um parâmetro difícil de se medir com precisão, porque não existe uma técnica que seja válida em um caso geral. As correlações matemáticas, embora relativamente fáceis de serem usadas, apresentam muitas vezes, o problema de se conhecer seus limites de validade. Os modelos analíticos simplificados tais como homogêneo, escoamento separado e "drift-flux" e análises integral e diferencial, são modelos

idealizados que nem sempre conduzem a resultados satisfatórios. As técnicas experimentais, na sua maioria, apresentam o inconveniente de interferência com o escoamento do canal, dificultando a interpretação dos resultados.

Neste trabalho foram utilizadas as técnicas de transmissão e de difusão de um feixe colimado de nêutrons através de uma seção de testes. Foram obtidas curvas de calibração que fornecem valores médios de fração de vazios em uma tubulação de alumínio, contendo modelos de acrílico que simulam a evolução de vários regimes de escoamento num tubo de evaporação.

Os resultados foram posteriormente comparados com medidas realizadas em um circuito real, com uma seção de testes igual a anterior, porém com mistura bifásica de água e ar. Foram feitas medidas de fração de vazio, para os regimes de escoamento a bolsões e anular com auxílio das curvas de calibração obtidas para os modelos de lucite. A limitação desse circuito é que, pelas características de sua construção, não suporta altas pressões. Além disso, não se consegue obter o regime anular inverso.

De qualquer maneira muitos trabalhos existentes de medidas de fração de vazios já foram realizados nas condições próximas às de funcionamento dos reatores PWR e BWR, ou seja, a pressões elevadas (~ 150 bar para PWR), velocidades elevadas do refrigerante ($> 1 \text{ m} \cdot \text{S}^{-1}$) e intensos fluxos de calor ($\sim 150 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Tornam-se importantes portanto, as pesquisas realizadas no domínio das baixas pressões, fracos fluxos de calor e velocidades reduzidas do refrigerante, que se aproximam das condições de refrigeração de emergência de um reator de potência. Tais investigações tem a vantagem ainda de poder serem extendidas aos reatores de pesquisa.

O trabalho ora desenvolvido é uma continuação das medidas de fração de vazio em modelos de lucite-ar já realizadas por Torres⁽³⁰⁾, que obteve curvas de calibração para os escoamentos anular e anular inverso. No presente trabalho, foram obtidas

também curvas de calibração para os escoamentos a bolhas e bolhas.

O objetivo principal deste trabalho foi a utilização das curvas de calibração obtidas para medidas de fração de vazio em um circuito de água-ar montado no laboratório.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

Durante as três últimas décadas, um grande número de instituições de pesquisa e laboratórios se dedicaram a uma investigação intensa dos fenômenos de escoamentos bifásicos e transferência de calor com troca de fase. Um grande número de métodos, técnicas e instrumentos foram desenvolvidos com o objetivo de possibilitar o equacionamento e o entendimento mais profundo desses complexos e importantes fenômenos da engenharia termohidráulica.

Os métodos mais intensamente estudados e desenvolvidos para medidas de fração de vazio foram os fotográficos e óticos em geral, medidas do filme líquido e tensão de cisalhamento na parede, sondas isocinéticas, anemômetro de fio quente, sondas elétricas e as técnicas de atenuação e espalhamento de radiações (infravermelho, raios X, raios γ , radiação β e nêutrons).

As primeiras medidas utilizando técnicas de atenuação e espalhamento com radiações foram feitas com raios X, no final da década de 40⁽¹⁾.

Desde então, numerosos trabalhos foram desenvolvidos através das técnicas que utilizam radiação α ^(2,3,4), γ ^(5,6,7) e β ^(8,9,10).

Saba, Lahey e Corelli⁽¹¹⁾, utilizando a técnica de radiação infravermelho, realizaram um trabalho de medida de fração de vapor em escoamentos de mistura de ar e vapor com ênfase no estudo de enchimento do núcleo dos reatores PWR.

Os primeiros trabalhos realizados com a utilização de nêutrons para medidas em escoamento bifásico apareceram no final da década de 50. Em 1958 Untermyer et al^(12,13) sugeriram a me

dida de coeficiente de vazios em reatores usando a técnica de moderação de nêutrons rápidos. A partir daí, inúmeros trabalhos, procurando as mais variadas aplicações, vem sendo realizados com o uso de fontes de nêutrons provenientes de reatores e as fontes de radioisótopos tais como: Ra-Be, Am-Be, califórnio, etc.

Sha e Bonilla⁽¹⁴⁾, em 1965, usando uma fonte isotópica de Sb-Be, com fluxo de $\approx 10^5$ n/cm².s, realizaram estudos usando técnicas de moderação e transmissão de nêutrons rápidos, para medidias de fração de vapor em uma seção de testes contendo uma solução diluída de ácido bórico. Concluíram que o método é aplicável a seções de testes de multibarras (tal como um elemento combustível de um reator nuclear) com frações de vazios de 25% ou mais, com sensibilidade para se medir frações de vazios menores que 3%.

Experiências realizadas por Jackson et al⁽¹⁵⁾, em 1968, para medidas em seções de teste com mistura de água e vapor, mostraram que a termalização de nêutrons numa seção de testes com escoamento real, é um excelente método de medida de fração de vazios, quando se utilizam detectores do tipo BF₃.

Em 1971, Harms, Lo e Hancox⁽¹⁶⁾, utilizando como material de atenuação placas de lucite de 10,0 x 10,0 cm, com perfurações circulares variando de 0,04 a 0,40 cm, mediram a fração de vazios com uma precisão de $\pm 65\%$, para vazios compreendidos entre 0,03 e 0,7. A fonte de nêutrons foi o reator tipo piscina de 2,0 MW da Universidade de McMaster, Canadá. Os nêutrons foram observados com um detector BF₃ de 2 5,4 mm de diâmetro, recoberto de cádmio. Os nêutrons emergiam do reator através de um colimador de 1,28 cm de diâmetro. As experiências apresentaram excelentes resultados para simulação de escoamento a bolhas.

Ainda em 1971, Harms e Forrest⁽¹⁷⁾, usando a mesma fonte de nêutrons e uma técnica similar, estudaram os efeitos da dinâmica de um escoamento bifásico. A seção de testes foi oscilada mecanicamente num plano perpendicular ao feixe de nêutrons, com períodos de oscilação várias vezes menor que o tempo de contagem. Concluíram, com esses trabalhos, que essas flutuações podem afetar de modo significativo os resultados das medidas.

Hancox et al⁽¹⁸⁾, em 1972, tentando minimizar os erros nas medidas devido às flutuações entre as fases de água e vapor, realizaram experiências com medidas em curtos intervalos de tempo (menores do que os períodos das flutuações), conseguindo com isso diminuir as diferenças entre a fração de vazio real e o valor medido. Jonas e Zuber⁽¹⁹⁾, em 1975, realizaram trabalhos semelhantes de flutuações em escoamentos padrões, tendo conseguido resultados também semelhantes. *

Em 1978, Rousseau et al⁽²⁰⁾, efetuaram medidas de fração de vazios durante despressurização, em tubulações de grande diâmetro e paredes espessas, usando o método da difusão de nêutrons. A fonte de nêutrons foi o reator Siloette, do tipo piscina, com um fluxo (rápido e epitérmico) de 10^7 n/cm².s.

As fontes de ²⁵²Cf foram muito utilizadas como fonte de nêutrons para medidas de fração de vazio em escoamento bifásico em seções de teste de pequeno porte. Franzzoli et al⁽²¹⁾, em 1978, utilizando as técnicas de moderação e difusão de nêutrons rápidos com uma fonte de ²⁵²Cf de 10^6 n/cm².s, concluíram que as medidas de fração de vazio podem ser feitas na seção inteira, mesmo para canais com paredes espessas. Além disso, a calibração é fácil de ser conseguida porque a distribuição espacial de vazios não interfere nas medidas, quando se utilizou modelos simulados de lucite-ar. Em 1979, Franzzoli e Magrini⁽²²⁾, estudaram a transmissão de nêutrons térmicos obtidos de uma fonte de ²⁵²Cf de $7,5 \times 10^5$ n/cm².s, moderados em polietileno de alta densidade. A seção de testes consistia de um tubo de aço inoxidável AISI 316, com diâmetro interno de 2,0 cm e diâmetro externo 2,5 cm. A mistura bifásica era composta de água e vapor a uma pressão de 7,8 MPa. Foram realizadas medidas com fração de vazios variando de 0,5 a 1,0.

Em 1978, Banerjee, Hussein e Meneley⁽²³⁾, usando um feixe colimado de nêutrons rápidos/epitérmicos, provenientes do reator de 5 Mw(t) da Universidade de McMaster, no Canadá, realizaram uma série de medidas em dois conjuntos de seção de testes diferentes. O primeiro conjunto consistia de modelos de alumínio e água, simulando o escoamento de misturas bifásicas água/va

por em canais circulares. Foram estudados os regimes anular, anular inverso e estratificado. Os nêutrons escapavam por um colimador retangular forrado com folhas de cãdmio e máscara de cãdmio na saída, para barrar os nêutrons tãrmicos. As medidas por transmissãõ foram efetuadas com um detector de ^3He , com possibilidade de efetuar uma varredura perpendicular ao eixo do colimador do feixe de nêutrons. Para as medidas de difusãõ utilizou-se um detector do tipo BF_3 , tendo diante de sua regiãõ sensível um segundo colimador, para garantir que apenas os nêutrons espalhados pela seçãõ de testes o alcançassem. A outra seçãõ de testes consistia de um conjunto de multibarras, composto de 36 varetas de 13 mm de diãmetro cada, confinadas em um tubo, simulando um elemento combustível de um reator nuclear. Tal seçãõ de testes foi instalada em um circuito com uma mistura bifãstica de água e ar escoando pelos subcanais. Sendo a geometria de tal escoamento bastante complexa, os resultados das medidas foram avaliados por um programa que utilizou o mãtodo de Monte Carlo. Nesse mesmo trabalho, Banerjee et al⁽²³⁾, usaram uma fonte de nêutrons de Am-Be com resultados satisfatãrios.

Ainda em 1978, Banerjee, Heidrich e Rhodes⁽²⁴⁾, realizaram um estudo semelhante no mesmo reator da Universidade de McMaster. As medidas dinãmicas de escoamento de água e ar foram comparadas com as da tãcnica do confinamento do escoamento entre duas vãlvulas de fechamento rãpido (esfera).

Banerjee, Yuen e Vandebroek⁽²⁵⁾, dando continuidade aos trabalhos jã efetuados por Banerjee et al⁽²²⁾, realizaram em 1979 uma sãrie de medidas de calibraçãõ usando a tãcnica da difusãõ de nêutrons rãpidos, para medida de fraçãõ de vazios nos subcanais de um feixe de varetas de combustível. As experiãncias mostraram que o fluxo de nêutrons espalhados varia linearmente com a fraçãõ de vazios, e ã totalmente independente da distribuiçãõ das fases. As medidas de transmissãõ de nêutrons foram efetuadas para se determinar o regime de escoamento. A tãcnica mostrou uma excelente sensibilidade, tendo a taxa de contagens mostrado uma alta razãõ de contraste para fraçãõ de vazios e medidas de distribuiçãõ de fase em escoamento transiente com troca de fase.

A modelagem dos fenômenos termohidráulicos encontrados durante a fase de remolhamento, quando de um Acidente por Perda de Refrigerante do Primário - APRP ("LOCA") foi estudado por Freitas⁽²⁶⁾ em 1981, que realizou uma série de estudos em um único tubo, com diâmetro bastante próximo ao diâmetro hidráulico de um subcanal dos elementos combustíveis dos reatores PWR. Os métodos de medida de fração de vazio por transmissão e difusão de nêutrons frios, térmicos e epitérmicos foram estudados no reator Mēlusine, em Grenoble, utilizando um colimador retangular paralelo de 12,0 x 5,0 mm. O fluxo de nêutrons térmicos era de $4,0 \times 10^7$ n/cm².s. Um filtro de bismuto foi instalado no colimador para eliminar raios γ . Os nêutrons frios ($E_n \leq 0,005$ eV) eram obtidos colocando-se um bloco de Berílio na saída do colimador e os nêutrons epitérmicos com a colocação de uma folha de cádmio de 0,5 mm também na saída do colimador. A seção de testes era constituída de um tubo de inconel de 12,0 mm de diâmetro interno e 14 mm de diâmetro externo. A fração de vazios foi simulada por modelos de alumínio e água para os regimes anular e anular inverso. Freitas concluiu que o método da difusão apresentou resultados excelentes no caso dos fenômenos estudados.

Em 1979, Freitas et al⁽²⁷⁾, realizaram trabalhos semelhantes no mesmo reator Mēlusine. Dando continuidade ao trabalhos, Freitas⁽²⁸⁾ em 1982 apresentou novos resultados de medidas de frações de vazios, usando as técnicas de transmissão e difusão de nêutrons em seção de teste de inconel.

Durante o ano de 1981, Younis, Hoffman e Harms⁽²⁹⁾, usando a técnica de transmissão por nêutrons térmicos, fizeram medidas de fração de vazios utilizando tubos de aço inox com diâmetros próximos de 1,0 cm. Os resultados foram comparados com as medidas obtidas pela técnica do confinamento do escoamento entre duas válvulas de esfera.

Em 1982, Torres⁽³⁰⁾ fez uma série de experiências utilizando as técnicas de transmissão e difusão de um feixe de nêutrons térmicos. Os trabalhos foram realizados no laboratório de Instrumentação Nuclear da COPPE, usando uma fonte isotópica de Am-Be de 5 Ci. Os nêutrons foram termalizados em um tanque qua

drangular de 90 x 70 x 70 cm contendo água. O feixe escapava do tanque através de um colimador quadrangular divergente com janela de cádmio para definir a área do feixe. A seção de testes era constituída por tubos de alumínio de 19,0 mm de diâmetro e a simulação dos escoamentos anular e anular inverso, feita por modelos de lucite. A montagem experimental permitiu a realização de medidas de difusão em ângulos de -130° a 130° . A detecção dos nêutrons foi feita com um detector BF_3 de 25,0 mm de diâmetro.

Atualmente um grande número de instituições de pesquisa se dedica a estudos de parâmetros termohidráulicos, com ênfase no estudo de escoamento bifásico no circuito primário e no núcleo dos reatores. As técnicas de medidas por transmissão e difusão de um feixe de nêutrons através de uma seção de testes, com escoamento estacionário ou dinâmico, tem trazido, como mostra a literatura disponível, uma excelente contribuição para a compreensão de inúmeros fenômenos que ocorrem no seio do fluido refrigerante, principalmente nas condições de funcionamento de emergência dos reatores.

C A P Í T U L O III

FUNDAMENTOS TEÓRICOSIII-1 - O Escoamento Bifásico

A ocorrência de escoamento bifásico é de grande importância nos reatores refrigerados por líquidos. Quando ocorre escoamento de duas fases (líquido e vapor) no circuito primário dos reatores surgem, como vimos, problemas interessantes de transferência de calor. Nos reatores do tipo BWR a ocorrência de escoamento bifásico é um fato normal e a planta já é projetada para isso. Nos reatores do tipo PWR, podem surgir eventualmente ebulições locais na superfície das varetas dos elementos combustíveis. A troca de fase nesses reatores é contudo evitada em operações normais, surgindo apenas em regimes transientes de operação ou em condições de emergência⁽³²⁾.

III-1.1 - Regimes de Escoamento

A descrição dos regimes de escoamento inclui, em geral, a descrição do arranjo morfológico dos componentes, ou seja, o padrão de escoamento.

Em geral, os vários tipos de condutos apresentam, em relação à posição, quatro leitos de escoamento a saber: Vertical, horizontal, oblíquo e formas complexas. O escopo deste trabalho inclui apenas o primeiro caso, ou seja, o vertical.

III-1.2 - Regimes de Escoamento em Canais Verticais

Será considerado aqui o escoamento concorrente ascendente.

O escoamento em um canal vertical aquecido caracteri

za-se por uma sucessão de regimes de escoamento, como é mostrado na figura (III-1). Inicia com escoamento monofásico com o líquido subresfriado e, a medida que vai subindo o canal, transforma-se passando por vários regimes de escoamento até chegar ao monofásico de vapor puro. A figura (III-2) mostra essa sucessão de regimes em um único tubo aquecido, às vezes chamado de tubo evaporador⁽³³⁾.

1) Escoamento a Bolhas

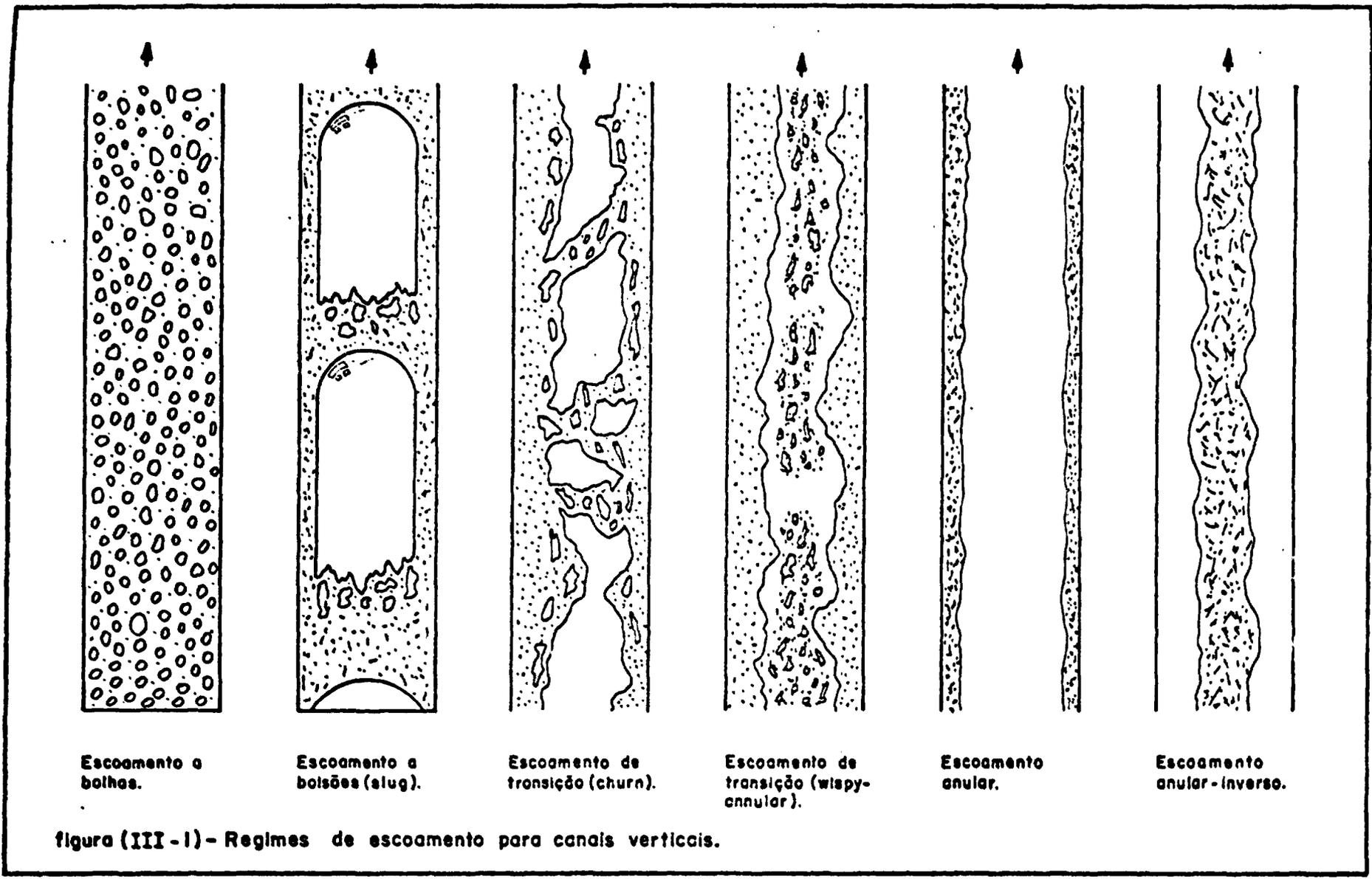
O escoamento a bolhas se processa quando, no seio do líquido subresfriado, começa a ocorrer ebulição nucleada em volume ("bulk").

Em geral, vapor fica distribuído uniformemente na fase líquida o que torna o escoamento constante. Para altas velocidades de mistura bifásica o escoamento a bolhas é difícil de ser reconhecido. Quando o diâmetro das bolhas é de aproximadamente 1,0 mm estas são esféricas e quando maiores são geralmente irregulares. Quando o canal é longo, as bolhas vão aumentando de tamanho e, por sucessivas colisões, coalescem formando bolhas ainda maiores e pequenas bolsas, que acabam por formar bolsões de vapor ("slug"). O escoamento a bolhas ocorre em títulos muito baixos de vapor, para fração de vazio não superior a 0,2⁽³⁴⁾.

2) Escoamento a bolsões "slug"

O escoamento a bolhas, como visto, pela coalescência das bolhas evolui até a formação de bolsões de vapor. O regime a bolsões não é uniforme, pois, estes escoam alternadamente com a fase líquida.

O volume total de vapor numa seção de testes em geral não ultrapassa 35%, embora o diâmetro de um bolsão possa ter quase o mesmo diâmetro da seção de testes, ficando, em certos casos, apenas um fino filme de líquido junto a parede, que pode escoar em contra-corrente com a fase vapor ou concorrente, quando a velocidade de escoamento da fase líquida é baixa, (figura (III-3)).



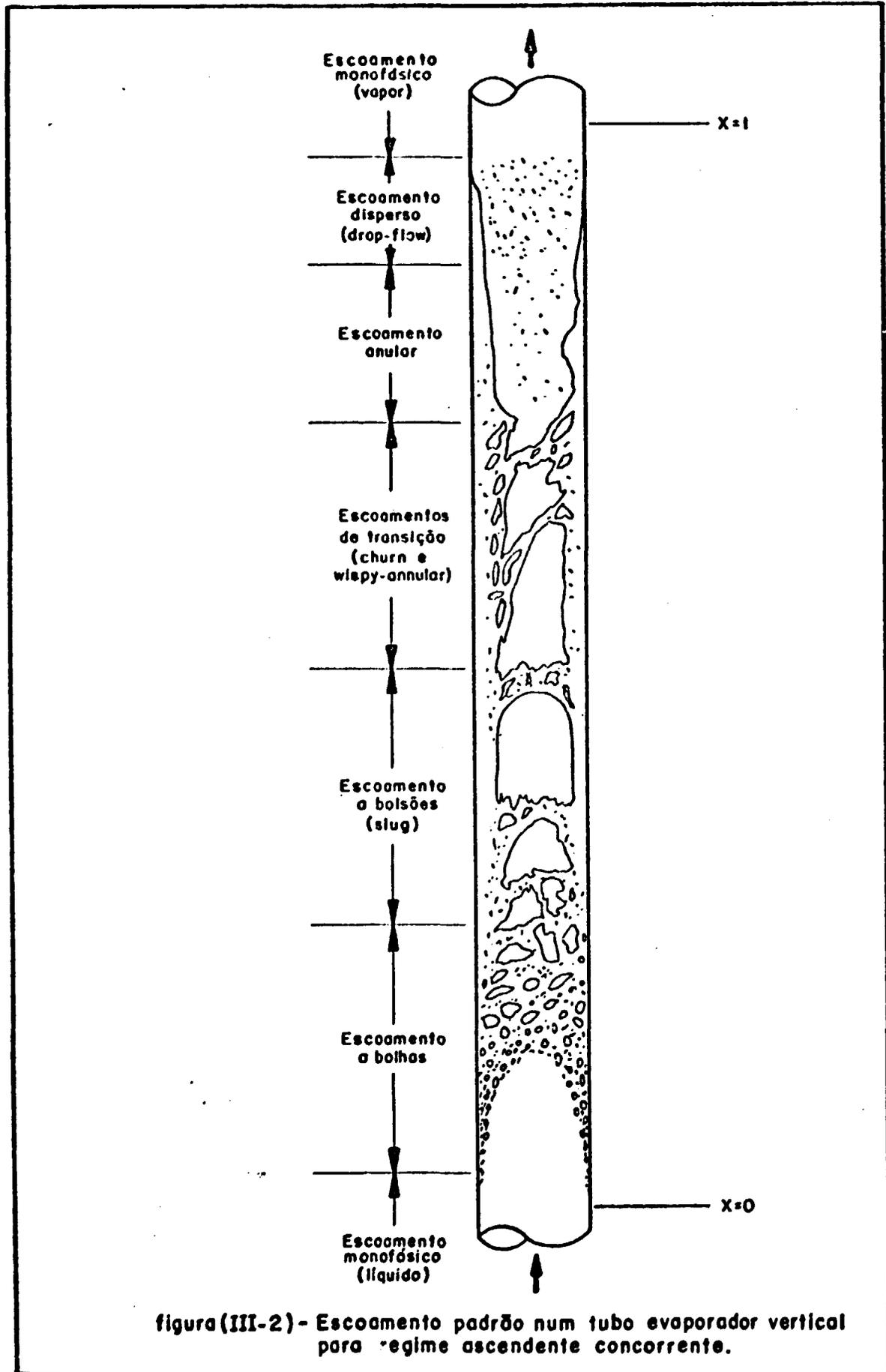


figura (III-2) - Escoamento padrão num tubo evaporador vertical para regime ascendente concorrente.

No escoamento vertical os bolsões tem sua parte superior (frente) arredondada, e a posterior com forma não muito bem definida, em geral acompanhada de várias bolhas de vários tamanhos, que vão se soltando e sendo arrastadas.

As bolsas de vapor são compressíveis e produzem oscilações no escoamento, podendo contudo se estabilizar num regime pulsativo. Além disso o regime de escoamento não é uniforme, podendo os bolsões se movimentarem com aproximações e distanciamento entre si, ocorrendo às vezes coalescência de dois ou mais bolsões (33,35).

3) Escoamentos de Transição

Com o crescente aumento do volume de vapor e consequente aumento da pressão e da velocidade, ocorrem escoamentos de transição caóticos muito instáveis, que podem ser subdivididos em:

- a) Escoamento Espumante ("Froth")
- b) Escoamento Semi-anular ("Churn")
- c) Escoamento Semi-anular ("Wispy-annular")

O escoamento "Wispy-annular" possui núcleo gasoso com gotas em forma de pacotes, com filme líquido bastante espesso contendo gotas (33,35).

4) Escoamento Anular

Após os escoamentos de transição, com os crescentes aumentos do título de vapor e da fração de vazio, os bolsões e as bolhas do escoamento se unem dando origem ao escoamento anular. A fase líquida escoia pela parede do tubo formando um anel de líquido superaquecido, enquanto o vapor escoia pelo centro (no interior do anel). Nesse regime pode ocorrer o fenômeno do "floding". Inicialmente, o filme líquido desce pela parede do tubo enquanto o vapor sobe (contracorrente). Com aumento do fluxo de vapor o líquido é arrastado até o regime ser concorrente. Se o fluxo de vapor cai, o líquido pode voltar a descer. A reversão do filme líquido é chamada "flow reverse" (36).

A vaporização no escoamento anular é subresfriada, pois ocorre principalmente na interface líquido-vapor.

5) Escoamento Disperso ("drop flow" ou "fog")

Com o crescente aumento da temperatura da parede do tubo, o anel de líquido superaquecido do escoamento anular vai diminuindo de tal forma que escoam praticamente vapor arrastando gotas. Pode-se dizer que a fase líquida está dispersa na fase vapor em forma de gotículas. É um escoamento equivalente ao inverso do escoamento a bolhas.

6) Escoamento Anular Inverso

Esse regime pode ocorrer durante a fase de remolhamento do núcleo de um reator em potência como, por exemplo, num acidente por perda de refrigerante do circuito primário (LOCA). Quando de um acidente desse tipo, devido às elevadas temperaturas nas zonas secas dos elementos combustíveis, o refrigerante não consegue inicialmente molhar a superfície das varetas porque o vapor forma um colchão sobre as mesmas. Para o subcanal de um reator o escoamento não é propriamente anular inverso (figura (III-4.a)), mas, pode ser considerado como tal. Para um canal circular, o vapor forma um anel junto a parede do tubo enquanto o líquido escoam pelo centro formando uma espécie de pavio irregular como mostra a figura (III-4.b).

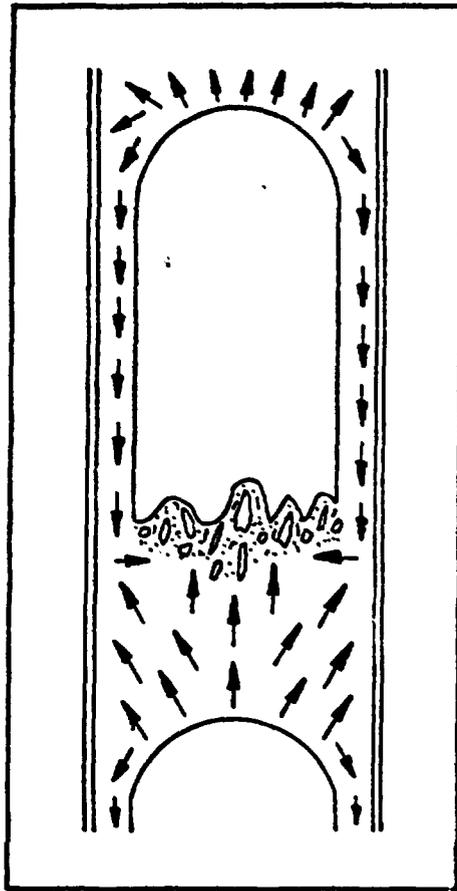
III-2 - Definições e Propriedades Fundamentais

Um tratamento matemático avançado sobre a modelagem dos escoamentos bifásicos foge ao escopo do presente trabalho, sendo apresentado a seguir apenas um pequeno resumo das principais propriedades^(32,33,34).

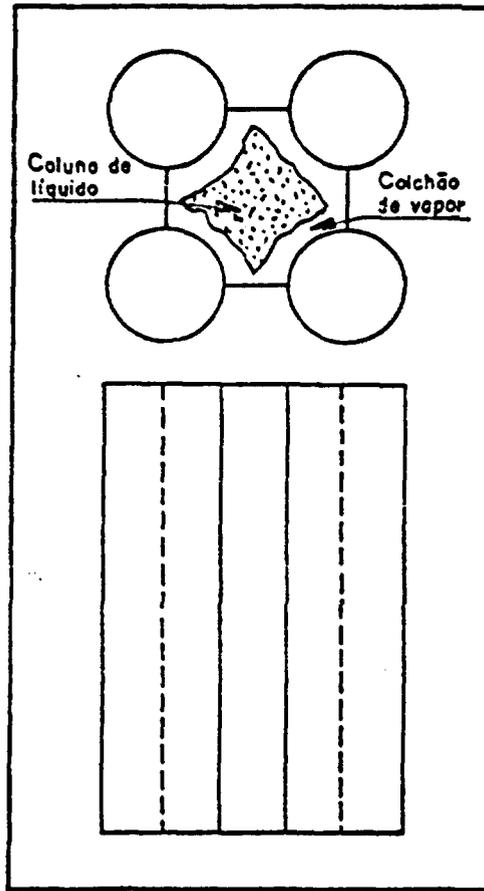
Considerando um canal por onde escoam duas fases, em regime concorrente, com área de seção A e sendo esta ocupada pela fase líquida A_f e pela fase vapor A_g , podemos definir fração de vazio (α) como sendo

$$\alpha = \frac{A_g}{A}$$

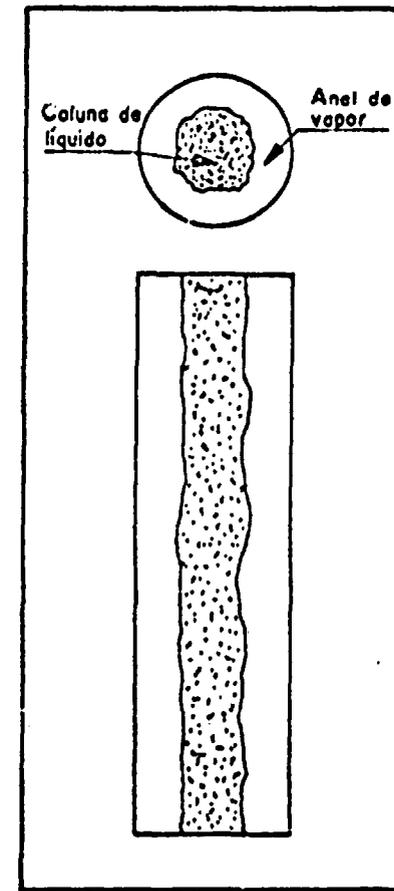
(III-1)



figura(III-3)- Detalhe do escoamento de um "Bolsão" para baixas pressões e baixas velocidades de escoamento.



figura(III-4-a)- Escoamento anular-inverso no subcanal de um reator.



figura(III-4-b)- Escoamento anular-inverso num canal circular.

ou então em termos de volume (V)

$$\alpha = \frac{\text{volume de vapor na mistura}}{\text{volume total de vapor e líquido na mistura}} = \frac{V_g}{V_g + V_f} \quad (\text{III-2})$$

Na realidade a definição dada envolve, para volumes macroscópicos, um processo de média no espaço e no tempo, que poderia ser considerado embutido na definição. De qualquer maneira, frequentemente não é possível se medir a fração de vapor (α) ao longo da tubulação, porque o escoamento em geral não é uniforme. Nesse caso, são necessárias um grande número de leituras instantâneas sobre elementos de comprimento dL . Assim,

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\iint \alpha(rt) dr dt}{\int dr \int dt} \quad (\text{III-3})$$

A qualidade (x) de uma mistura líquido-vapor em um sistema estacionário, onde não existe um movimento relativo muito grande entre as fases líquido e vapor, é definida como:

$$x = \frac{\text{massa de vapor na mistura}}{\text{massa total da mistura}} = \frac{W_g}{W_g + W_f} \quad (\text{III-4})$$

Evidentemente que (x) está sujeito também a um processo de média no espaço e no tempo. A média é tomada sobre uma superfície especificada, para um período de tempo, ou seja,

$$\langle x \rangle = \frac{\int G_g dA dt}{\int G dA dt} \quad (\text{III-5})$$

A relação entre α e x para um sistema estacionário pode ser obtida tomando-se um certo volume de mistura líquido-vapor em equilíbrio térmico. Tal volume será igual a $v_f + x v_g$, onde v é o volume específico. Na mistura em equilíbrio, as duas fases são líquido saturado e vapor saturado, e o volume de vapor presente é igual à sua massa vezes seu volume específico v_g . Então α será dado por

$$\alpha = \frac{x v_g}{v_f + x v_g} \quad (\text{III-6})$$

A equação acima pode ser também escrita na seguinte forma:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{v_f}{v_g}\right)} \quad (\text{III-7})$$

A equação (III-7) mostra que grandes valores de fração de vazio (α) estão associados a pequenos valores de qualidade (x) principalmente para baixas pressões. A figura (III-5) mostra valores calculados de α versus x para água a várias pressões.

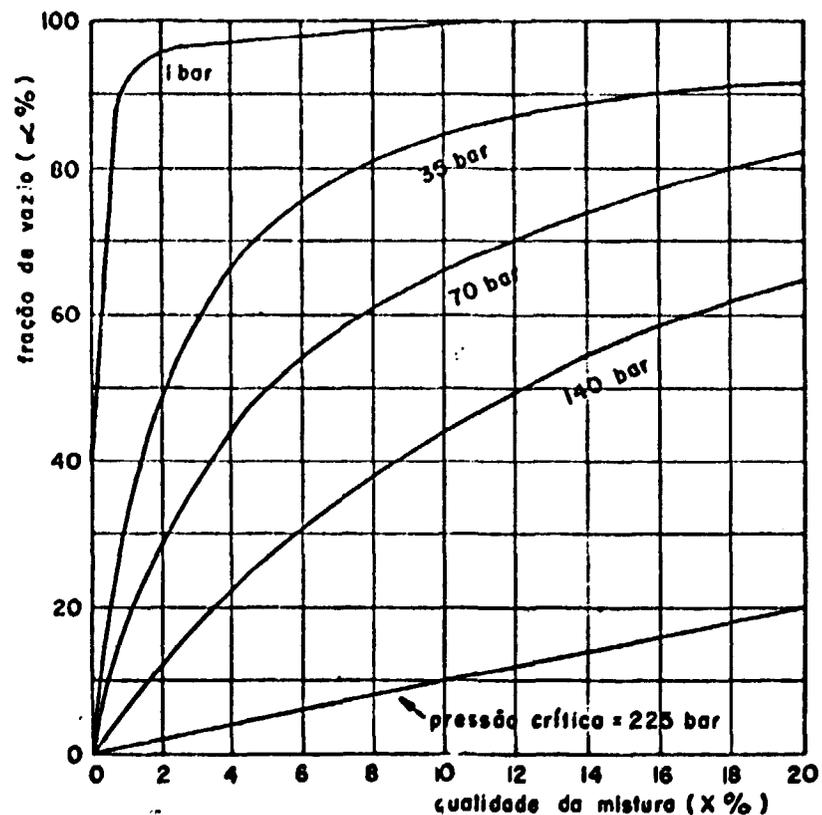


Figura (III-5) Fração de vazio versus a qualidade para sistema de água - sem escoamento (32).

Pela figura (III-5) concluímos que para x constante α decresce com o aumento da pressão, e ainda que a medida que a pressão se aproxima da pressão crítica, α se aproxima de x .

Para um sistema com escoamento, como por exemplo o sistema bifásico se deslocando entre as varetas dos elementos combustíveis de um reator, em escoamento vertical ascendente, a fase vapor "desliza" através do líquido, com velocidade maior que a do líquido. Não existe um método preciso para avaliar a distribuição de velocidades entre as fases. De qualquer maneira, o "deslizamento" é definido como sendo a razão da velocidade média do vapor pela velocidade média do líquido, ou seja,

$$s = \frac{v_g}{v_f} \quad (\text{III-8})$$

Naturalmente que a razão de deslizamento modifica a relação entre α e x obtida anteriormente, para sistema sem escoamento.

Para uma determinada seção de canal, a massa total de mistura que escoar pode ser chamado de \dot{m}_t . A taxa de vapor seria $x\dot{m}_t$ e a massa de líquido $(1-x)\dot{m}_t$, onde x é a qualidade na seção. Aplicando a equação da continuidade, as velocidades de vapor e líquido são dadas por:

$$v = \frac{v_g \dot{m}_t}{A_g} \quad \text{e} \quad v_f = \frac{v_f (1-x)\dot{m}_t}{A_f}$$

onde A_g e A_f são as áreas de vapor e líquido perpendiculares a seção do escoamento. Se imaginarmos as fases completamente separadas uma da outra, combinando as equações acima teremos:

$$s = \frac{v_g}{v_f} = \frac{x}{1-x} \frac{A_f}{A_g} \frac{v_g}{v_f} \quad (\text{III-9})$$

Como já definido anteriormente na equação (III-1), a fração de vazio na seção considerada é a razão entre o volume da fase vapor e o volume total na seção. Se considerarmos uma pequena seção, como é o caso de um canal de reator podemos dizer que

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

ou

$$\frac{A_f}{A_g} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (\text{III-10})$$

Dessa maneira a equação (III-9) fica:

$$s = \frac{x}{1-x} \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{v_g}{v_f} \quad (\text{III-11})$$

Rearranjando a equação (III-11) chega-se a

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{v_f}{v_g} s\right)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \phi} \quad (\text{III-12})$$

e ainda

$$x = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) \frac{1}{\phi}} \quad (\text{III-13})$$

onde $\phi = \frac{v_f}{v_g} s$

A figura (III-6) mostra a fração de vazio α versus a qualidade (x), a 70 Bar, para várias razões de deslizamento.

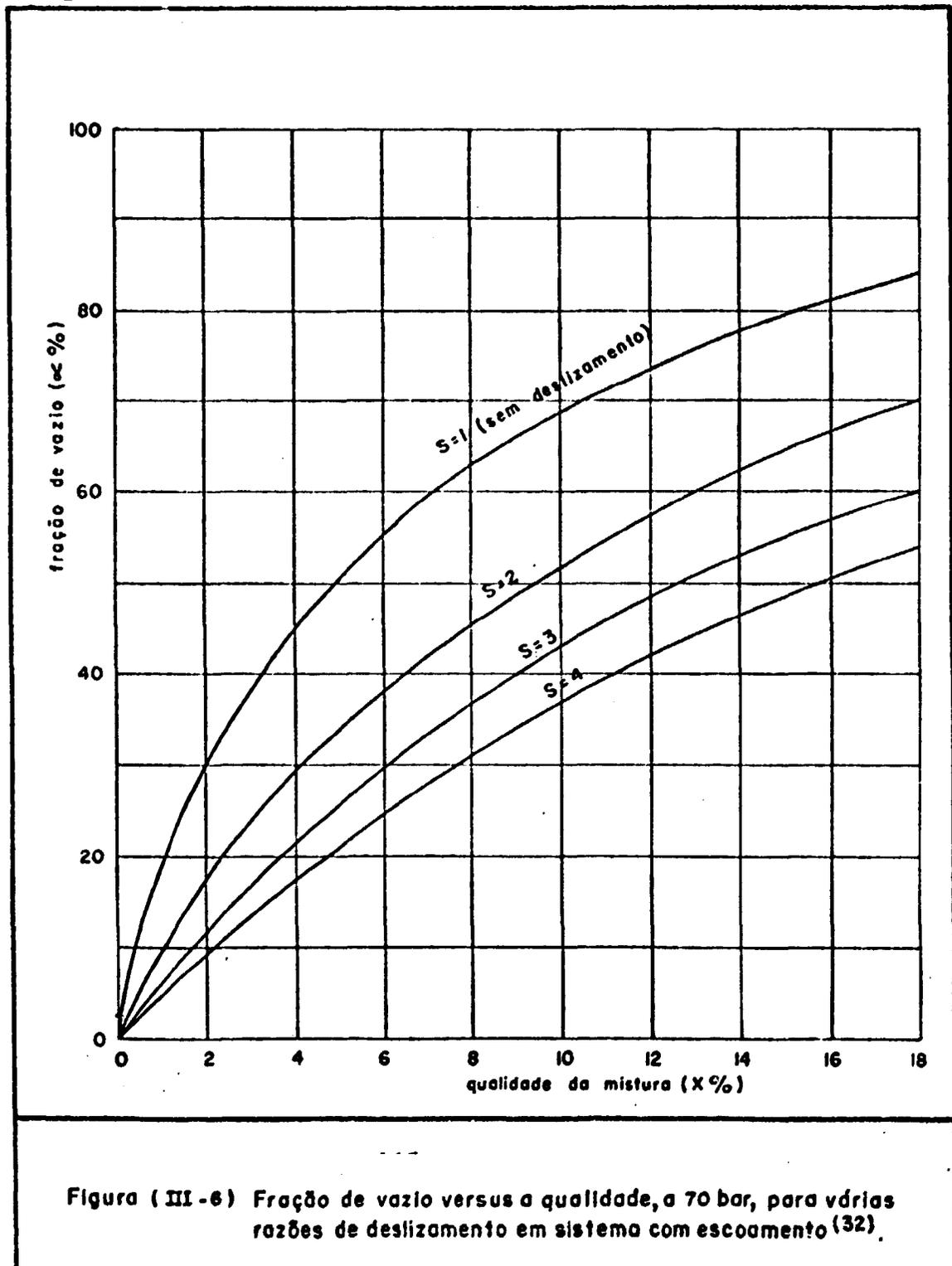
Um grande número de correlações empíricas relacionando α e x já foram propostas, baseadas em valores experimentais disponíveis para a água. Tais correlações cobrem em geral, amplas condições de operação e as mais variadas geometrias de canais de escoamento.

A vazão mássica para um escoamento qualquer é dada por W . Para um escoamento bifásico esta é a soma da vazão das fases, ou seja, $W = W_f + W_g$. A vazão volumétrica é denotada por Q . Da mesma forma, para escoamento bifásico, $Q = Q_f + Q_g$. Como

$$Q_f = \frac{W_f}{\rho_f} \quad \text{e} \quad Q_g = \frac{W_g}{\rho_g}, \quad \text{logo,}$$

$$Q = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_g}{\rho_g} \quad (\text{III-14})$$

onde ρ_f e ρ_g são as densidades das fases líquida e gasosa respectivamente.



A razão da vazão mássica W pela a área de escoamento \bar{A} é denominada fluxo de massa ou velocidade de mássica, e denotada por G . Assim, como

$$G = \frac{W}{\bar{A}} = \rho v \quad (\text{III-15})$$

então

$$W_g = GAx \quad \text{e} \quad W_f = GA(1-x).$$

Se v_g é a velocidade do vapor então $v_g = \frac{W_g}{\rho_g \bar{A}_g}$ e $v_f = \frac{W_f}{\rho_f \bar{A}_f}$, logo

$$v_g = \frac{Q_g}{\bar{A}_g} \quad \text{e} \quad v_f = \frac{Q_f}{\bar{A}_f} \quad (\text{III-16})$$

ou

$$v_g = \frac{Gx}{\rho_g \alpha} \quad \text{e} \quad v_f = \frac{G(1-x)}{\rho_f (1-\alpha)} \quad (\text{III-17})$$

É sempre necessário usar a fração do escoamento volumétrico total, que é composto de vapor e líquido. Assim, a qualidade volumétrica β é definida por:

$$\beta = \frac{Q_g}{Q_g + Q_f} \quad \text{e} \quad (1-\beta) = \frac{Q_f}{Q_g + Q_f}$$

Levando em conta que $W_i = \rho_i A_i v_i$, temos a definição do fluxo volumétrico j . Assim, pelas componentes

$$j_g = \alpha v_g \quad \text{e} \quad j_f = (1-\alpha)v_g$$

temos que

$$j = j_f + j_g \quad (\text{III-18})$$

Pelas equações acima é fácil concluir que

$$j_f = \frac{Q_f}{\bar{A}} \quad \text{e} \quad j_g = \frac{Q_g}{\bar{A}}$$

logo

$$j = \frac{Q}{\bar{A}} \quad (\text{III-19})$$

Então,

$$\frac{j_f}{j_g} = \frac{Q_f}{Q_g} = \frac{v_f}{v_g} \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (\text{III-20a})$$

Pela equação (III-8) temos que a razão de deslizamento $\bar{s} = \frac{v_g}{v_f}$, então

$$\frac{j_f}{j_g} = \frac{1}{\bar{s}} \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (\text{III-20b})$$

A velocidade relativa entre o vapor e o líquido é dada como

$$v_{gf} = (v_g - v_f) = -v_{fg}$$

O fluxo volumétrico em relação a uma superfície movendo-se com velocidade média ("drift flux") é definido por

$$j_{gf} = \alpha(v_g - j) \text{ e } j_{fg} = (1-\alpha)(v_f - j)$$

logo,

$$j_{gf} = -j_{fg} \quad (\text{III-21})$$

Considerando que $v_f = \frac{j_f}{1-\alpha}$ e que $v_g = \frac{j_g}{\alpha}$, a expressão para j_{fg} fica:

$$j_{fg} = \alpha(1-\alpha)(v_f - v_g) = \alpha(1-\alpha)v_{fg} \quad (\text{III-22})$$

ou seja, o "drift flux" é proporcional à velocidade relativa.

Usando as equações (III-1) e (III-16) temos ainda as propriedades:

$$j_g = v_g \alpha = j\beta = \frac{Gx}{\rho_g}, \quad (\text{III-23})$$

$$j_f = v_f(1-\alpha) = j(1-\beta) = \frac{G(1-x)}{\rho_f}$$

e

$$G_g = j_g \rho_g = Gx,$$

$$G_f = j_f \rho_f = G(1-x),$$

(III-24)

$$G = G_g + G_f$$

III-3 - Cartas de Escoamento

A compreensão dos vários regimes de escoamento e das transições de um para outro, é bastante simples. A representação de várias transições em uma carta de escoamentos é um método simplificado para se dar uma idéia aproximada de um regime particular que tenha uma boa probabilidade de ocorrer, para um conjunto local de parâmetros de escoamento. Cada regime de escoamento é representado por uma determinada área ou região, em um gráfico ou diagrama cujas coordenadas são funções de j_g e j_f , ou outros parâmetros generalizados que envolvem j_g e j_f . Na realidade, a utilização de cartas de escoamentos é bastante restrita e aplicável principalmente em problemas mais simples, pois, um grande número de variáveis influencia ou determina o tipo de escoamento. Na maioria dos problemas a situação real é extremamente complexa, e não se pode representar a influência dessas variáveis apenas por um gráfico a duas dimensões.

A aplicação das cartas de escoamento com a utilização das coordenadas j_g e j_f , restringem sua aplicação a uma situação particular. A escolha de um parâmetro mais generalizado pode ser adequado para representar uma transição particular e é improvável que esse mesmo parâmetro seja conveniente para uma transição diferente, governada por diferentes balanços de forças.

Uma alternativa mais flexível que procura resolver essa dificuldade é o exame individual de cada transição e daí se derivar um critério válido para cada caso particular. Essa alternativa tem sido atualmente objeto de estudos⁽³³⁾.

Existem, na literatura^(33,34,35,39), numerosos trabalhos que apresentam cartas de escoamento para os mais variados regimes de escoamento. No apêndice A são mostrados, para exemplificar, cartas para escoamento vertical ascendente.

III-4 - Técnicas de Medidas com Nêutrons

As principais técnicas de atenuação utilizadas para medidas de fração de vazios em escoamentos bifásicos são a trans

missão e a difusão de um feixe colimado de nêutrons atravessando uma seção de testes, e posteriormente analisado por um sistema de detecção.

As técnicas de atenuação com nêutrons dão excelentes resultados quando o feixe atravessa um meio hidrogenado, como por exemplo, as misturas bifásicas de água e vapor, escoando num canal transparente a nêutrons tal como alumínio e até mesmo de metais mais pesados, como as ligas de aços inoxidáveis e inonel (no caso de canais aquecidos a altas temperaturas)⁽²³⁾. Os resultados são igualmente bons para os modelos simuladores do escoamento bifásico de água-ar confeccionados com materiais hidrogenados, tais como os polímeros polietileno, lucite, nylon, políester e outros. Deve-se contudo evitar a utilização de polímeros contendo componentes e aditivos cujos teores comprometam a condição de material altamente hidrogenado.

A grande vantagem da utilização dos modelos simulados é a possibilidade de obtenção de curvas de calibração para medidas de fração de vazios, para serem posteriormente utilizadas em circuitos de escoamento dinâmico.

Para evitar toda a problemática que envolve o aquecimento uniforme de um canal, principalmente a instrumentação por termopares que é bastante onerosa, grande parte dos estudos tem sido realizados em canais à temperatura ambiente. A fase vapor é substituída por ar, injetado na parte inferior do canal, muitas vezes por sistemas sofisticados de distribuição, como no caso de estudo de escoamento a bolhas. O ar pode ser também injetado nas paredes do tubo, por capilares, para simular uma ebulição nucleada. Um grande número de trabalhos pode ser consultado dentro da bibliografia existente.

III-4.1 - A Interação dos Nêutrons com o Meio

Sendo partículas sem carga, os nêutrons não interagem com a matéria através de forças colombianas, como acontece com os elétrons e outras partículas carregadas.

Enquanto os raios γ e as partículas carregadas interagem principalmente com a nuvem eletrônica, os nêutrons interagem com o núcleo do material absorvente. Eles podem atravessar vários centímetros da matéria sem nenhum tipo de interação, podendo ser praticamente invisíveis a um pequeno detector⁽³⁷⁾.

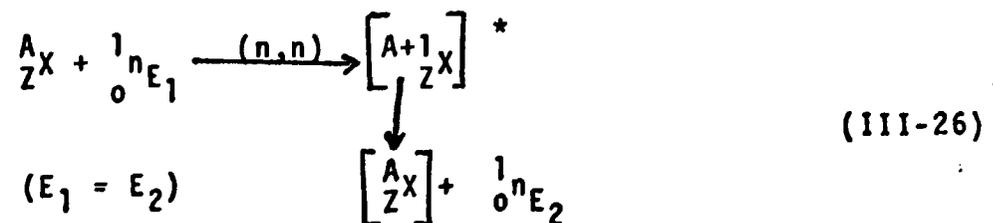
A probabilidade relativa dos vários tipos de interação de nêutrons com os núcleos, varia enormemente com a energia dos nêutrons incidentes e a seção de choque do material absorvente, para essa energia. Os nêutrons interagem com a matéria através dos vários mecanismos a saber: 1) simples captura (n,γ) , 2) Espalhamento elástico (n,n) , 3) espalhamento inelástico (n,n) , $(n,n\gamma)$ ou $(n,2n)$, 4) ejeção de partículas carregadas (n,p) , (n,d) , (n,α) , $(n,\alpha p)$, (n,t) , etc, 5) fissão (n,f) ⁽³⁸⁾.

A reação de simples captura é provavelmente a mais comum de todas as reações e é o resultado de interação de um nêutron térmico com o núcleo, conforme a equação abaixo:

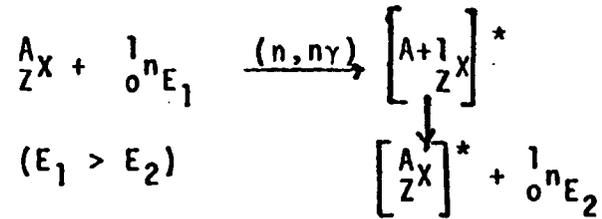


onde a espécie $[{}^{A+1}_ZX]^*$ produzida é um núcleo excitado que decai com a emissão de radiação γ .

No espalhamento elástico o nêutron absorvido pelo núcleo forma um núcleo composto que libera um nêutron com energia igual à energia incidente, conforme a reação :



O processo de espalhamento inelástico é energeticamente possível apenas para nêutrons rápidos. Na reação $(n,n\gamma)$ o núcleo composto formado emite um nêutron com uma energia menor que a do incidente, ficando em estado excitado:



A espécie ${}^A_ZX^*$ normalmente decai emitindo um ou mais γ até atingir a estabilidade. Na reação (n,n) o núcleo fica em estado meta-estável.

Para um nêutron incidente com energia de 10 MeV ou maior, ocorre a reação (n,2n) como mostra a equação abaixo:



Para os processos em que ocorrem emissão de partículas carregadas as principais reações são mostradas a seguir:



III-4.2 - Seção de Choque para Nêutrons⁽³⁸⁾

A probabilidade de ocorrer uma reação com uma determinada partícula é dada pela seção de choque da reação e é função da energia da partícula.

Para definir uma seção de choque, considere-se que um feixe de nêutrons monodirecional, monoenergético de energia E e

de intensidade I nêutrons por cm^2 e por segundo, incida em um alvo de área A contendo N átomos por unidade de volume.

A taxa de interação dos nêutrons com os átomos do alvo é dada por:

$$R = \sigma INAX \quad (\text{III-34})$$

onde σ é a seção de choque microscópica para a energia E dos nêutrons e x é a distância percorrida pelo feixe no alvo.

Como I indica a intensidade do feixe de nêutrons por cm^2 e por segundo e N o número de átomos por cm^3 , σ tem a dimensão de cm^2 , portanto também a dimensão de uma área. A grandeza de σ oscila em torno de 10^{-24} cm^2 , de modo que se usa indicá-la na unidade de 10^{-24} cm^2 denominada "barn".

A intensidade do feixe decresce exponencialmente com a distância percorrida pelo feixe no material:

$$\frac{dI}{I} = -\sigma N dx \quad (\text{III-35})$$

Integrando a equação (III-10) tem-se a porcentagem do feixe que não interage na espessura x :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sigma Nx} \quad (\text{III-36})$$

A quantidade $N\sigma$ é designada por Σ e é denominada seção de choque macroscópica. Σ tem a dimensão de cm^{-1} e pode ser considerada como a probabilidade de que um nêutron de energia E reaja com um átomo no percurso de 1 cm. O valor do inverso de Σ indica portanto o comprimento do livre caminho médio dos nêutrons para uma reação.

O valor de N é calculado usando o número de Avogrado A_0 , através da expressão:

$$N = \rho \frac{A_0}{M} \quad (\text{III-37})$$

onde ρ é a densidade em g.cm^{-3} e M a massa atômica do material do alvo.

Até aqui nada foi dito sobre o tipo de interação uma vez que as equações (III-33) a (III-36) possuem validade genérica. Classifica-se portanto cada tipo de reação com a seção de choque correspondente (absorção, espalhamento elástico, espalhamento inelástico, etc.).

A seção de choque macroscópica total do material é a soma de todas as seções de choque para cada reação, portanto:

$$\Sigma_T = \sum_{i=1}^n \Sigma_i \quad (\text{III-38})$$

sendo que Σ_i representa a probabilidade de que a i -ésima reação ocorra.

III-4.2.1 - Seção de Choque Total

Em um campo de nêutrons, a direção dos nêutrons pode ser qualquer uma no ângulo sólido de 4π .

O fluxo escalar de nêutrons é definido como

$$\phi(\vec{r}, E) = n(\vec{r}, E) v(E) \quad (\text{III-39})$$

onde $n(\vec{r}, E)$ é a densidade dos nêutrons com energia E na posição \vec{r} e v é a velocidade dos mesmos. Em um fluxo de nêutrons polinegéticos a taxa de interação pode ser escrita como:

$$R = \int_0^{\infty} \phi(\vec{r}, E) \Sigma(E) dE \quad (\text{III-40})$$

onde $\Sigma(E)$ é a seção de choque para a reação específica.

A contagem registrada em um detector colocado em frente a uma corrente de nêutrons $J(E)$ é dada por:

$$C(o) = \int_0^{\infty} \epsilon(E) J(E) dE \quad (\text{III-41})$$

onde $\epsilon(E)$ é a eficiência do detector, função da energia.

Se em frente ao detector for colocado um meio atenuante de espessura x , a contagem será dada por:

$$C(x) = \int_0^{\infty} \epsilon(E) J(E) e^{-\Sigma(E) \cdot x} \cdot B(x,E) dE \quad (\text{III-42})$$

onde $B(x,E)$ é o fator de empilhamento que leva em consideração as contagens devido ao espalhamento múltiplo no meio.

Considerando que $\Sigma(E)$ e $B(x,E)$ variam levemente com o espectro de energia dos nêutrons, tem-se que:

$$C(x) = B(x) e^{-\Sigma x} \int_0^{\infty} \epsilon(E) J(E) dE \quad (\text{III-42a})$$

$$C(x) = B(x) e^{-\Sigma \cdot x} \cdot C(0) \quad (\text{III-43})$$

sendo os valores de Σ e $B(x)$ específicos para cada espectro de nêutrons e para cada meio. A seção de choque macroscópica Σ é calculada fazendo-se o limite da equação (III-43) para quando a espessura tende a zero:

$$\Sigma = \lim_{x \rightarrow 0} (\ln B(x) + \ln C(0) - \ln C(x))/x \quad (\text{III-44})$$

$$\Sigma = \lim_{x \rightarrow 0} (\ln (C(0)/C(x)))/x \quad (\text{III-45})$$

Na expressão (III-44) o primeiro termo tende a zero porque $\lim_{x \rightarrow 0} B(x) = 1$.

$$x \rightarrow 0$$

O fator de empilhamento é então dado por:

$$B(x) = (C(x)/C(0)) e^{\Sigma \cdot x} \quad (\text{III-46})$$

III-4.2.2 - Variação de Seção de Choque com a Energia do Nêutron

A determinação precisa das seções de choque para as várias reações possíveis é um problema complexo. Em geral, a seção de choque varia muito com a energia. Por outro lado, a

variação entre os diferentes elementos e os isótopos de um mesmo elemento é geralmente grande.

Em muitos casos a seção de choque pode ser calculada teoricamente. Todavia, na maioria das vezes ela só pode ser obtida experimentalmente, porque os métodos teóricos nem sempre são avançados o suficiente. Geralmente as Comissões de Energia Atômica e a Agência Internacional de Energia Atômica possuem valores tabelados e curvas de seção de choque versus a energia dos nêutrons. A figura (III-7) mostra as curvas de variação da seção de choque com a energia do nêutron para várias reações.

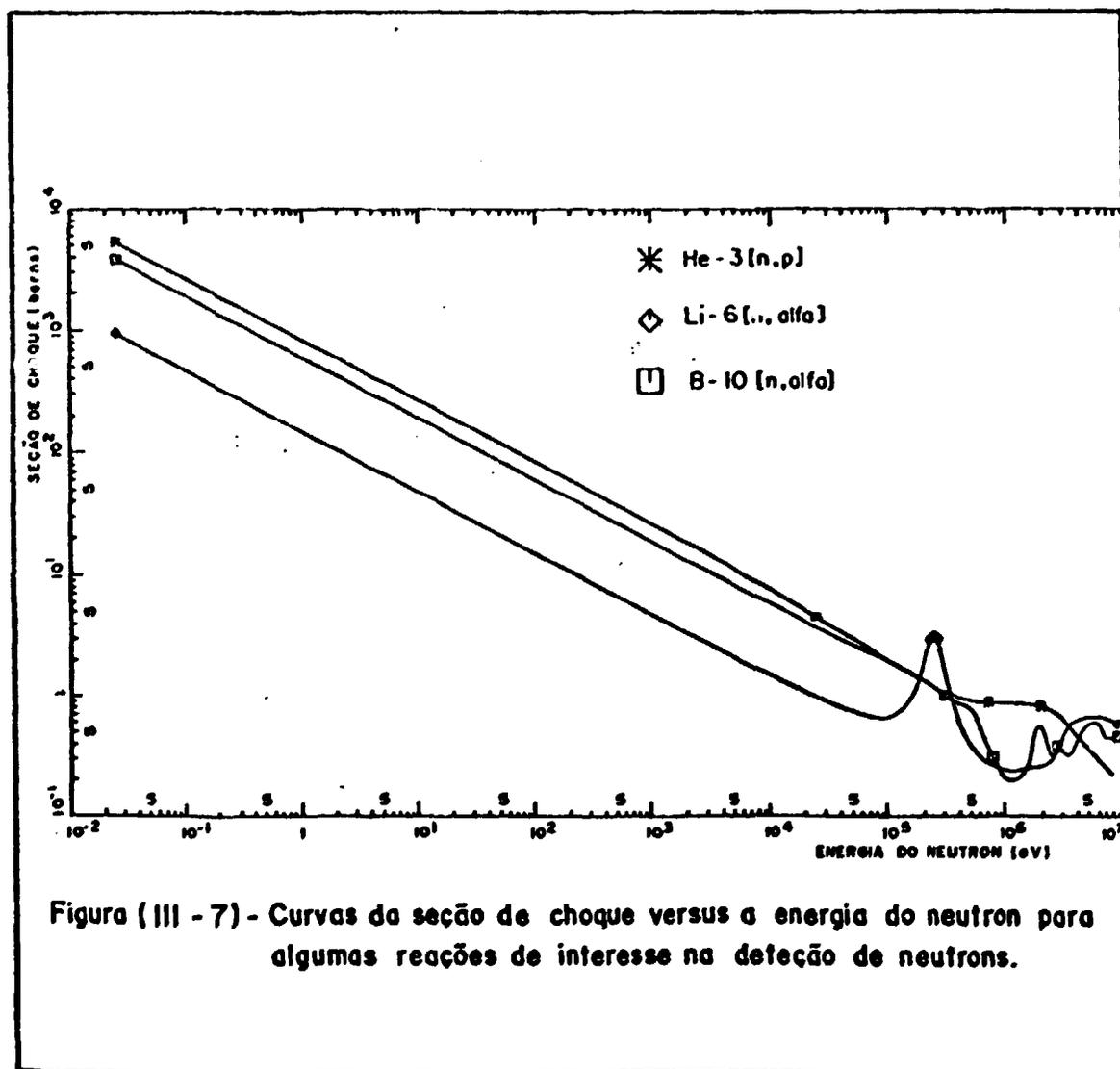


Figura (III - 7) - Curvas da seção de choque versus a energia do nêutron para algumas reações de interesse na detecção de nêutrons.

III-4.3 - Moderação de Nêutrons

Os nêutrons rápidos e os epitérmicos tem a tendência de serem moderados ou termalizados por processos de espalhamento. O espalhamento pode ser elástico ou inelástico. Em um sistema com grande capacidade de moderação, no qual a seção de choque para os processos de espalhamento é grande comparado com os de captura, uma grande quantidade de nêutrons são moderados atingindo o equilíbrio térmico com o meio antes de serem absorvidos. O meio empregado para moderação de nêutrons é chamado moderador. Os materiais que contêm grande quantidade de hidrogênio são excelentes moderadores. A água e a parafina são exemplos típicos.

O espalhamento inelástico é um importante mecanismo na degradação da energia dos nêutrons rápidos. A seção de choque para esse processo aumenta com a energia do nêutron e com o número atômico do material no qual o espalhamento ocorre. Este é um mecanismo importante na blindagem de nêutrons rápidos⁽³⁸⁾.

III-4.4 - Processos de Detecção de Nêutrons

Os vários sistemas de detecção de nêutrons são agrupados de acordo com método geral de detecção usado. Os principais sistemas de detecção são os que usam detectores a gás, cintiladores, semicondutores e emulsões.

Em todas as medidas feitas nesse trabalho utilizou-se um sistema que usa um detector a gás do tipo BF_3 . O processo de detecção com utilização de detectores BF_3 é abordado no apêndice B.

C A P Í T U L O I V

MATERIAIS E MÉTODOS

As experiências apresentadas no presente trabalho foram realizadas no Laboratório de Instrumentação Nuclear da COPPE. As medidas de fração de vazio em escoamento bifásicos e os estudos de identificação de escoamentos foram desenvolvidos em duas montagens distintas.

A primeira montagem teve por objetivo obter curvas de calibração em modelos simulados de lucite para medidas de fração de vazio em escoamentos bifásicos reais de água-ar.

A outra montagem é um circuito com linhas de água e ar, unidas no início da seção de testes por um misturador especial, com a função de propiciar a obtenção dos vários regimes de escoamentos estudados e validar as curvas de calibração.

IV-1 - Montagem Experimental para os Escoamentos Simulados

As medidas de fração de vazios para obtenção das curvas de calibração, foram realizadas em uma seção de testes vertical posicionada em frente a saída do feixe colimado de nêutrons, a uma distância de 32,7 mm da saída do colimador. A seção de testes constitui-se de um tubo de alumínio estrudado de 99,9% de pureza, com $D_i = 25,0$ mm, 2,0 mm de espessura de parede e 270,0 mm de comprimento, montado em um suporte de perfis de alumínio, como pode ser visto nas figuras (IV-1) e (IV-2). O detector de nêutrons, do tipo BF_3 , é sustentado por uma estrutura de perfis de alumínio, que permite girá-lo de -95° a 95° em torno da seção de testes.

Todas as partes da estrutura de alumínio voltadas para o detector de nêutrons foram cobertas com folhas de cádmio de

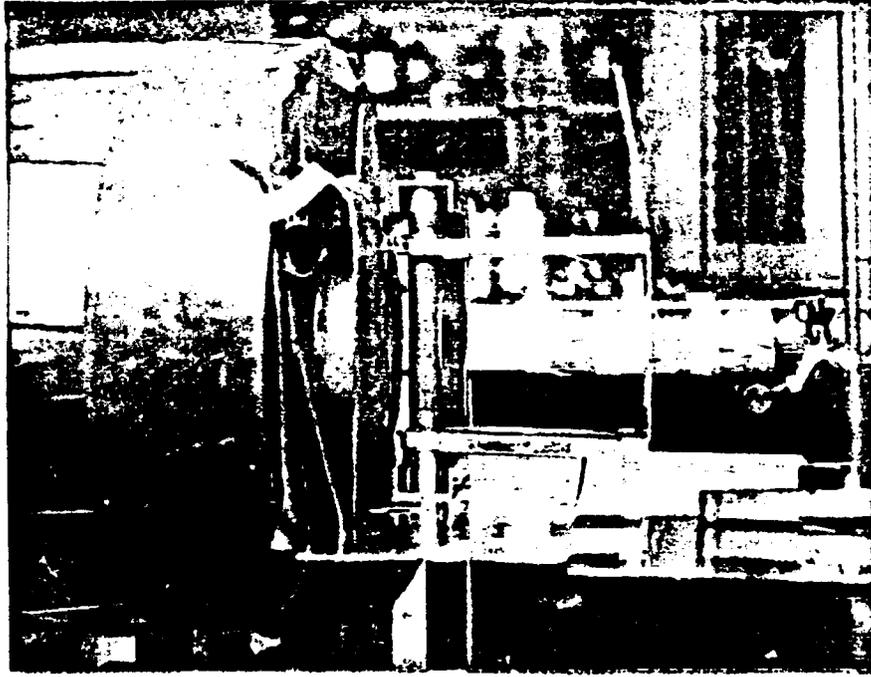


Figura (IV-1) Vista lateral da seção de testes para escoamentos simulados.

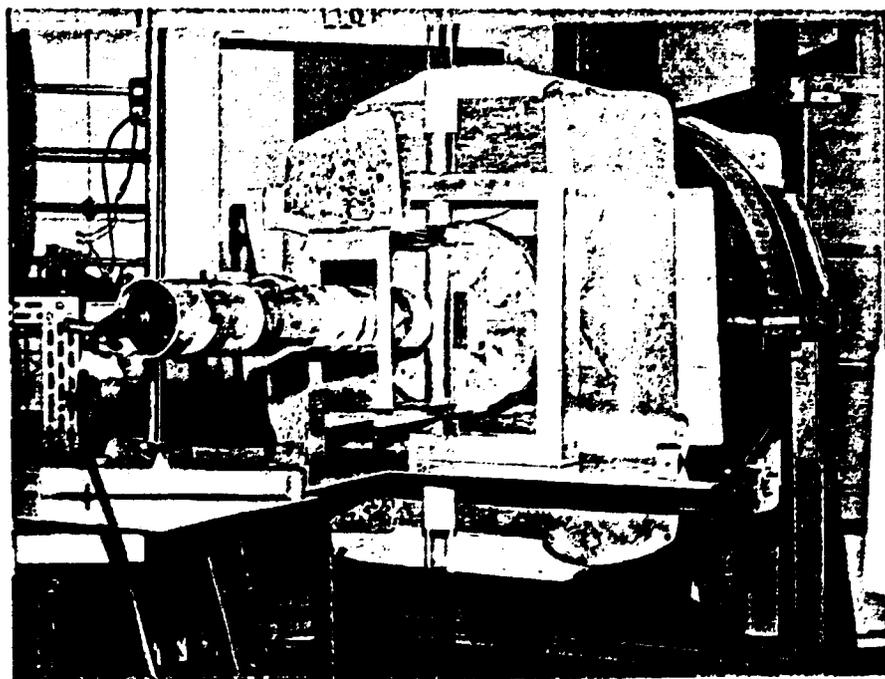


Figura (IV-2) Vista de frente da seção de testes para escoamentos simulados.

1,0 mm para evitar nêutrons parasitas.

O alumínio é praticamente transparente aos nêutrons, interagindo fracamente devido sua baixa seção de choque ($\sigma_T = 1,635$ barns).

A tubulação da seção de testes tem sua extremidade superior aberta e a inferior fechada porém com uma furação de $\phi = 4,0$ mm, para permitir a passagem de uma haste de lucite que movimente um êmbolo também de lucite, figura (IV-3). Tal sistema tem a finalidade de permitir a troca de amostras com grande rapidez e ainda a grande vantagem de se poder oscilar os modelos de lucite no interior da tubulação o que torna mais reais os resultados no caso da simulação do regime a bolsões ("slug").

Todo o sistema da seção de testes está fixado sobre uma mesa de chapa de alumínio de 3,0 mm apoiada na estrutura da fonte de nêutrons.

A medida dos ângulos entre a direção do feixe colimado de nêutrons e o centro do eixo do detector BF_3 é feita através de um cursor que percorre um medidor de ângulos de 190° , com centro coincidente com o eixo da tubulação.

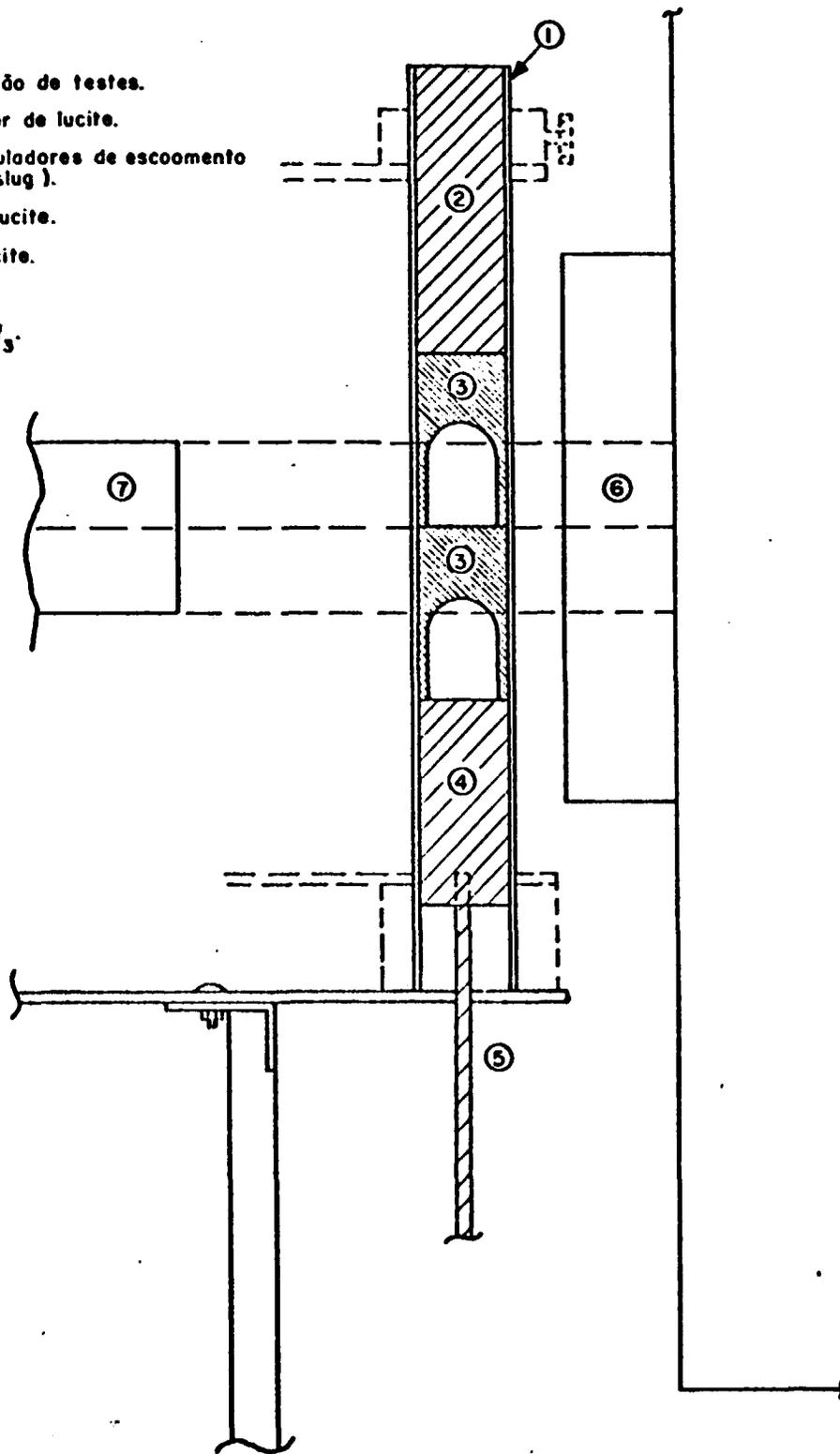
Os modelos de lucite, simuladores dos vários regimes de escoamento foram introduzidos na tubulação de seção de testes conforme o exemplo da figura (IV-3).

IV-1.1 - Modelos Simuladores de Lucite

O escoamento estacionário de água e vapor foi simulado por modelos de lucite e ar para os regimes de escoamento a bolhas, bolsões ("slug"), anular e anular inverso, para várias frações de vazio (α), conforme mostra a tabela (IV-1).

A simulação do escoamento anular inverso foi bastante simples, constando de barras cilíndricas de lucite de 100,0 mm de comprimento com diâmetros equivalentes às colunas da fase líquida para $\alpha = 0,2; 0,4; 0,6$ e $0,8$, figuras (IV-4) e (IV-5). Já

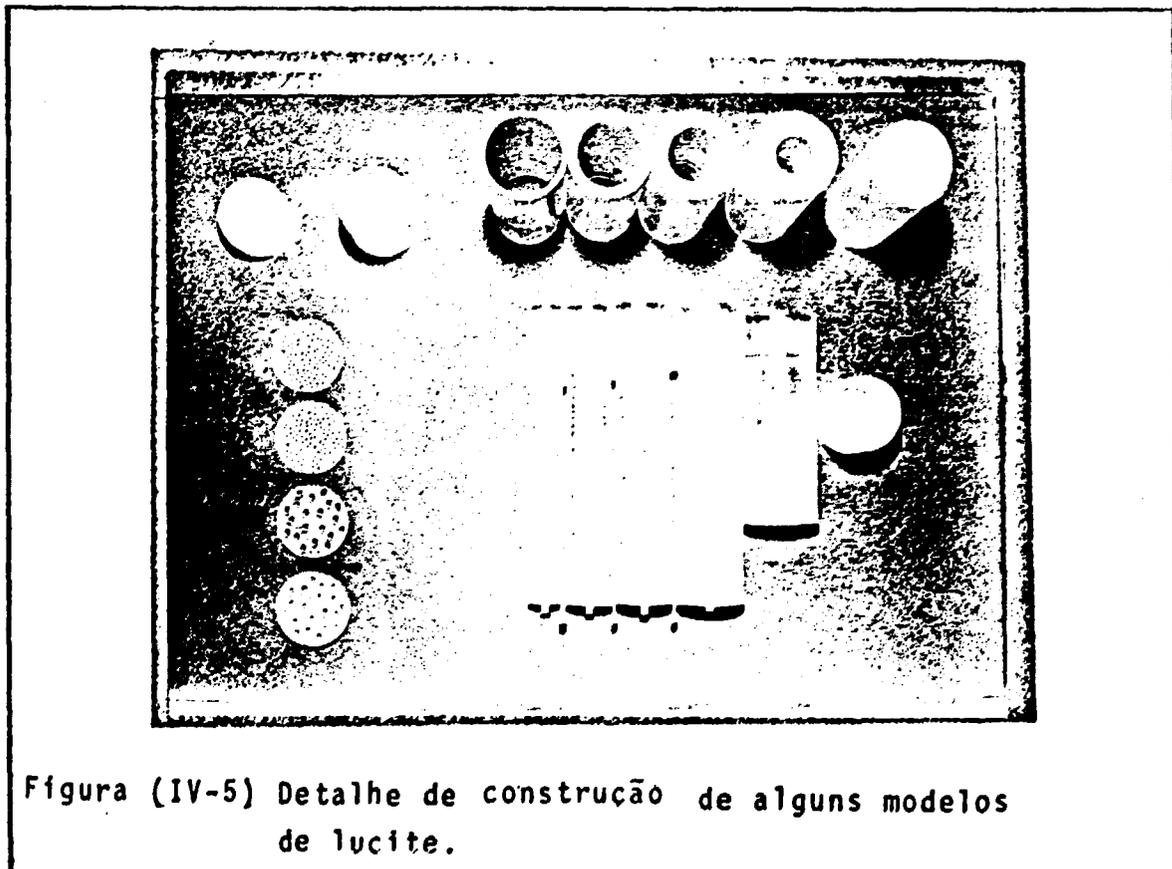
- ① Tubo de seção de testes.
- ② Plug superior de lucite.
- ③ Modêlos simuladores de escoamento a bolões (slug).
- ④ Embolo de lucite.
- ⑤ Haste de lucite.
- ⑥ Colimador.
- ⑦ Detetor Bf_3 .



figura(IV-3)-Detalhe do sistema de troca e oscilação dos modêlos de lucite.

Fração de Vazio (α)	ESCOAMENTO A BOILHAS			ESCOAMENTO A BOLSÕES ("SIUC")			ESCOAMENTO ANULAR		ESCOAMENTO ANULAR INVERSO
	Diâmetro dos riscos	Espessura dos riscos	Diâmetro dos Furos	Diâmetro Externo	Diâmetro do Bolsão	Comprimento do Bolsão	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo
0	25,0	1,0	0	25,0	0	0	25,0	0	25,0
0,05	25,0	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-
0,10	25,0	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-
0,15	25,0	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-
0,20	25,0	2,5	2,5	25,0	19,0	16,5	25,0	11,18	22,36
0,30	-	-	-	25,0	18,0	23,3	25,0	-	-
0,40	-	-	-	25,0	20,0	25,5	25,0	15,81	19,36
0,50	-	-	-	25,0	21,0	29,0	25,0	-	-
0,60	-	-	-	-	-	-	25,0	19,36	15,81
0,8	-	-	-	-	-	-	25,0	22,36	11,18
1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

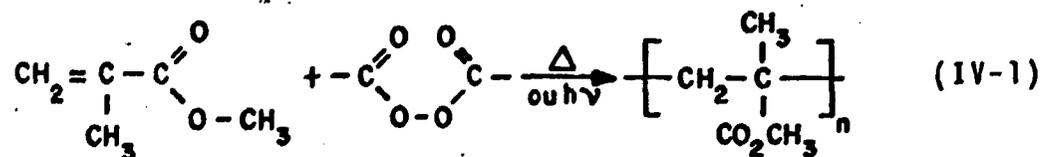
Tabela (IV-1) - Dimensões dos modelos simuladores de lucte. (Em mm).



para o escoamento anular barras cilíndricas de lucite de 100,0mm de comprimento tiveram perfurações axiais circulares simulando a fase gasosa equivalente também às frações de vazão de $\alpha = 0,2$; 0,4; 0,6 e 0,8. A simulação do regime a bolsões ("slug") foi feita com duas barras cilíndricas de lucite de 50,0 mm de comprimento sobrepostas, cada conjunto de duas barras contendo escavações com formato de bolsões de vapor equivalente às frações de vazão $\alpha = 0,2$; 0,3; 0,4, e 0,5. O regime a bolhas foi simulado por discos sobrepostos de lucite com perfurações cilíndricas. Para fração de vazão $\alpha = 0,1$, foram utilizados discos de 1,0 mm de espessura com 125 furos de $\phi = 1,0$ mm. Para $\alpha = 0,2$ disco de 2,5 mm com 20 furos de $\phi = 2,5$ mm. Para $\alpha = 0,05$ e $\alpha = 0,15$, devido as dificuldades de se encontrar chapas de lucite com espessuras inferiores a 1,0 mm e intermediárias entre 1,0 mm e 2,0mm, foram feitas composições de discos perfurados e lisos, tanto de 1,0 mm como de 2,0mm.

O lucite foi escolhido como material de simulação da água, por possuir parâmetros de difusão para nêutrons térmicos com valores próximos aos da água, conforme pode ser visto no apêndice C.

O lucite é um polímero sintético pertencente ao grande grupo dos polímeros por adição. É preparado por polimerização até o estágio de xarope do metacrilato de metila, o qual é por sua vez, derramado nos mais variados moldes, onde a polimerização termina. A reação de polimerização é mostrada a seguir:



Lucite (plexiglass)

IV-2 - Montagem Experimental para Escoamento água-ar

Para as medidas de fração de vazio em escoamentos de água-ar, foi montado um circuito com linhas de água e ar, provido de um misturador especial na entrada da seção de testes, conforme é mostrado na figura (IV-6).

A linha de água está ligada à rede de água do laboratório, sendo constituída de tubo PVC de 12,7mm. A pressão máxima da rede é de aproximadamente 5 bar. A linha possui na entrada um filtro de 20 μm para proteger os equipamentos e evitar que as impurezas em suspensão interfiram nos escoamentos. Possui uma válvula de regulagem, um medidor de vazão (construído e calibrado durante a montagem) e um manômetro.

A linha de ar está ligada à rede de ar comprimido do laboratório, sendo constituída de um tubo de ferro galvanizado de 12,7mm. A pressão máxima da rede é de 8 bar. A linha tem como a anterior, uma válvula de regulagem, um medidor de vazão e um manômetro. No final da linha há uma bifurcação com cada um dos ramos contendo uma válvula de fechamento rápido (de cilindro cônico). Essas válvulas funcionam como reguladores do misturador.

A tubulação de água termina diretamente na entrada da seção de testes, na base do misturador. Quanto que os dois ramos da linha de ar, um deles penetra no centro da tubulação, imprimindo um jato único através de um tubo de cobre com $D_i = 6,4\text{mm}$ e $D_e = 8,0\text{mm}$ enquanto o outro distribui 12 tubos de 4,8mm. Essa rede de tubos tem o objetivo de fazer uma distribuição uniforme do ar, além de simular uma ebulição nucleada na entrada da seção de testes. A furação dos 12 injetores tem diâmetro de 3,0 mm, figuras (IV-7) e (IV-8).

Para a calibração dos vários regimes de escoamento utilizou-se uma seção de testes transparente constituída de tubo de vidro Pyrex com 25,0 mm de diâmetro interno e 2,0 mm de parede.

Para as medidas de fração de vazio do escoamento água-ar a seção de testes foi substituída por um tubo de vidro com

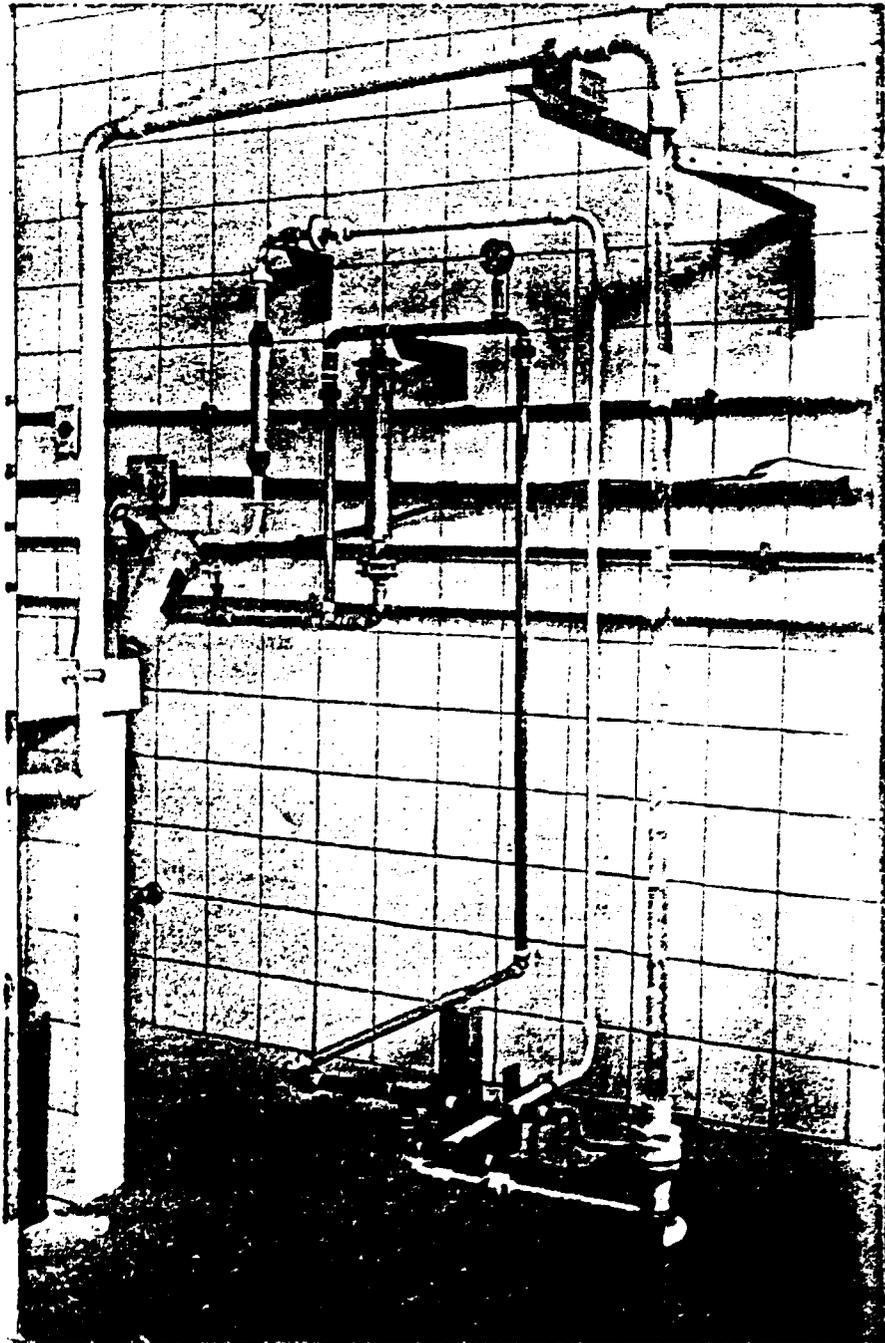


Figura (IV-6) Vista do circuito de água-ar com seção de testes de vidro.

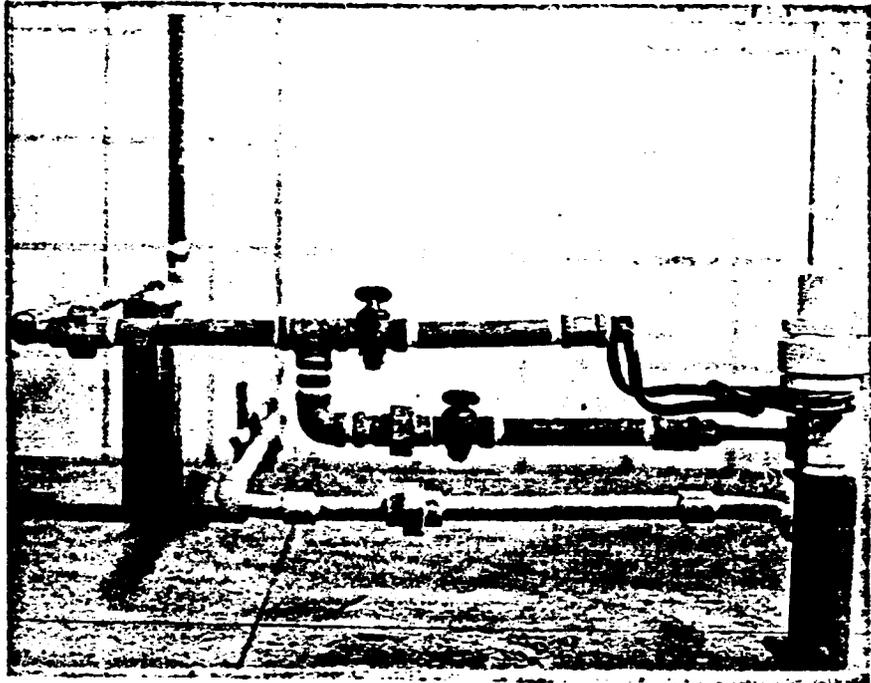


Figura (IV-7) Vista lateral do sistema de distribuição do fluxo de ar.

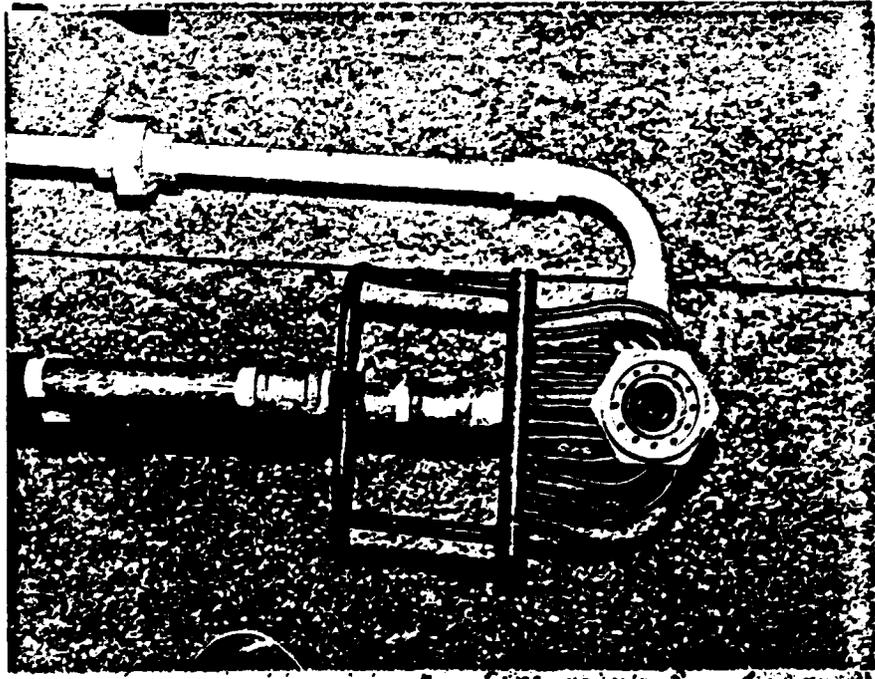


Figura (IV-8) Vista superior do misturador de água-ar.

dimensões idênticas ao anterior, porém com a parte central sendo um tubo de alumínio com 300 mm de comprimento e diâmetro interno e externo iguais ao do vidro, figura (IV-9). A substituição da parte central por alumínio foi necessária por causa da alta concentração de boro ($\sim 12\%$) no vidro Pyrex pois a absorção dos nêutrons pelo boro iria interferir nos resultados.

A seção de testes foi posicionada tal como nas medidas das curvas de calibração, em frente à saída do feixe de nêutrons, respeitando-se as mesmas distâncias anteriores, utilizando-se os mesmos suportes de alumínio e o mesmo sistema de movimentação do detector. Ou seja, a mesma geometria anterior foi repetida, conforme a figura (IV-10).

IV-3 - A Fonte de Nêutrons

No presente trabalho utilizou-se uma fonte isotópica do tipo Am-Be, com atividade de 5 Ci, encapsulada em um envólucro de aço, com um comprimento total de 202 mm e 44 mm de diâmetro externo (figura (IV-11)).

A construção de fontes do tipo Am-Be é fundamentada na reação (α, n), quando as partículas α emitidas pelo amerício $^{241}_{95}\text{Am}$ bombardeiam um alvo apropriado. Muitos materiais podem ser utilizados como alvo. Todavia, a máxima produção de nêutrons é obtida quando se utiliza o berílio. O $^{241}_{95}\text{Am}$ decai para o $^{237}_{93}\text{Np}$, emitindo partículas α de várias energias e com diferente intensidades, sendo que as de maior abundância são as partículas α de energia de 5,486 MeV e 5,443 MeV, com percentagens de emissão de 86% e 12,7% respectivamente, o que perfaz 98,7% para essas duas α . A produção total de nêutrons é basicamente o resultado do bombardeio dessas duas partículas α sobre os átomos de berílio, como mostra a reação:



A meia vida das fontes de Am-Be é de 433 anos, sendo as emissões dos γ de 26,0 keV igual a 2,6% e dos γ de 60 keV igual a 35,4%.

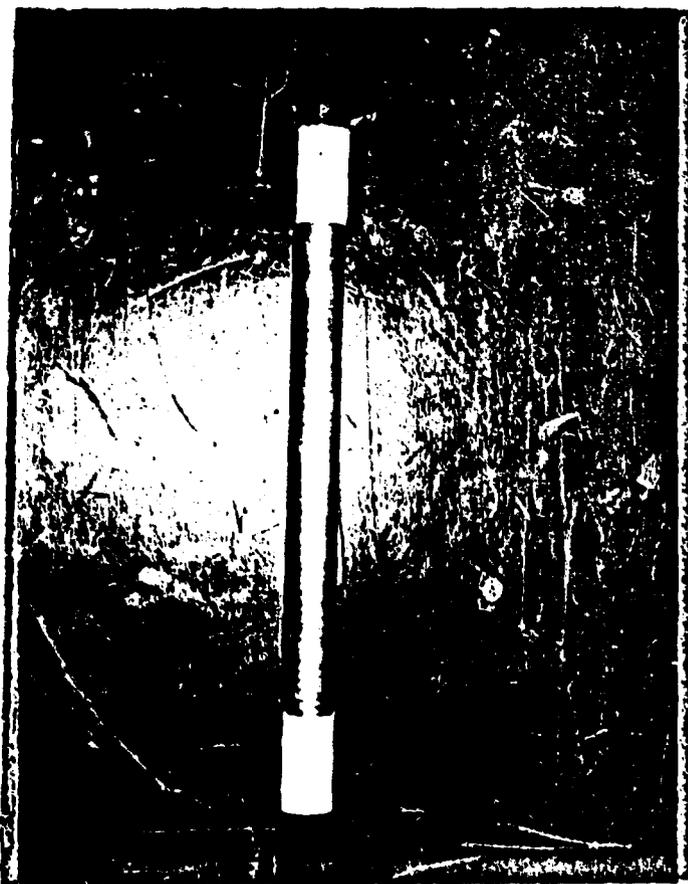


Figura (IV-9) Vista da parte central da seção de teste do circuito de água-ar.

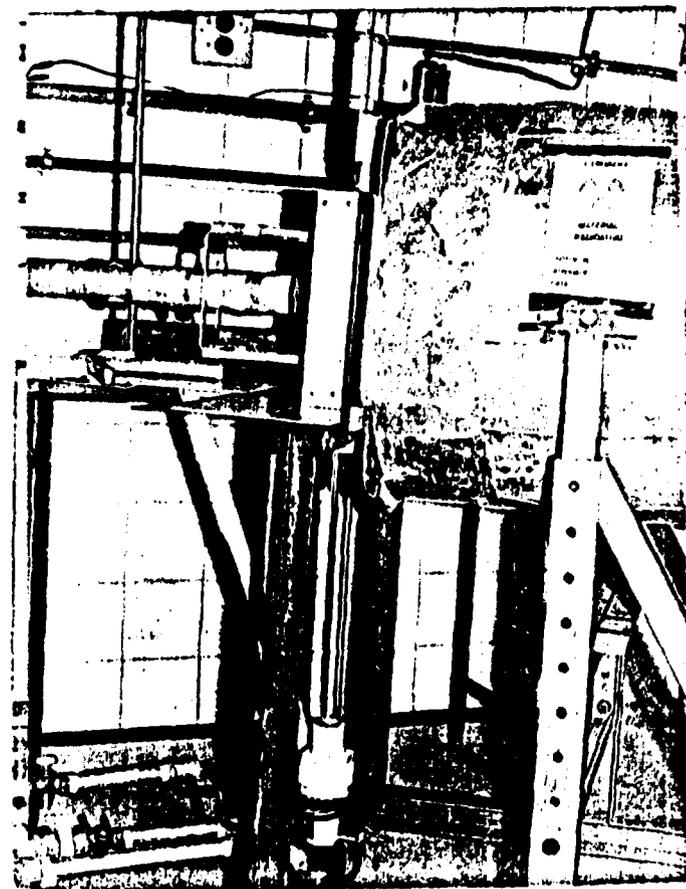
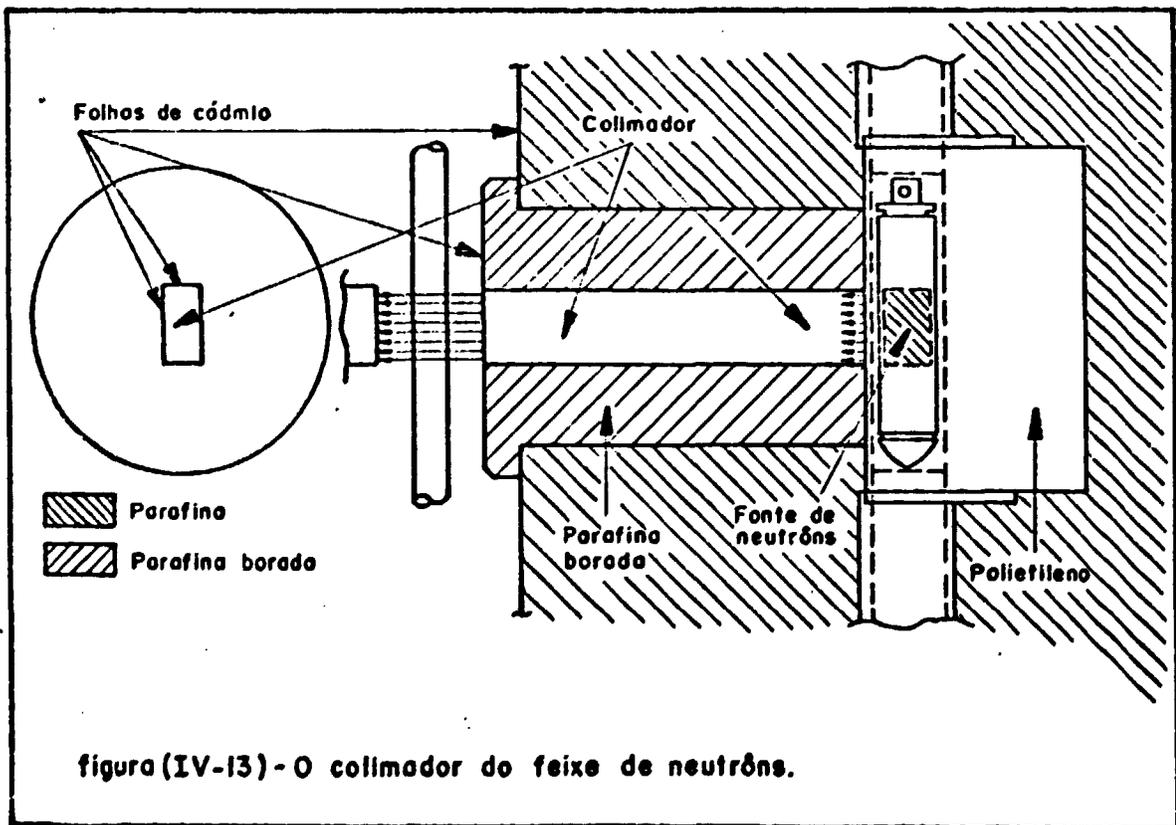
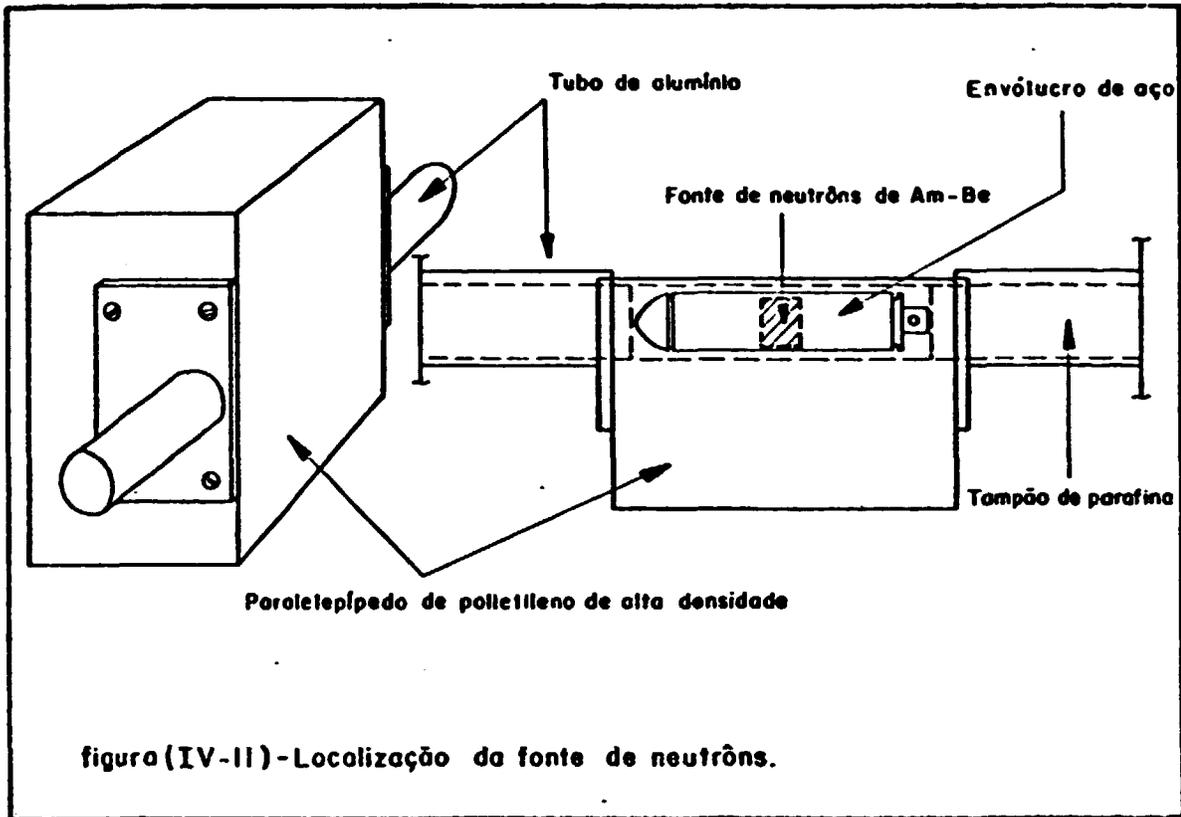


Figura (IV 10) Vista da fonte de nêutrons acoplada à seção de testes do circuito de água-ar.



A fonte de nêutrons foi instalada no interior de um paralelepípedo de polietileno de alta densidade de 240 mm x 240 mm x 144 mm afluando em uma de suas faces, a 2,0 mm da superfície, conforme pode ser visto na figura (IV-11). O paralelepípedo de polietileno, por sua vez, está confinado no centro de um cilindro de parafina de 500 mm de diâmetro por 500 mm de comprimento. Um vaso cilíndrico de alumínio com iguais dimensões protege e sustenta o cilindro de parafina. Toda a parte externa do cilindro de alumínio está coberta com folhas de cádmio de 1,5 mm de espessura, para evitar o escape de nêutrons do moderador que iriam interferir nas medidas e para se ter um nível de radiação ambiental compatível com um laboratório de medidas.

O paralelepípedo de polietileno e o cilindro de parafina constituem o moderador da fonte de nêutrons.

A fonte de nêutrons pode ser introduzida ou retirada do tanque moderador, através de um canal cilíndrico de alumínio perpendicular ao eixo do tanque. O canal da fonte tem suas saídas obturadas por cilindros de parafina, figura (IV-11).

O conjunto fonte-moderador, assim como a seção de testes, são sustentados por uma estrutura de perfis de aço, provida de rodízios, o que torna a fonte de nêutrons bastante versátil, podendo ser deslocada com facilidade. Além disso, as colunas de sustentação do cilindro da fonte são providas de cremalheiras, possibilitando um movimento vertical com amplitude de 600 mm, com o centro do colimador podendo se deslocar desde 600 mm até 1200 mm de altura. O cilindro da fonte pode também girar de 90° em torno de sua meia altura propiciando um feixe colimado de nêutrons desde a horizontal até a vertical. O conjunto da fonte de nêutrons é mostrado na figura (IV-12).

O feixe de nêutrons que alcança a seção de testes emerge do tanque moderador através de um colimador quadrangular paralelo de 53,0 mm x 25,0 mm, com 273 mm de comprimento. O colimador se constitui de uma fenda cavada axialmente a uma peça cilíndrica com 160 mm de diâmetro, de parafina borada (teor de ácido bórico ~ 30%) que penetra axialmente no tanque moderador até a face do paralelepípedo de polietileno onde está localizada a fon

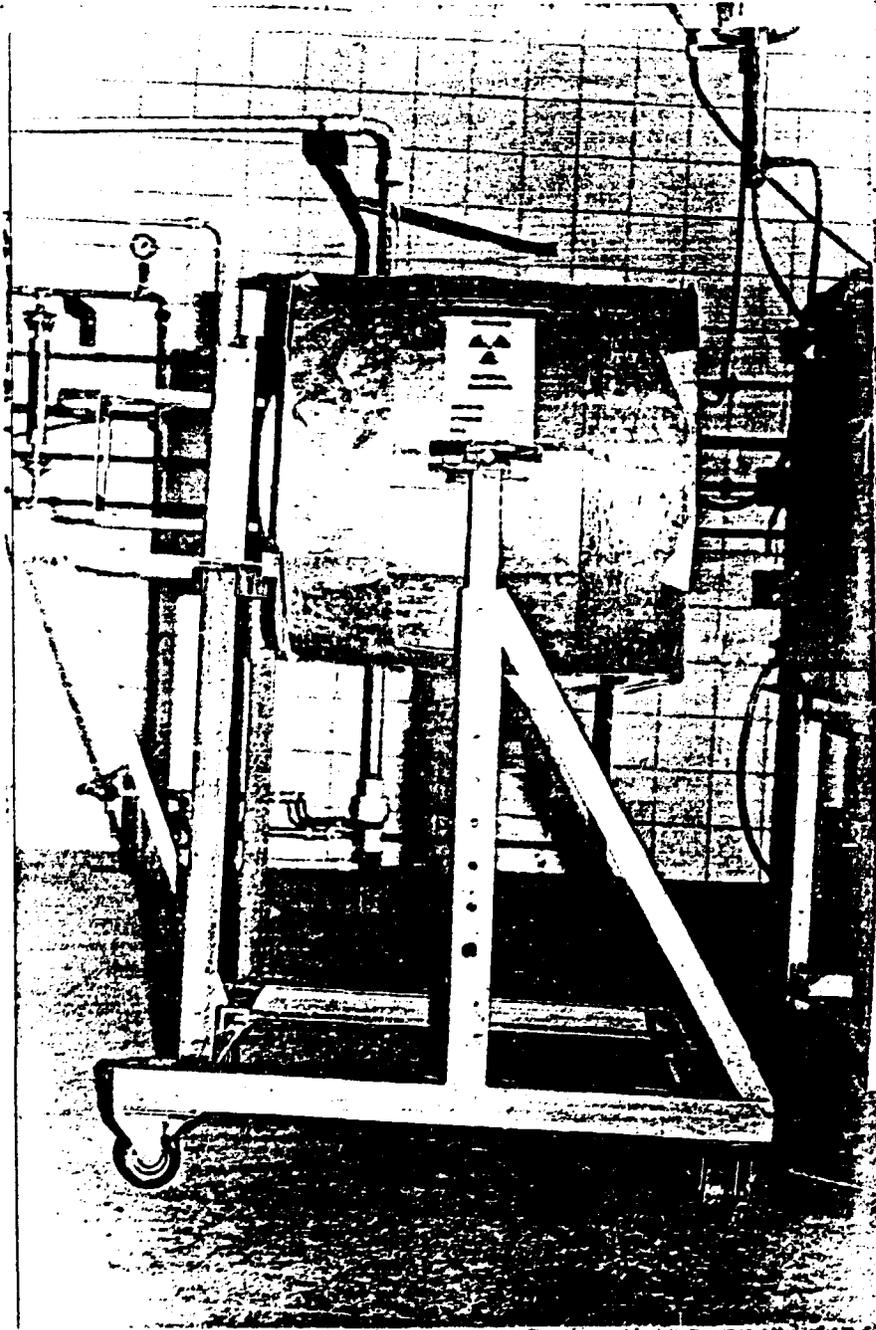


Figura (IV-12) Vista lateral da montagem da fonte de nêutrons.

te de nêutrons, conforme pode ser visto na figura (IV-13).

As paredes do colimador foram forradas com folhas de cãdmio de 1,0 mm de espessura para eliminar nêutrons têrmicos não colimados que poderiam interferir nas medidas experimentais.

IV-4 - O Sistema de Detecção dos Nêutrons

No presente trabalho utilizou-se um detector proporcional do tipo BF_3 de 50,8 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento modelo G-20-12, fabricado pela "Wood Counters Laboratories Chicago". Conforme descrito no apêndice B a reação $^{10}_5\text{B}(n,\alpha)^7_3\text{Li}$ é amplamente utilizada para a detecção de nêutrons têrmicos. A seção de choque da reação é elevada e a dependência com a energia segue a lei $1/v$ num grande intervalo de energia. A reação é fácil de ser detectada, mesmo na presença de alto fluxo de γ , dada a alta ionização específica e a alta energia das partículas carregadas liberadas.

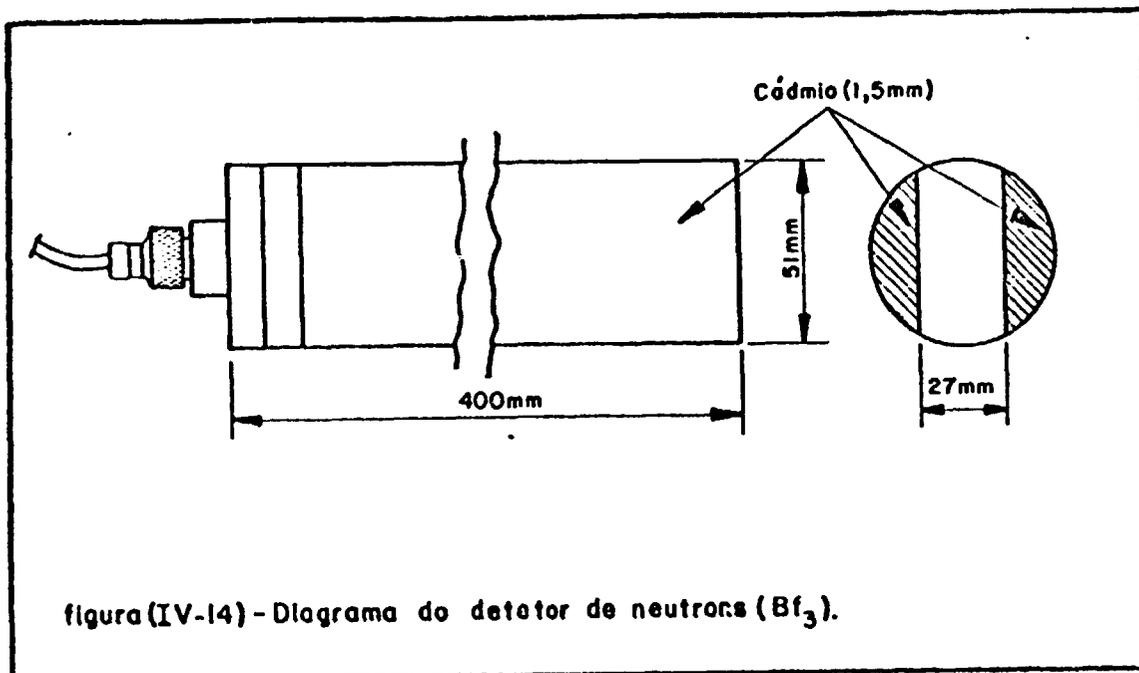
As medidas experimentais foram obtidas com o detector BF_3 na posição horizontal para se obter maior eficiência de contagem. O detector foi inteiramente recoberto com um invólucro de cãdmio com 1,5 mm de espessura, para evitar a interferência de nêutrons têrmicos não oriundos da seção de testes. Apenas uma janela de 27,0 mm de largura foi deixada no topo do detector conforme mostra a figura (IV-14).

A análise dos pulsos provenientes do detector de nêutrons foi feita com a utilização de um sistema convencional conforme pode ser visto no diagrama de blocos da figura (IV-15)⁽³⁸⁾.

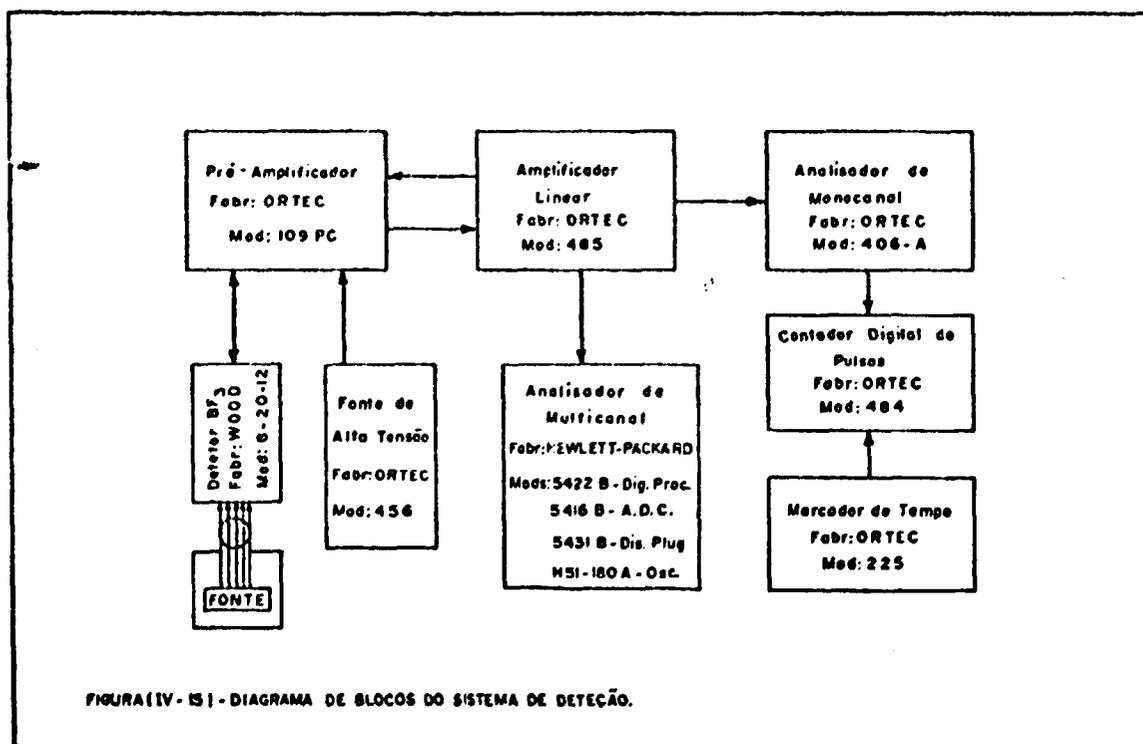
IV-5 - Metodologia

Uma série de calibrações e medidas preliminares foram efetuadas no sistema experimental antes de se realizar as medidas de transmissão e difusão de nêutrons na seção de testes.

As primeiras medidas foram as de calibração do sistema de análise dos pulsos do detector. Uma vez definidos o nível de



figura(IV-14) - Diagrama do detector de neutrons (BF₃).



FIGURA(IV-15) - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE DETECÇÃO.

discriminação do analisador monocanal, para eliminação de ruídos e interferência de radiação γ , o ganho do pré-amplificador e o do amplificador linear, foi levantada a curva característica do detector BF₃. A tensão de operação do detector foi fixada com

base em seu patamar característico (ver apêndice B).

O sistema de encapsulamento da fonte de Am-Be não permite saber o local de maior intensidade de emissão dos nêutrons. Para ajuste desse ponto na direção exata do eixo do colimador realizou-se uma série de medidas.

As medidas da radiação de fundo foram efetuados nos domínios da seção de testes e detector para verificação de sua influência na taxa de contagens, com o objetivo de reduzir interferências nos resultados. A radiação de fundo afeta diretamente as medidas e por isso influi na sensibilidade da técnica de medida de fração de vazio. Para minimizar seus efeitos, como reportado anteriormente, o detector foi recoberto com um invólucro de cádmio. Além disso, toda a parte anterior do tanque moderador e do cilindro de parafina borada do colimador ganharam uma proteção redobrada de folhas de cádmio num total de 3,0 mm de espessura.

Para reduzir o efeito da radiação de fundo devido aos nêutrons rápidos, tentou-se utilizar peças absorvedoras de polietileno de alta densidade no interior do colimador. O objetivo foi alcançado, porém elas não foram usadas porque pioraram enormemente a razão de contraste das medidas de fração de vazio.

As medidas da dose total devido a nêutrons e γ na superfície do tanque moderador foram realizadas pelo serviço de Proteção Radiológica do IEN. Em todo o costado do tanque a dose é de 5 mRem/h. No fundo do tanque 4 mRem/h. Na frente do tanque 5 mRem/h e na saída do feixe 50 mRem/h.

IV-5.1 - Intensidade do Feixe Colimado

O levantamento da intensidade do feixe de nêutrons na saída do colimador é feito fazendo-se uma varredura com o detector BF₃ paralelo ao eixo do colimador, pois o feixe não é uniforme, variando com a posição.

Foram feitas contagens deslocando-se o eixo do de

detector 42,0 mm para cada lado (de 3,0 em 3,0 mm) em relação ao eixo do colimador. O detector, recoberto de cádmio, tinha uma fenda de 27,0 mm para a passagem dos nêutrons.

IV-5.2 - Cálculo da Seção de Choque do Material Atenuante

A seção de choque do material das amostras pode ser medida experimentalmente fazendo-se passar o feixe de nêutrons por diferentes espessuras de lucite e água. Esse trabalho foi realizado por Torres⁽³⁰⁾ que encontrou os seguintes valores:

$$\Sigma_{\text{lucite}} = 2,56 \text{ cm}^{-1} \quad \text{e} \quad \Sigma_{\text{água}} = 2,77 \text{ cm}^{-1}$$

IV-5.3 - Identificação do Tipo de Escoamento

A identificação do tipo de escoamento no interior de uma seção de testes é muito difícil, principalmente para os regimes de transição. Para canais onde a observação visual ou por métodos óticos é possível, essa identificação é relativamente razoável. Contudo isso nem sempre é possível, como por exemplo nos canais aquecidos a altas temperaturas.

Para a identificação entre os regimes anular e anular inverso a utilização de máscaras parciais e janelas de cádmio colocadas na saída do colimador dá um bom resultado. As máscaras parciais de cádmio, com pelo menos 2,0 mm de espessura, devem ter larguras equivalentes ao diâmetro da fase gasosa que escoo no interior da tubulação, equivalentes às frações de vazio pré-fixadas, como por exemplo $\alpha = 0,4, 0,5, 0,6$, etc. Pelo mesmo raciocínio as janelas terão larguras idênticas às larguras das máscaras. As contagens são feitas para $\alpha = 0,1 - 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8$ e $1,0$ para os regimes de escoamento anular e anular inverso.

IV-5.4 - Medidas de Transmissão do Feixe de Nêutrons

Para medidas de fração de vazio pela técnica de transmissão de nêutrons, o detector e a seção de testes devem estar perfeitamente alinhados com o eixo do colimador. Esse alinhamento é feito baseado na linha que passa pelo centro do colimador.

Essa linha foi estendida até a mesa de alumínio que sustenta o conjunto da seção de testes. A peça móvel de sustentação do detector de nêutrons foi ajustada junto com o medidor de ângulos para o ângulo de 0° . O ajuste desse ângulo é feito com auxílio de esquadros. A figura (IV-16) mostra o esquema de uma medida de transmissão com nêutrons.

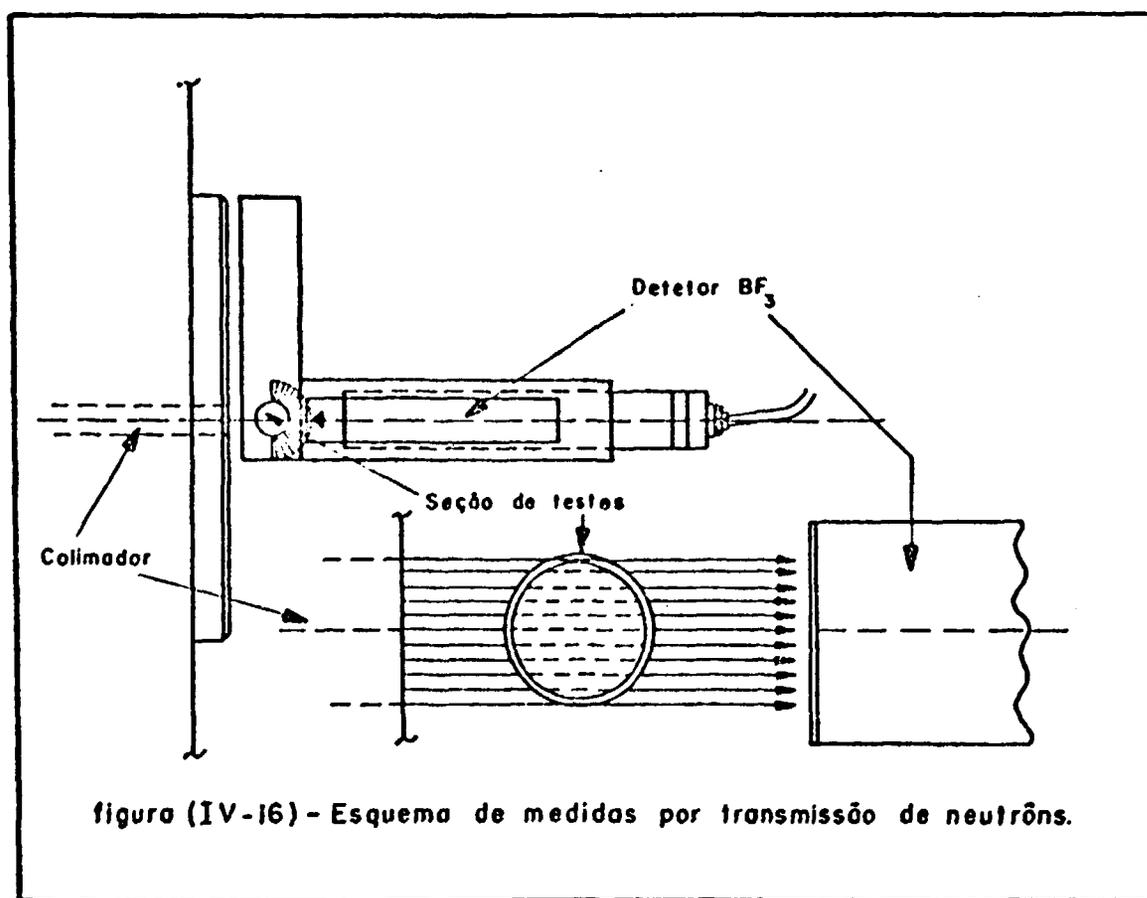


figura (IV-16) - Esquema de medidas por transmissão de neutrões.

Os modelos de lucite-ar são introduzidos na seção de testes e as contagens foram obtidas pela média de três contagens de 5 minutos cada. A radiação de fundo foi medida com igual intervalo de tempo, com o colimador obturado por uma peça de parafina e a saída deste recoberta por folha de cádmio de 3,0 mm. Dessa maneira o detector não mais contou nêutrons que escapavam pelo colimador, mas apenas os nêutrons que escapavam por toda a blindagem e que estavam interferindo nas medidas.

A contagem líquida C_L , ou seja, a contagem devido aos

nêutrons que passam pela seção de testes (nêutrons colimados) é obtida pela diferença entre a média das contagens totais C e a média das contagens da radiação de fundo C_B .

$$C_L = C - C_B \quad (IV-3)$$

Considerando que a estatística das medidas obedece a distribuição de Poisson, o desvio padrão das medidas foi obtido por:

$$\sigma_c = \left[\frac{\sum C}{n^2} \right]^{1/2} \quad (IV-4)$$

onde n é o número de medidas efetuadas e C a média das contagens.

Um estudo da influência do material da tubulação nas curvas de calibração foi efetuado retirando-se a tubulação de alumínio da seção de testes e fazendo-se as medidas diretamente nos modelos de lucite.

A razão de contraste, para as medidas de transmissão, fornece o grau de sensibilidade da técnica aplicada, para os limites máximos do parâmetro avaliado. Este é obtido pela razão entre as medidas de $\alpha = 1$ e $\alpha = 0$.

IV-5.5 - Medidas de Difusão de um Feixe de Nêutrons

As medidas de difusão baseiam-se na probabilidade de espalhamento de um nêutron por um núcleo ser uma função do ângulo de espalhamento. A seção de choque diferencial de espalhamento $\sigma_{ed}(\theta)$ é a probabilidade do nêutron ser espalhado em um certo ângulo θ , dentro de um ângulo sólido Ω . Quando se integra $\sigma_{ed}(\theta)$ ao longo do ângulo sólido, obtém-se a seção de choque de espalhamento do material conforme a equação (IV-5).

$$\sigma_{ed} = \int_0^{4\pi} \sigma_{ed}(\theta) d\Omega(\theta) \quad (IV-5)$$

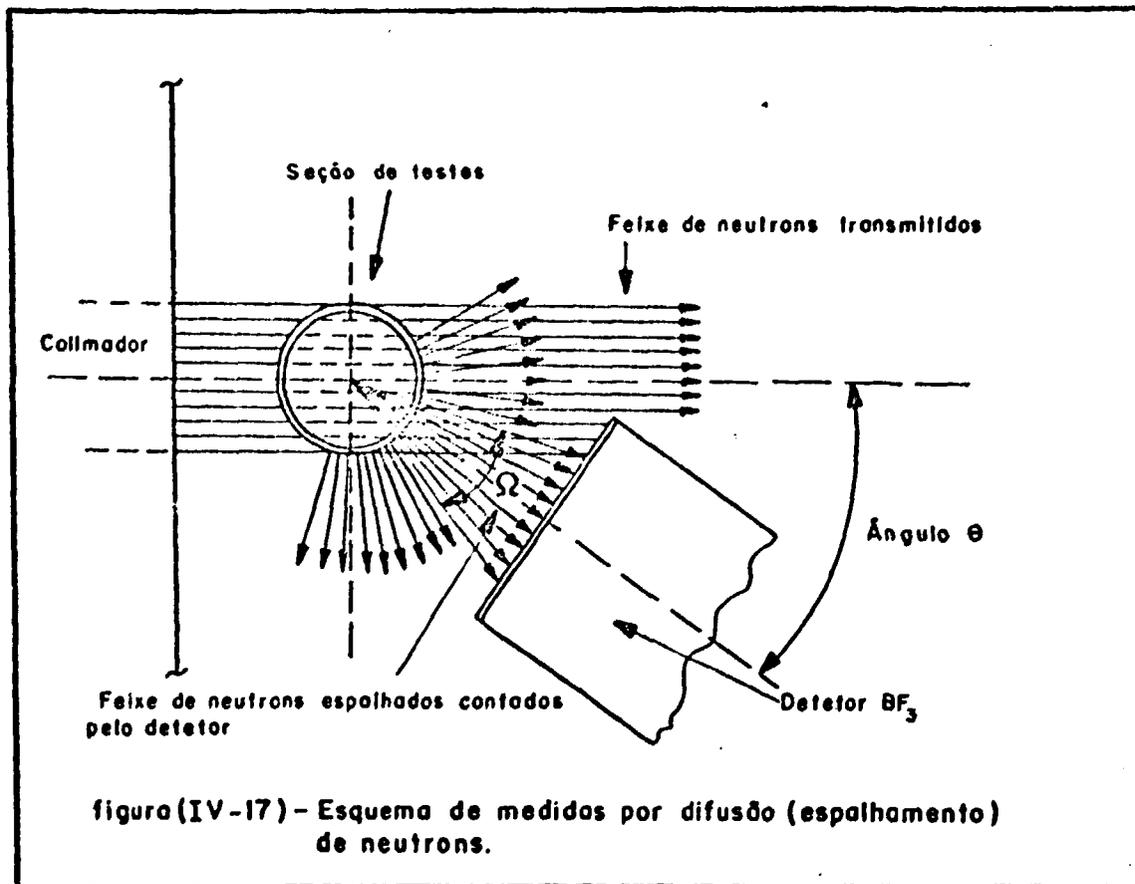
sendo $d\Omega(\theta)$ a diferencial do ângulo sólido como função de θ .

Os materiais hidrogenados tais como a água e o lucite

apresentam uma alta seção de choque de espalhamento diferencial para nêutrons. Quando os nêutrons interagem com esses materiais grande parte sofre reação de espalhamento.

A detecção dos nêutrons espalhados por uma seção de testes contendo um meio hidrogenado, fornece excelentes resultados para medidas de fração de vazios, embora a sensibilidade seja menor que no método da transmissão, porque a razão de contraste é bem menor.

As medidas de espalhamento são realizadas conforme a figura (IV-17).



A quantidade de nêutrons espalhados depende do fluxo de nêutrons do feixe colimado, da espessura do meio e de sua seção de choque de espalhamento. Naturalmente que o material da seção de testes pode influenciar muito se for fabricado, por exemplo, com uma liga de metal base pesado. No presente trabalho, a influência da seção de testes não se faz sentir porque

esta foi confeccionada com tubo de alumínio (de parede fina); material praticamente transparente aos nêutrons.

No presente trabalho, conforme mostrado na figura (IV-17), o detector de nêutrons pode girar de -95° a 95° em torno da seção de testes. O detector está com sua face a 85 mm de distância do centro da seção de testes. Essa foi a distância que apresentou melhor razão de contraste para as medidas tanto de transmissão como de difusão. A seção de testes por sua vez teve melhor posição com seu centro a uma distância de 35 mm da saída do colimador.

As medidas, tal como no método de transmissão foram feitas tirando-se a média de 3 contagens de 5 minutos cada.

Cada contagem líquida foi obtida da diferença entre as médias da contagem total e da radiação de fundo.

As medidas foram feitas desde 0° a 90° em intervalos de 5° em 5° para frações de vazio $\alpha = 0$ e $\alpha = 1$. Pela análise das duas curvas obtidas, foram escolhidos os ângulos que apresentaram os melhores contrastes (maior sensibilidade), e para esses ângulos foram efetuadas medidas com todas as frações de vazios de todos os regimes de escoamento estudados.

IV-5.6 - Medidas na Seção de Testes de Água-Ar

Antes de se efetuar medidas de fração de vazios na seção de testes de água e ar com mistura bifásica, em escoamento não estacionário, foi realizada uma série de calibrações com o objetivo de se determinar os parâmetros de escoamento para cada regime. Uma vez estabelecidos esses parâmetros e a identificação de cada regime bem definida, as frações de vazio foram medidas e os resultados submetidos a comparações com as curvas de calibração já obtidas, com os modelos simulados de lucite.

Devido à falta de uma instrumentação adequada para leituras finas de vazão e pressão, e principalmente das oscilações de cada fase, o fluxo volumétrico médio das fases foi calculado

com base na vazão de cada fase separada.

Para se determinar o erro em cada medidor de vazão utilizado foi considerada a vazão devida à metade da menor divisão de cada escala. Nos valores calculados da fração de vazio foi considerada a propagação do erro das medidas em cada fase.

A medida do fluxo volumétrico de cada fase foi recalculada para cada regime de escoamento, devido às variações de pressão.

Os regimes de escoamento analisados foram a bolsões ("slug") e anular. O regime anular inverso não pode ser obtido em misturas ar-água, principalmente em condutos sem aquecimento. Ele é característico dos canais a altas temperaturas nas condições de remolhamento. Os regimes de transição, devido à sua instabilidade e complexidade, também não foram analisados.

C A P Í T U L O V

RESULTADOS

Inicialmente fez-se a calibração do sistema de detecção, cujos valores de operação são mostrados na tabela (V-1).

EQUIPAMENTO UTILIZADO	VALORES DE OPERAÇÃO
Pré-Amplificador	Ganho x1
Amplificador linear	Ganho grosso 4
	Ganho fino 4,5
Analisador de Monocanal	Nível Superior 10,0V
	Nível inferior 1,0V
Fonte de alta tensão	2.300 volts (positiva)

Tabela (V-1) Valores de operação dos equipamentos utilizados

Como visto em (IV-5), o sistema de encapsulamento da fonte de Am-Be, utilizadas nas medidas, não permite saber o local exato de maior intensidade de emissão de nêutrons. Para ajuste desse ponto na direção exata do eixo do colimador, a fonte de nêutrons, que tinha sido instalada provisoriamente, foi então deslocada de uma extremidade até a outra, fazendo-se contagens com intervalos de tempo de 5 minutos, com deslocamentos de 10 mm inicialmente. Com a localização da região de maior intensidade, procedeu-se então um deslocamento fino, de 3 em 3 mm, com contagens de 5 minutos. Após a sua identificação, esse ponto foi colocado exatamente na direção do eixo colimador.

V-1 - Calibração das Distâncias do Detector e da Seção de Testes

A sensibilidade dos métodos de transmissão e difusão de nêutrons está no melhor contraste obtido entre as medidas para $\alpha = 1$ e $\alpha = 0$, ou seja, na razão de contraste (RC). Para se obter a melhor razão de contraste, uma série de medidas foi realizada, com deslocamentos tanto da seção de testes como do detector, variando-se suas distâncias em linha reta. Inicialmente, com o detector numa posição fixa a 100 mm da seção de testes, variou-se a distância entre a seção de testes e a fonte de nêutrons, partindo-se da distância mínima possível de 273 mm (que é o comprimento do colimador) até 553 mm, ou seja, até uma distância de 280 mm da saída do colimador. A distância em que se obtve a melhor razão de contraste foi a 33 mm entre a saída do colimador e o centro da seção de testes. Em seguida, variou-se a distância entre o detector e a seção de testes e a melhor distância foi de 72 mm. Todos os deslocamentos foram feitos inicialmente de 10 em 10 mm. Quando a razão de contraste começava a aumentar acentuadamente os deslocamentos passavam a ser de 1 em 1 mm.

V-2 - Medidas do Feixe de Nêutrons na Saída do Colimador

Com o objetivo de se mapear o perfil do feixe de nêutrons nas posições definitivas encontradas para o detector e a seção de testes (nas quais foram realizadas todas as medidas de transmissão e difusão), foi feita uma varredura na direção perpendicular ao eixo do colimador. Partindo-se da direção do eixo do colimador (tomada como 0), as medidas foram realizadas com deslocamentos de 3 em 3 mm até 36 mm, para um lado e para o outro da saída do colimador. Foram feitas as medidas para $\alpha = 1$ e $\alpha = 0$. A janela do detector de nêutrons foi coberta com uma folha de cádmio de 2,0mm de espessura. As medidas foram repetidas para $\alpha = 1$. Os resultados são apresentados na tabela (V-2) e as curvas resultantes na figura (V-1). Os valores das contagens (C) mostrados na tabela (V-2) são a média de 3 contagens de 5 minutos cada uma.

distância em milímetros	Detector com janela				detector coberto com folhas de Cd de 2,0 mm	
	$\alpha = 1,0$		$\alpha = 0$		$\alpha = 1,0$	
	C	σ_c	C	σ_c	C	σ_c
-36	1724	24	1245	20	2255	27
-33	1922	25	1612	23	2374	28
-30	1911	25	1917	25	2476	29
-27	2171	27	2621	30	2655	30
-24	4352	38	2812	31	2854	31
-21	6550	47	2845	31	3180	33
-18	8350	53	3117	32	3341	34
-15	9951	58	3329	33	3376	34
-12	10190	58	2885	31	3390	34
-9	10500	59	2716	30	3396	34
-6	10690	60	2608	29	3375	34
-3	10680	60	2565	29	3403	34
0	10693	60	2553	29	3426	34
3	10762	60	2564	29	3589	35
6	10706	60	2614	30	3416	34
9	10442	59	2721	30	3466	34
12	10181	58	2994	32	3417	34
15	9991	58	3553	34	3398	34
18	8422	53	3220	33	3303	33
21	6881	48	2916	31	2952	31
24	4801	40	2719	30	2802	31
27	2722	30	2521	29	2678	30
30	1976	26	2008	26	2418	28
33	1986	26	1751	24	2247	27
36	1910	25	1272	21	2145	27

Tabela (V-2) Medidas do perfil do feixe de neutrons
a 121,0 mm da saída do colimador

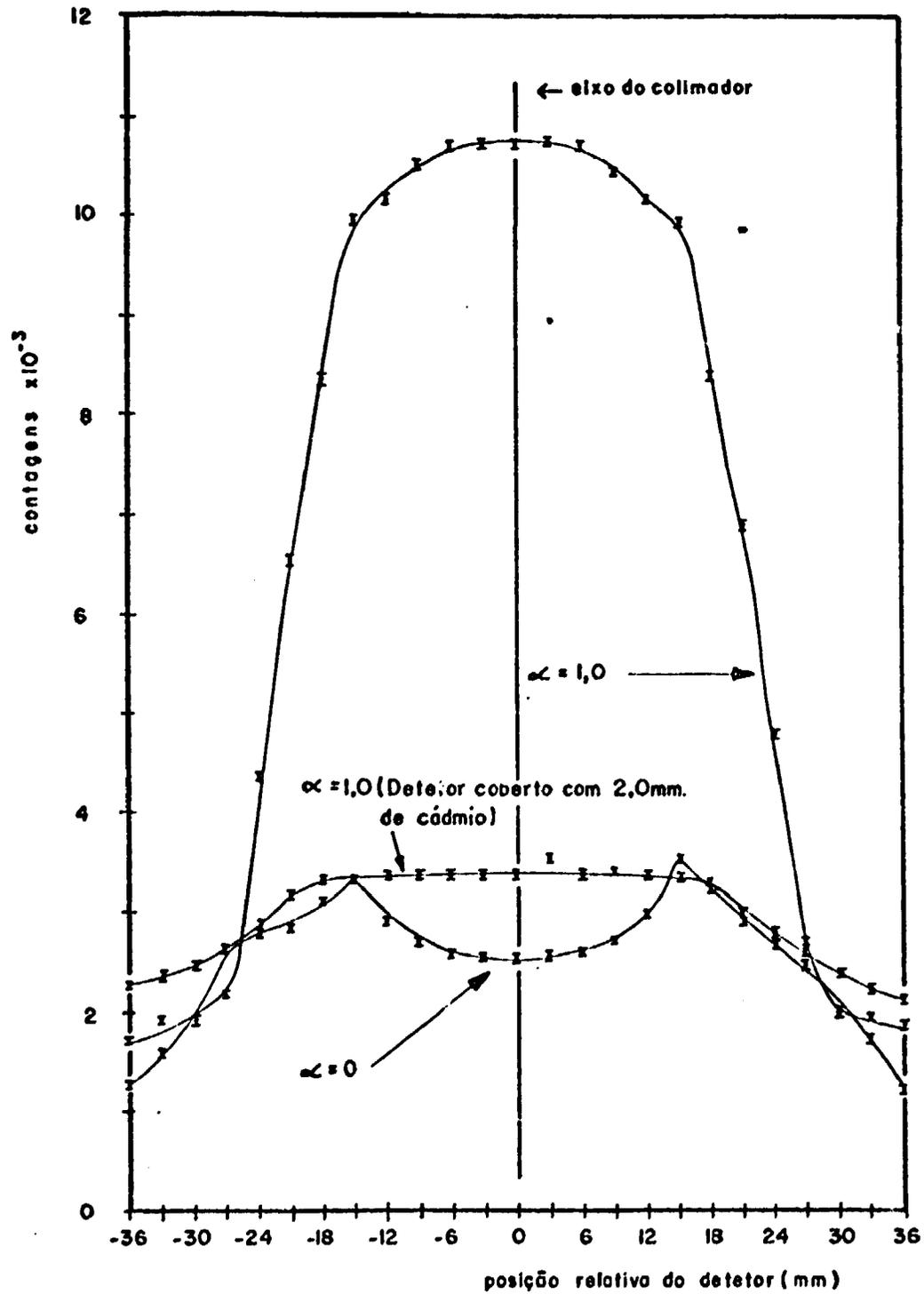


figura (V-1) - Curvas do perfil do feixe de neutrões a 121,0mm da saída do colimador para $\alpha = 1,0$ e $\alpha = 0$.

V-3 - Medidas de Transmissão de Nêutrons em Modelos de Lucite

Como reportado em (IV-5-4), com o ângulo θ ajuntado para 0° , os modelos de lucite foram introduzidos na seção de testes e as contagens registradas em intervalos de 5 minutos. Para todas as medidas apresentadas neste trabalho foram feitas três contagens de 5 minutos e os valores apresentados nas tabelas são a média das três contagens. Essa média é representada por C . Para a radiação de fundo o procedimento foi o mesmo. A média de suas contagens é representada por C_B e a contagem líquida ($C - C_B$) por C_L . Para C , C_B e C_L foram calculados os respectivos desvios σ_C , σ_B e σ_L .

A tabela (V-3) mostra os valores obtidos para os regimes de escoamento a bolhas. A figura (V-2) mostra as respectivas curvas obtidas.

A tabela (V-4) mostra os valores obtidos para os regimes de escoamento a bolsões, anular e anular inverso. As curvas de calibração para os regimes a bolhas, bolsões, anular e anular inverso são mostrados na figura (V-3).

No regime de escoamento a bolhas, para bolhas de 1 mm, as medidas para $\alpha = 0,05$ foram feitas com superposição de discos perfurados e não perfurados de mesma espessura, alternadamente. Para bolhas de 2,5 mm, a obtenção de $\alpha = 0,15$ foi possível com superposição de discos perfurados de 2,5 mm e não perfurados de 1,0 mm. Para o regime de bolhas mistas as frações de vazio $\alpha = 0,05$ e $\alpha = 0,15$ foram obtidas com a composição de discos perfurados de 2,5 mm e 1,0 mm e discos não perfurados de 2,5 mm e 1,0 mm.

Para o regime de escoamento a bolsões, os modelos de lucite deveriam ser oscilados dentro da seção de testes, para se obter um valor de fração de vazio média. De qualquer maneira, as medidas foram feitas com os modelos em três posições diferentes. Uma com o centro do feixe direcionado à altura do centro dos dois modelos, outra com os modelos deslocados de 15 mm para cima e outra com 15 mm para baixo. Os valores apresentados na tabela (V-4) são a média de nove medidas (3 em cada posição).

Para verificar-se o efeito de nêutrons epitérmicos e rápidos, foram feitas medidas com o detector BF_3 totalmente coberto com folhas de cádmio de 2,0 mm de espessura para os regimes de escoamento anular e anular inverso. O resultado são mostrados nas tabelas (V-5) e (V-6) e as curvas resultantes na figura (V-3).

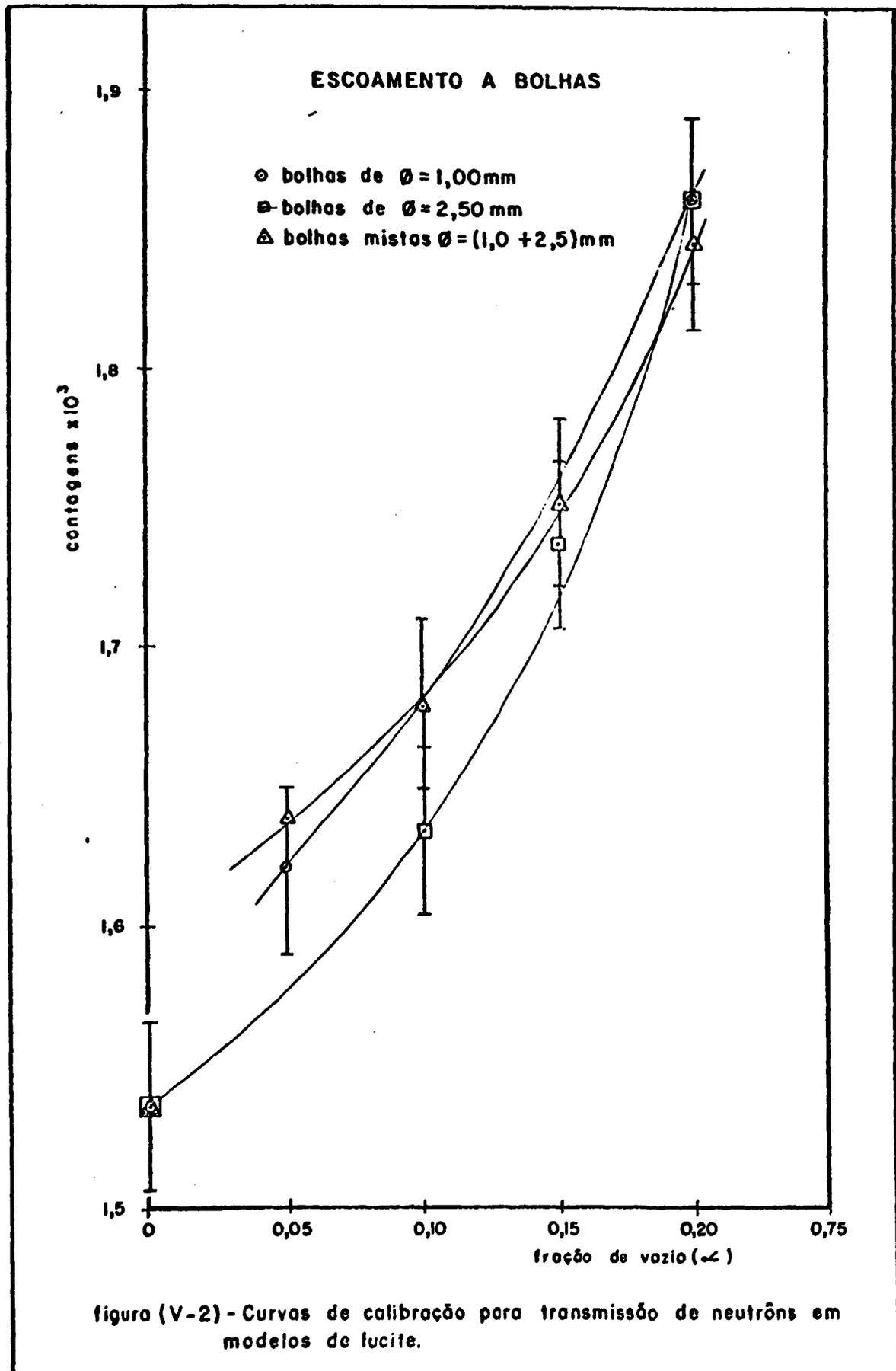
O efeito do material da tubulação (alumínio) nas medidas experimentais foi verificado através de contagens feitas com os modelos de lucite sem a tubulação de alumínio. Devido à dificuldade de se montar os modelos para os regimes a bolhas e bolões sem a tubulação de alumínio, as medidas foram realizadas apenas para os regimes anular e anular inverso. Os resultados são mostrados nas tabelas (V-7) e (V-8). A figura (V-4) compara as curvas das medidas com e sem a tubulação de alumínio para os regimes de escoamento anular e anular inverso.

Para identificação do tipo de escoamento utilizou-se três máscaras parciais de cádmio com 2,0 mm de espessura e larguras de 13,6, 17,7 e 20,4 mm, equivalentes às frações de vazio $\alpha = 0,3, 0,5$ e $0,7$ respectivamente. Foi usada apenas uma janela de cádmio com 17,7 mm de largura equivalente à fração de vazio $\alpha = 0,5$. Os resultados, para os regimes de escoamento anular e anular inverso são mostrados nas tabelas de (V-9) a (V-16) e as curvas resultantes nas figuras (V-5) e (V-6). A figura (V-7) compara os resultados das medidas com máscara de 17,7 mm com os das medidas sem máscara de cádmio, para os regimes anular e anular inverso.

V-4 - Medidas de Difusão de Nêutrons em Modelos de Lucite

Antes de se realizar medidas pelo método de difusão é necessário se fazer uma varredura com medidas com ângulos desde $\theta = 0$ até o maior ângulo possível. Esse procedimento é necessário para se determinar os ângulos cujas contagens apresentam maior razão de contraste, que resultam em maior sensibilidade. A montagem experimental deste trabalho não permitiu medidas com ângulos superiores a 90° . As contagens foram feitas para frações de vazio $\alpha = 0$ e $\alpha = 1$. As contagens médias (C), resultam

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2454	29	918	17	1536	34
0,05	2546	29	924	18	1622	34
0,10	2608	29	926	18	1682	34
0,20	2793	31	933	18	1860	36
A-Bolhas de $\phi \approx 1,00$ mm						
α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2454	29	918	17	1536	34
0,10	2559	29	925	18	1634	34
0,15	2664	30	927	18	1737	35
0,20	2794	31	929	18	1865	36
B-Bolhas de $\phi \approx 2,50$ mm						
α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2454	29	918	17	1536	34
0,05	2564	29	925	18	1639	34
0,10	2604	29	926	18	1678	34
0,15	2680	30	928	18	1752	35
0,20	2781	30	934	18	1847	35
C-Bolhas Mistas: $\phi \approx 1,00$ e $\phi \approx 2,50$ mm						
Tabela (V-3) Medidas de transmissão de nêutrons em modelos de lucite <u>Regime de Escoamento a Bolhas.</u>						



	α	C	σ_c	c_B	σ_B	c_L	σ_L
escoamento a bolsões	0	2454	29	918	17	1536	34
	0,2	2704	30	930	18	1774	35
	0,3	3004	32	933	18	2068	37
	0,4	3259	33	935	18	2324	38
	0,5	4142	37	938	18	3204	41
escoamento anular	0	2454	29	918	17	1536	34
	0,2	2628	30	925	18	1703	35
	0,4	3025	32	930	18	2095	40
	0,6	3876	36	934	18	2942	40
	0,8	5769	44	941	18	4828	48
	1,0	10.614	59	956	18	9658	62
escoamento anular inverso	0	2454	29	918	17	1536	34
	0,2	2822	31	921	18	1901	36
	0,4	3603	35	928	18	2675	39
	0,6	4714	40	932	18	3782	44
	0,8	6653	47	939	18	5714	50
	1,0	10.614	59	956	18	9658	62

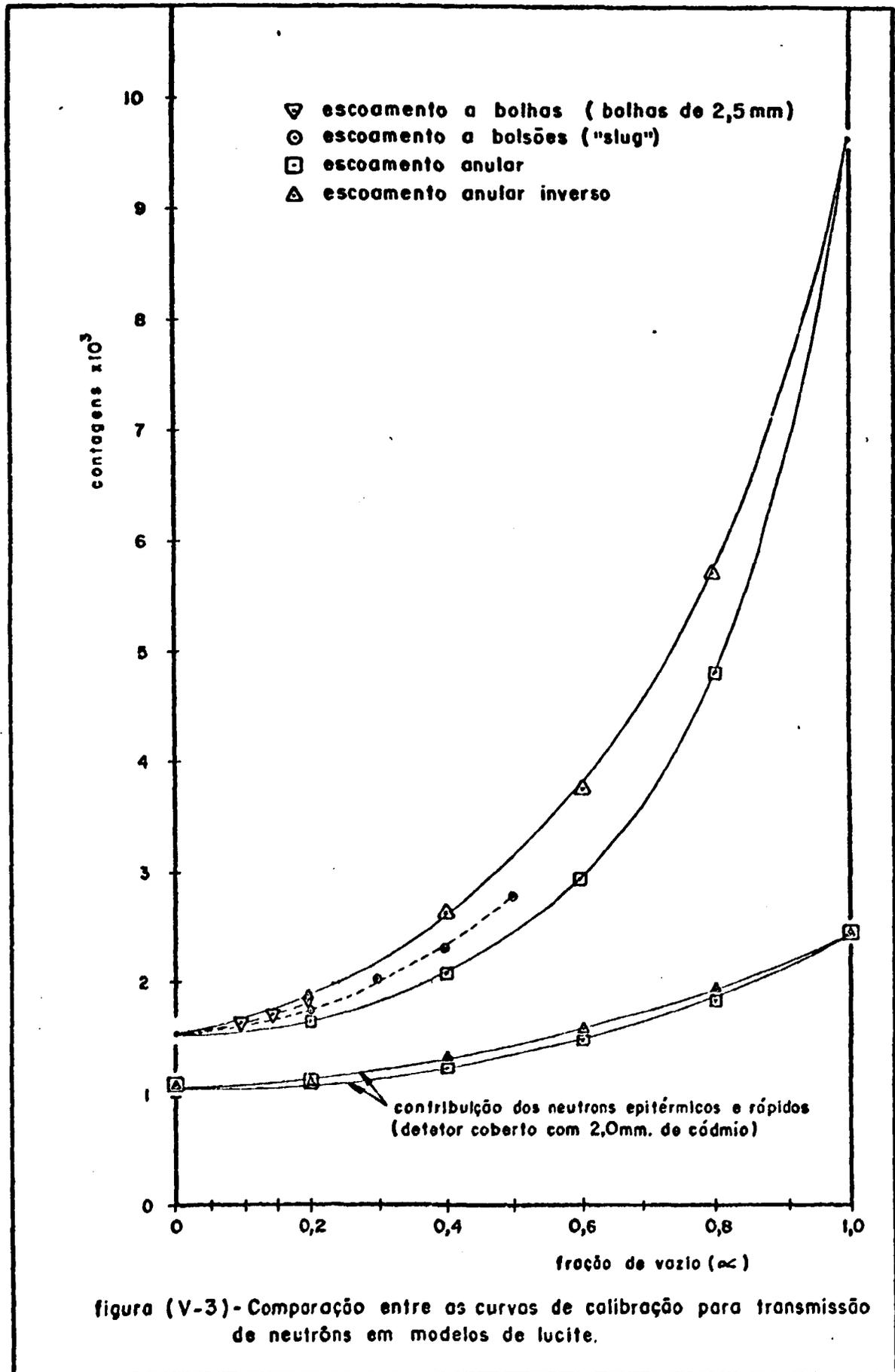
Tabela (V-4) Medidas de transmissão de neutrons em modelos de lucite para os regimes a bolsões, anular e anular inverso.

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2028	26	946	18	1082	32
0,2	2096	26	951	18	1145	32
0,4	2214	27	964	18	1250	32
0,6	2531	29	976	18	1555	34
0,8	2820	31	976	18	1844	36
1,0	3450	34	987	18	2463	38

Tabela (V-5) Medidas de transmissão de nêutrons epitérmicos e rápidos em modelos de lucite (detector coberto com folhas de 2,00 mm de cádmio)
Regime de Escoamento Anular

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2028	26	946	18	1082	32
0,2	2102	26	949	18	1153	32
0,4	2302	28	962	18	1340	33
0,6	2565	29	973	18	1592	34
0,8	2925	31	974	18	1951	36
1,0	3450	34	987	18	2463	38

Tabela (V-6) Medidas de transmissão de nêutrons epitérmicos e rápidos em modelos de lucite (detector coberto com folhas de 2,00 mm de cádmio)
Regime de Escoamento Anular-Inverso.

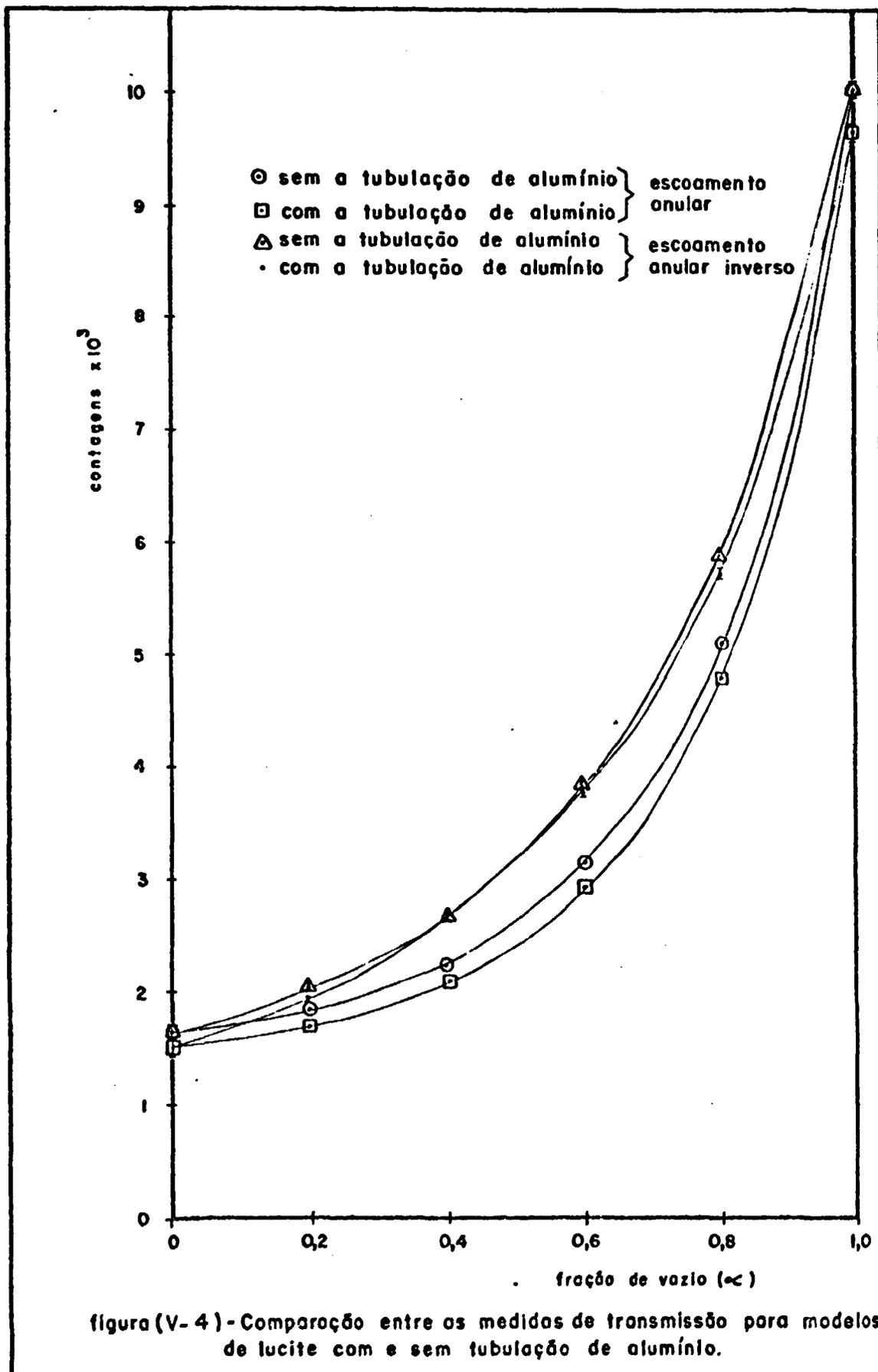


α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2581	29	925	18	1656	34
0,2	2817	31	927	18	1890	36
0,4	3203	33	950	18	2253	38
0,6	4077	37	956	18	3121	41
0,8	6057	45	962	18	5095	48
1,0	10994	61	982	18	10.012	64

Tabela (V- 7) Medidas de transmissão de nêutrons
em modelos de lucite, sem a tubulação de
alumínio.
Regime de Escoamento Anular

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2581	29	925	18	1656	34
0,2	3006	32	926	18	2080	37
0,4	3613	35	934	18	2679	39
0,6	4874	40	941	18	3883	44
0,8	6849	48	947	18	5902	51
1,0	10.994	61	982	18	10012	64

Tabela (V- 8) Medidas de transmissão de nêutrons
em modelos de lucite, sem a tubulação de
alumínio.
Regime de Escoamento Anular-Inverso.



α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2543	29	892	17	1651	34
0,2	2665	30	913	17	1752	34
0,4	2831	31	921	18	1910	36
0,6	3061	32	927	18	2134	37
0,8	3651	35	934	18	2717	39
1,0	5772	44	952	18	4820	48

Tabela (V-9) Medidas de transmissão de nêutrons
em modelos de lucite. Escoamento anular
Máscara de cádmio de 13,7 mm.

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2543	29	892	17	1651	34
0,2	2928	31	919	18	2009	36
0,4	3432	34	926	18	2506	38
0,6	4358	38	932	18	3426	42
0,8	5018	41	941	18	4077	45
1,0	5772	44	952	18	4820	48

Tabela (V-10) Medidas de transmissão de nêutrons
em modelos de lucite. Escoamento anular
inverso
Máscara de cádmio de 13,7 mm.

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2322	29	887	17	1435	34
0,2	2354	28	898	17	1456	33
0,4	2426	28	909	17	1517	33
0,6	2746	30	922	18	1824	35
0,8	3461	34	926	18	2535	38
1,0	4669	39	933	18	3736	43

Tabela (V-11) Medidas de transmissão de nêutrons em modelos de lucite. Escoamento anular. Máscara de cádmio de 17,7 mm.

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2322	28	887	17	1435	33
0,2	3657	35	921	18	2736	39
0,4	4202	37	934	18	3268	41
0,6	4695	40	935	18	3760	44
0,8	4753	40	937	18	3816	44
1,0	4669	39	933	18	3736	43

Tabela (V-12) Medidas de transmissão de nêutrons em modelos de lucite. Escoamento anular inverso. Máscara de cádmio de 17,7 mm.

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2467	29	858	17	1609	34
0,2	2569	29	887	17	1682	34
0,4	2713	30	915	17	1798	34
0,6	3056	32	923	18	2133	37
0,8	3298	33	926	18	2372	38
1,0	4383	38	936	18	3447	42

Tabela (V-13) Medidas de transmissão de nêutrons em modelos de lucite. Escoamento anular. Máscara de cádmio de 20,9 mm.

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2467	29	858	17	1609	34
0,2	2808	31	892	17	1916	35
0,4	3126	32	916	17	2210	36
0,6	3335	33	921	18	2414	38
0,8	3608	35	932	18	2676	39
1,0	4383	38	936	18	3447	42

Tabela (V-14) Medidas de transmissão de nêutrons em modelos de lucite. Escoamento anular inverso. Máscara de cádmio de 20,9 mm.

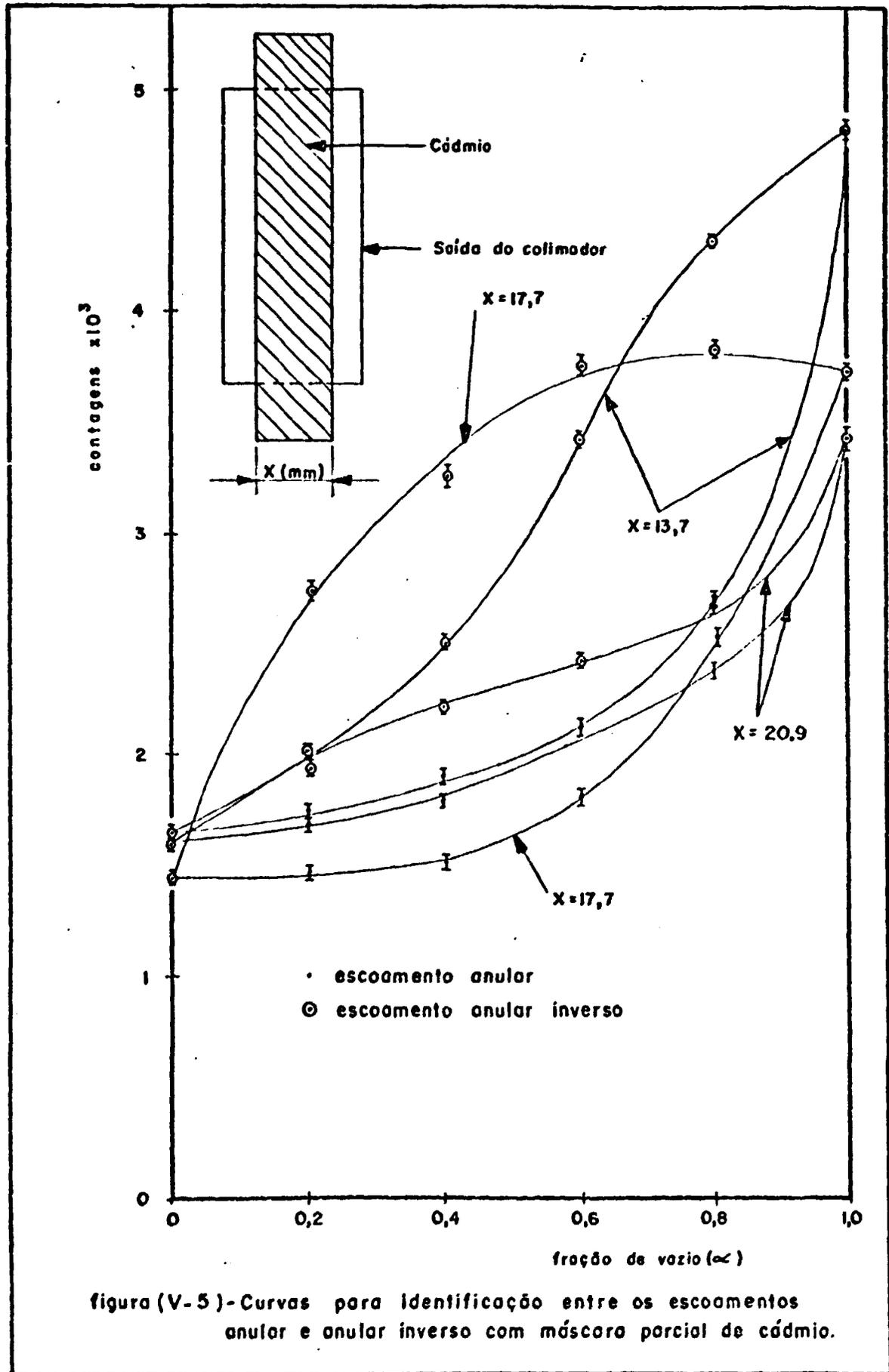


figura (V-5)-Curvas para identificação entre os escoamentos anular e anular inverso com máscara parcial de cádmio.

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2302	29	849	17	1453	34
0,2	2487	29	908	17	1579	34
0,4	2970	31	931	18	2039	36
0,6	3880	36	933	18	2947	40
0,8	5585	43	937	18	4648	47
1,0	9559	56	940	18	8619	59

Tabela (V-15) Medidas de transmissão de nêutrons em modelos de lucite. Escoamento anular Janela de cádmio de 17,7 mm.

α	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L
0	2302	28	849	17	1453	33
0,2	2460	29	914	17	1546	34
0,4	2883	31	919	18	1964	36
0,6	3657	35	927	18	2730	39
0,8	5493	43	933	18	4560	47
1,0	9559	56	940	18	8619	59

Tabela (V-16) Medidas de transmissão de nêutrons em modelos de lucite. Escoamento anular inverso. Janela de cádmio de 17,7 mm.

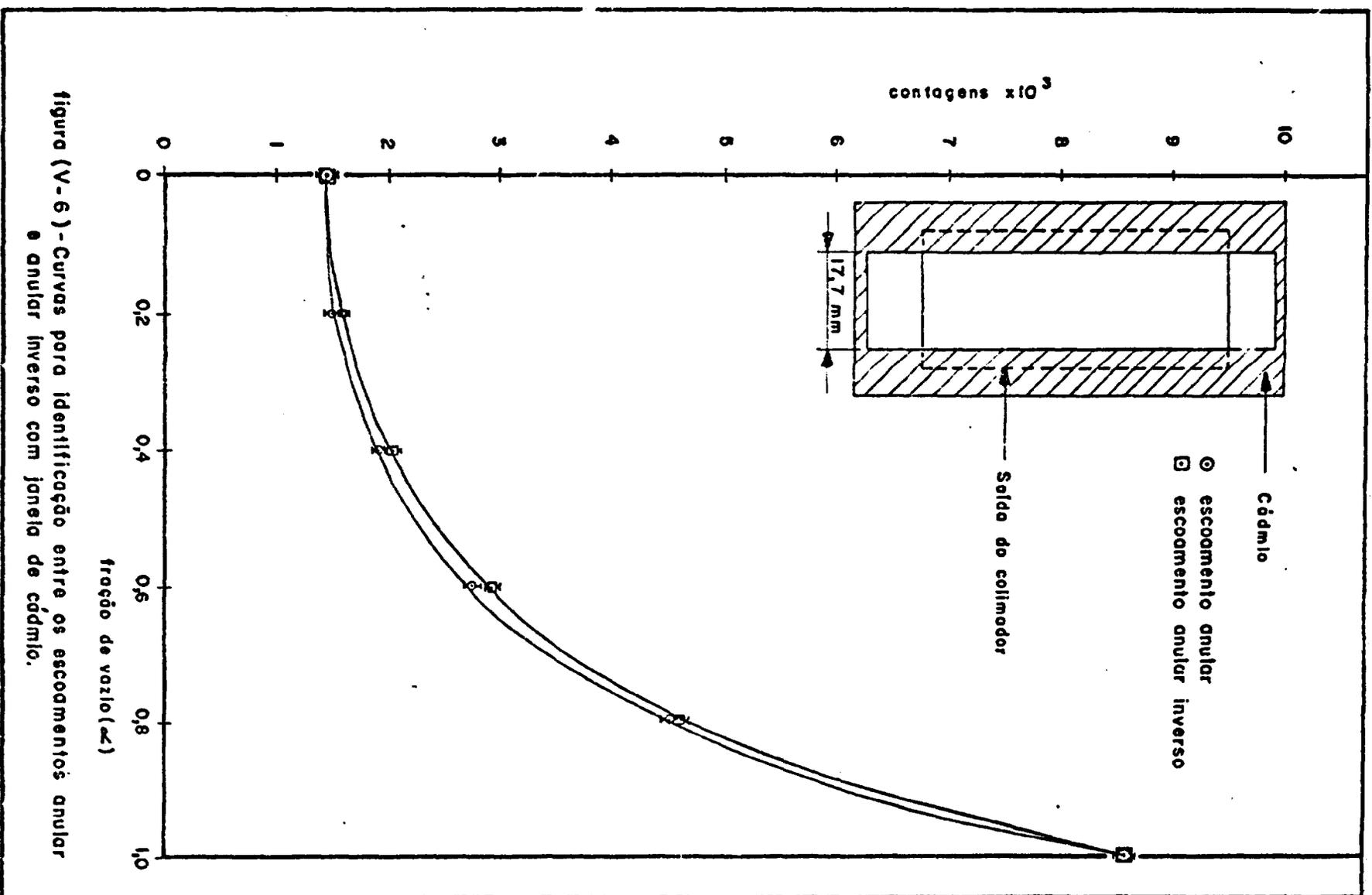
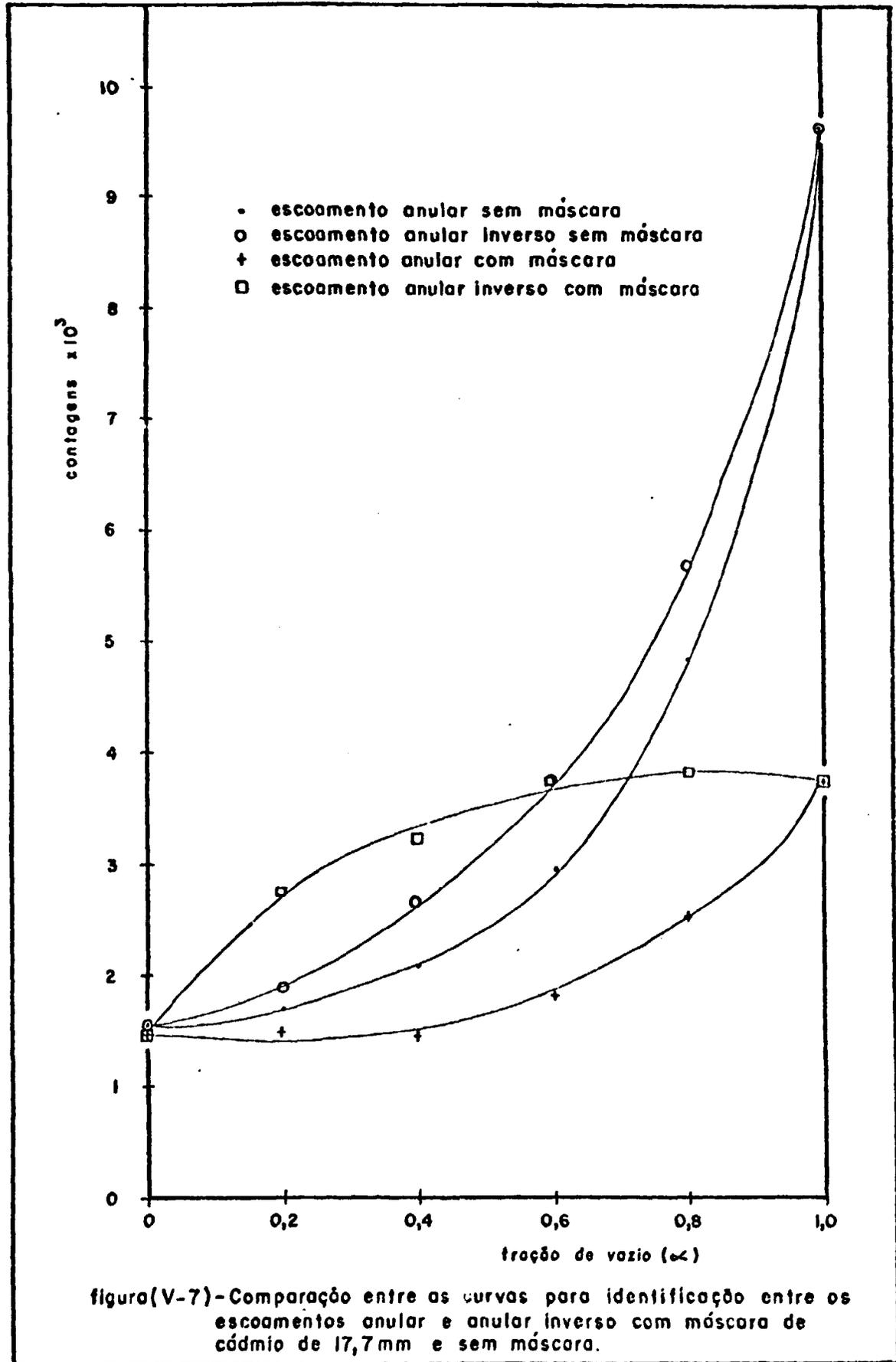


figura (V-6) - Curvas para identificação entre os escoamentos anular e anular inverso com janela de cádmio.



de três contagens de 5 minutos cada. Para a radiação de fundo o procedimento foi o mesmo.

As tabelas (V-17) e (V-18) mostram os valores obtidos para medidas de $\alpha = 0$ e $\alpha = 1$ desde $\theta = 0^\circ$ a $\theta = 90^\circ$. A figura (V-8) mostra a variação angular das contagens. A figura (V-8) mostra também a curva da razão de contraste para esses mesmos ângulos.

Os melhores ângulos são aqueles que apresentaram maior razão de contraste. Naturalmente que numa análise das curvas nota-se de imediato que a maior razão de contraste fica para o ângulo $\theta = 0^\circ$. Todavia, esse ângulo não interessa pois não se trata de difusão. Nas curvas da figura (V-8) a difusão só passa a ter sentido a partir do ângulo $\theta = 17^\circ$, quando cessa totalmente a influência da transmissão. Para o ângulo $\theta = 17^\circ$ as contagens são iguais para $\alpha = 0$ e $\alpha = 1$, havendo cruzamento das curvas. A razão de contraste para esse ângulo é igual a 1.

As tabelas (V-19) e (V-20) mostram os valores obtidos nas medidas de fração de vazio para os regimes anular e anular inverso para os ângulos $\theta = 9^\circ$ e $\theta = 17^\circ$. A figura (V-9) mostra as respectivas curvas obtidas.

A partir de $\theta = 17^\circ$, os ângulos que apresentaram as maiores razão de contraste foram $\theta = 25^\circ$, $\theta = 60^\circ$ e $\theta = 90^\circ$. Para esses ângulos, foram obtidas curvas de calibração para medida de fração de vazio pelo método da difusão de nêutrons. Os resultados são mostrados nas tabelas de (V-21) a (V-23). A figura (V-10) mostra as respectivas curvas obtidas.

V-5 - Medidas de Fração de Vazio no Circuito de Água-ar

Como mencionado em (IV-5.6), os regimes de escoamento analisados foram o a bolsões ("slug") e o anular.

A linha de água do laboratório forneceu durante as medidas uma vazão máxima de (Q_f) de $1,37 \text{ m}^3/\text{h}$. O rotâmetro utilizado para as medidas opera numa faixa de vazão de 0 a $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$. As

Ângulo (θ°)	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L	$RC = \frac{\alpha=0}{\alpha=1}$
0	10.654	60	956	18	9698	63	6,33
5	9.142	55	953	18	8189	58	3,81
9	7.230	49	947	18	6283	52	2,46
10	6.162	45	942	18	5320	48	2,15
15	3.435	34	930	18	2505	38	1,37
17	2.452	29	922	18	1530	34	1,007
20	1.876	25	896	17	980	30	1,284
25	1.513	22	801	16	712	27	1,371
30	1.481	22	808	16	663	27	1,354
35	1.506	22	830	17	676	28	1,371
40	1.512	22	864	17	648	28	1,418
45	1.507	22	898	17	609	28	1,497
50	1.549	23	947	18	602	29	1,568
55	1.565	23	993	18	572	29	1,554
60	1,599	23	1158	20	441	30	1,793
65	1.720	24	1233	20	486	31	1,681
70	1.872	25	1286	21	586	33	1,339
75	1.873	25	1303	21	570	33	1,398
80	1.929	25	1327	21	602	33	1,553
85	2.015	26	1380	21	635	33	1,557
90	2.231	27	1425	22	806	35	1,427

Tabela (V-17) Medidas de difusão de nêutrons para tubulação de alumínio e fração de vazio ($\alpha=1$) em função do ângulo entre o eixo do detector e o eixo do colimador.

Ângulo (θ°)	C	σ_C	C_B	σ_B	C_L	σ_L	$RC = \frac{\alpha=0}{\alpha=1}$
0	2450	29	918	17	1532	34	6,35
5	3077	32	930	18	2147	37	3,81
9	3485	34	932	18	2553	38	2,46
10	3401	34	931	18	2470	38	2,15
15	2789	30	925	18	1864	35	1,37
17	2465	29	923	18	1542	34	1,007
20	2176	27	917	17	1259	32	1,284
25	1873	25	897	17	976	30	1,371
30	1786	24	888	17	898	29	1,354
35	1827	25	895	17	931	30	1,371
40	1818	25	899	17	919	30	1,418
45	1817	25	905	17	912	30	1,497
50	1876	25	932	18	944	31	1,568
55	1890	25	1001	18	889	31	1,554
60	1977	26	1186	20	791	33	1,793
65	2053	26	1236	20	817	33	1,681
70	2083	26	1298	21	785	33	1,339
75	2113	27	1316	21	797	34	1,398
80	2273	28	1338	21	935	35	1,553
85	2374	28	1385	21	989	35	1,557
90	2594	29	1443	22	1151	36	1,427

Tabela (V-18) Medidas de difusão de nêutrons para tubulação de alumínio e fração de vazio ($\alpha=0$) em função do ângulo entre o eixo do detector e o eixo do colimador.

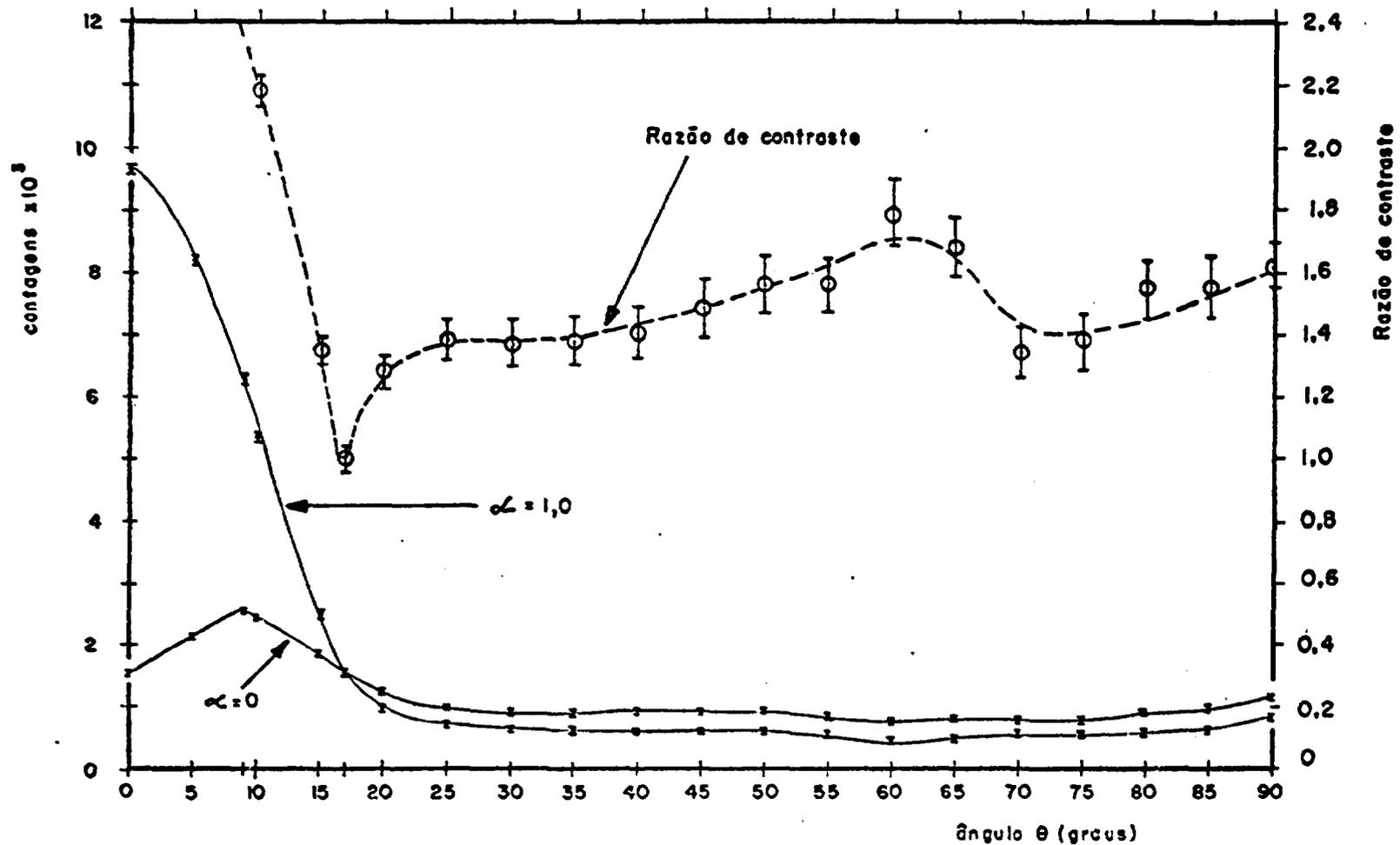
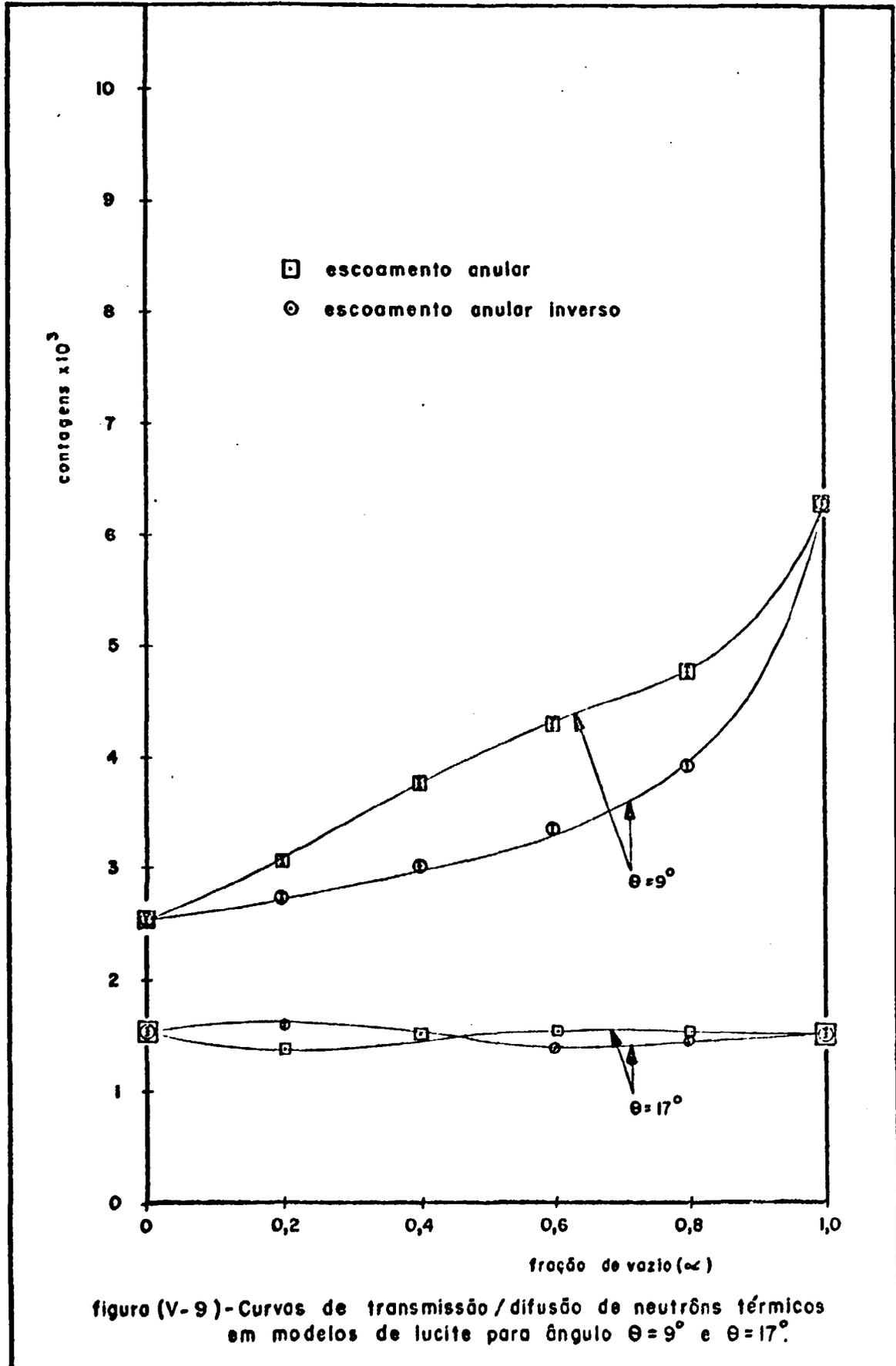


figura (V- 8)- Medidas de difusão de neutrões através de modelos de lucite em tubulação de alumínio, para $\alpha=1$ e $\alpha=0$, em função do ângulo θ .

Tabela (V-19) Medidas de difusão de neutrons em modelos de Iucite para $\theta = 9^\circ$								Tabela (V-20) Medidas de difusão de neutrons em modelos de Iucite para $\theta = 17^\circ$							
Escoamento anular inverso				Escoamento anular				Escoamento anular inverso				Escoamento anular			
α	C	σ_c	C_B	σ_B	C_L	σ_L		α	C	σ_c	C_B	σ_B	C_L	σ_L	
0	3477	34	932	18	2545	38		0	2458	29	923	18	1535	34	
0,2	3582	35	933	18	2649	39		0,2	2512	29	922	18	1590	34	
0,4	3960	36	938	18	3022	40		0,4	2447	29	922	18	1525	34	
0,6	4287	38	939	18	3348	42		0,6	2313	28	909	17	1404	33	
0,8	4859	40	944	18	3915	44		0,8	2409	28	920	18	1489	33	
1,0	7220	49	947	18	6273	52		1,0	2463	29	922	18	1541	34	
0	3477	34	932	18	2545	38		0	2458	29	923	18	1535	34	
0,2	4009	37	939	18	3070	41		0,2	2316	28	921	18	1395	33	
0,4	4731	40	942	18	3789	44		0,4	2425	28	922	18	1503	33	
0,6	5353	42	943	18	4410	46		0,6	2461	29	923	18	1538	34	
0,8	5691	44	943	18	4748	48		0,8	2487	29	921	18	1566	34	
1,0	7220	49	947	18	6273	52		1,0	2463	29	922	18	1541	34	



	α	C	σ_c	C_B	σ_B	C_L	σ_L
Escoamento anular	0	1880	25	893	17	987	30
	0,2	1852	25	876	17	976	30
	0,4	1809	25	871	17	938	30
	0,6	1708	24	822	17	886	29
	0,8	1614	23	820	17	794	29
	1,0	1548	23	804	16	744	28
Escoamento anular inverso	0	1880	25	893	17	987	30
	0,2	1812	25	879	17	933	30
	0,4	1721	24	884	17	837	29
	0,6	1660	24	841	17	819	29
	0,8	1586	23	809	16	777	28
	1,0	1548	23	804	16	744	28

Tabela (V-21) Medidas de difusão de neutrões em modelos de Lucite para $\theta = 25^\circ$

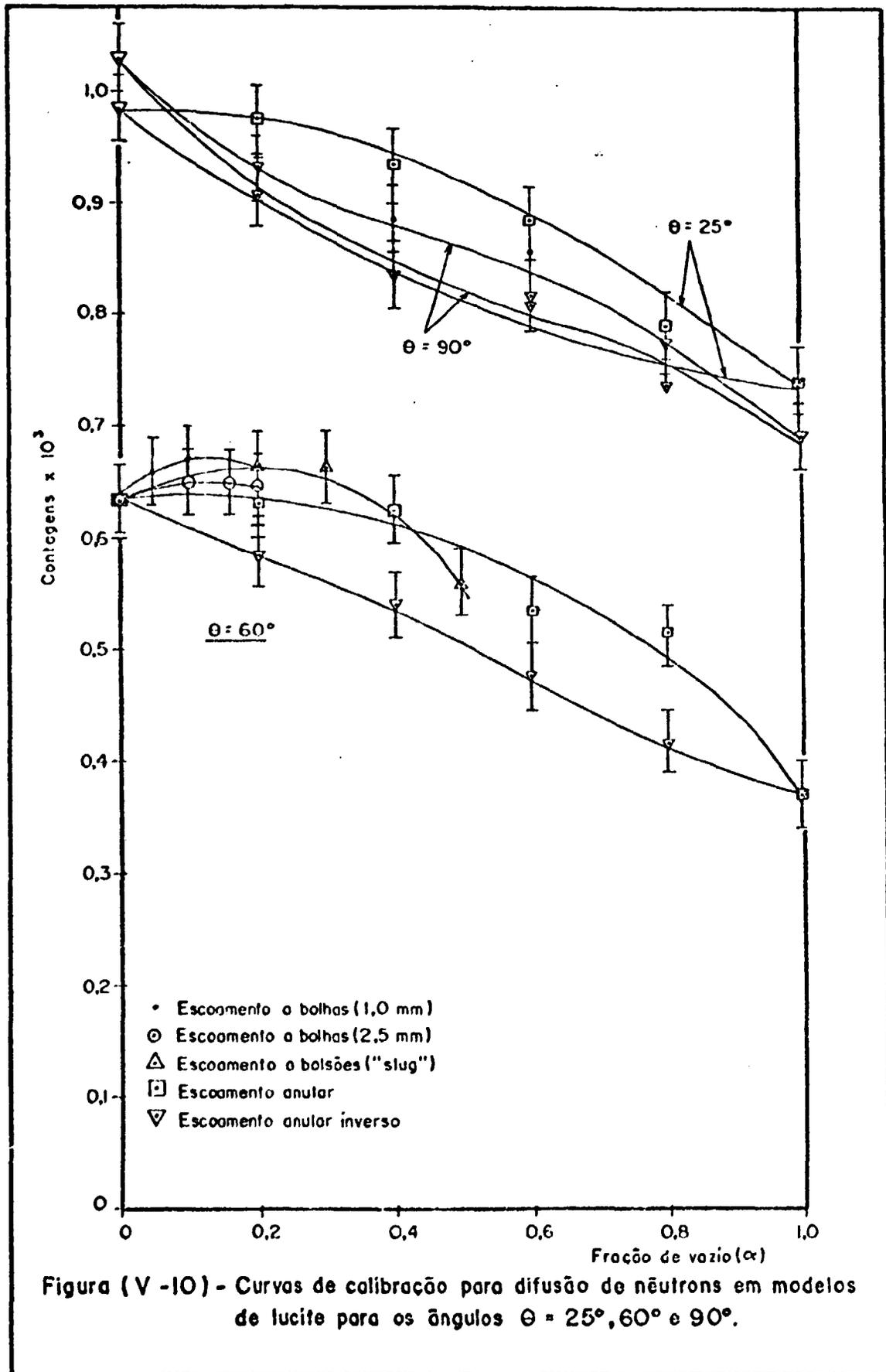
	α	C	σ_c	C_B	σ_B	C_L	σ_L
Escoamento anular	0	2473	29	1442	22	1031	36
	0,2	2341	28	1432	22	909	36
	0,4	2258	27	1423	22	835	35
	0,6	2214	27	1406	22	808	35
	0,8	2118	27	1381	21	737	34
	1,0	2019	26	1388	21	691	33
Escoamento anular inverso	0	2473	29	1442	22	1031	36
	0,2	2341	28	1432	22	909	36
	0,4	2258	27	1423	22	835	35
	0,6	2214	27	1406	22	808	35
	0,8	2118	27	1381	21	737	34
	1,0	2019	26	1388	21	691	33

Tabela (V-22) Medidas de difusão de neutrões em modelos de Lucite para $\theta = 90^\circ$

	α	C	σ	C_B	σ_B	C_L	σ_L
Escoamento a bolhas de 1,0mm	0	1938	26	1302	21	636	33
	0,05	1957	26	1295	21	662	33
	0,10	1970	26	1301	21	669	33
	0,20	1963	26	1297	21	666	33
Escoamento a bolhas de 2,5mm	0	1938	25	1302	21	636	33
	0,10	1948	25	1296	21	652	33
	0,15	1937	25	1286	21	651	33
	0,20	1930	25	1285	21	645	33
Escoamento a bolsões ("slug")	0	1938	25	1302	21	636	33
	0,2	1960	26	1298	21	662	33
	0,3	1965	26	1299	21	666	33
	0,4	1889	25	1261	21	628	33
	0,5	1783	24	1221	20	562	31

	α	C	σ	C_B	σ_B	C_L	σ_L
Escoamento anular	0	1938	25	1302	21	636	33
	0,2	1929	25	1296	21	633	33
	0,4	1920	25	1298	21	622	35
	0,6	1814	25	1277	21	537	33
	0,8	1761	24	1242	20	519	31
	1,0	1597	23	1204	20	373	30
Escoamento anular inverso	0	1938	25	1302	21	636	33
	0,2	1869	25	1282	21	587	33
	0,4	1824	25	1280	21	547	33
	0,6	1758	24	1268	21	478	32
	0,8	1683	24	1266	21	417	32
	1,0	1597	23	1224	20	373	30

Tabela (V-23) Medidas de difusão de neutrons em modelos de Lucite para $\theta=60^\circ$



vazões da fase líquida ficaram dentro dessa faixa. Para as medi-
das realizadas com a vazão máxima da fase líquida ($Q_f = 1,37 \text{ m}^3/\text{h}$)
utilizou-se um outro rotâmetro com faixa de vazão entre 1 e
 $5 \text{ m}^3/\text{h}$.

A pressão máxima de ar na tomada do laboratório foi de
8 bar. Essa pressão proporcionava uma vazão inicial de fase ga-
sosa Q_g de no máximo $12 \text{ m}^3/\text{h}$.

Para poder-se utilizar as curvas de calibração obtidas
com os modelos de lucite-ar para misturas bifásicas de água-ar,
Franzolli e Magrini⁽²²⁾ propuseram uma correlação para correção
dos valores de (α) . Tal correlação é fundamentada no fato das
seções de choque do lucite e da água serem ligeiramente diferen-
tes. ($\Sigma_{\text{lucite}} \approx 2,56 \text{ cm}^{-1}$ e $\Sigma_{\text{água}} \approx 2,77 \text{ cm}^{-1}$)

$$\frac{C_p(\alpha=0)}{C_A(\alpha=0)} = m = 1,019 \quad (\text{V-1})$$

onde C_p e C_A são as contagens obtidas para o lucite e a água res-
pectivamente.

Quando a fração de vazio (α) tende a unidade, $C_p \rightarrow C_A$,

$$\frac{C_p(\alpha=1)}{C_A(\alpha=1)} = m = 1 \quad (\text{V-2})$$

Considerando que C_p/C_A possa ser assumida como uma função linear
de α , tem-se

$$\frac{C_p(\alpha)}{C_A(\alpha)} = m + (1-m)\alpha \quad (\text{V-3})$$

a equação que foi usada como correção das curvas de calibração
obtidas com o lucite, para determinação das frações de vazio dos
escoamentos a bolsões e anular.

Neste trabalho para $\alpha = 0$, as contagens líquidas mé-
dias para o lucite foram de 1536 contagens em 5 minutos enquanto
que para a água foram de 1503 para o mesmo tempo. Para essas
contagens encontra-se o valor de $m = 0,022$.

Não se justifica a apresentação das curvas obtidas para as medidas com lucite e com a água, para uma comparação, porque elas quase se sobrepõem. Isso se deve ao fato das contagens em ambos os casos serem muito baixas.

V-5.1 - Escoamento a Bolsões ("slug")

Para o escoamento a bolsões foram feitas 5 séries de medidas com Q_f variando entre 0,18 a 1,37 m³/h. Para cada série, as vazões de ar (Q_g) variaram de 0,05 a 0,4 m³/h.

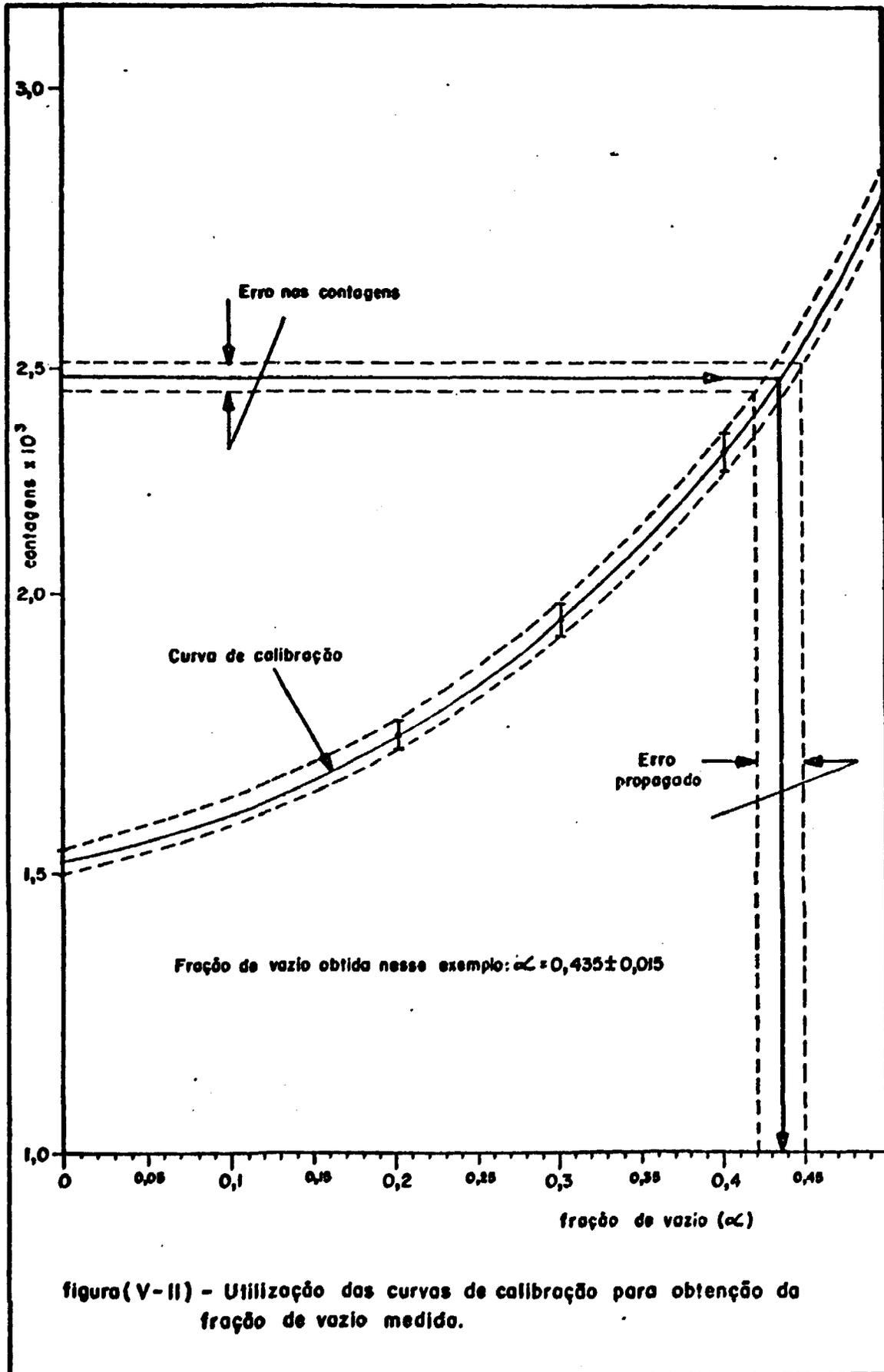
Na tabela (V-24) estão resumidos os resultados obtidos para o escoamento a bolsões. São mostrados os valores fixados para as vazões da fase líquida (Q_f) e gasosa (Q_g) com os respectivos erros, a pressão no leito bifásico para cada valor de Q_g combinado com Q_f , as frações de vazio calculadas a partir das vazões das fases com os respectivos erros resultantes das propagações, as contagens líquidas com seus erros e as frações de vazio medidas, ou seja, obtidas através das contagens feitas no circuito de água-ar submetidas as curvas de calibração. A figura (V-11) mostra como as curvas de calibração foram utilizadas e como os erros foram calculados analiticamente, considerando-se os erros nas contagens e os erros das curvas de calibração.

Para o regime a bolsões foram efetuadas 4 contagens de 5 minutos cada e os valores mostrados nas tabelas são as contagens médias líquidas dessas 4 medidas, isto é, já descontado as contagens devidas à radiação de fundo, cujo valor médio foi de 936 contagens em 5 minutos.

V-5.2 - Escoamento Anular

Para o regime de escoamento anular foram feitas também 5 séries de medidas com as mesmas vazões da fase líquida usadas no escoamento a bolsões.

O limiar do escoamento anular, porém, só foi conseguido com $Q_g \cong 2$ m³/h. Abaixo dessa vazão, o escoamento era de transição, ora espumante ("Froth"), ora "Wispy annular". As va



Q_f (m ³ /h)	Q_g (m ³ /h)	Pressão (bar)	Fração de vazio Calculada	σ_α	C_L	σ_L	Fração de Vazio Medida	σ_α
0,18 ± 0,0018	0,05	1,010	0,22	0,10	1825	30	0,24	0,025
	0,10	1,012	0,36	0,05	2082	31	0,34	0,020
	0,15	1,015	0,45	0,04	2207	32	0,39	0,020
	0,20 ± 0,005	1,016	0,53	0,03	2483	33	0,46	0,015
	0,25	1,022	0,58	0,02	2678	34	0,50	0,015
	0,28	1,025	0,61	0,02	2744	34	0,51	0,010
	0,35	1,028	0,66	0,02	2806	34	0,52	0,010
	0,40	1,030	0,68	0,02	3258	35	0,60	0,010
0,35 ± 0,0018	0,05	1,015	0,13	0,10	1693	30	0,16	0,030
	0,10	1,018	0,22	0,05	1745	30	0,22	0,025
	0,20 ± 0,005	1,025	0,36	0,03	2117	32	0,35	0,020
	0,30	1,035	0,46	0,02	2357	33	0,44	0,020
	0,40	1,044	0,53	0,01	2681	34	0,50	0,015
0,50 ± 0,0018	0,05	1,025	0,09	0,08	1648	29	0,13	0,035
	0,10	1,028	0,17	0,05	1782	30	0,21	0,030
	0,20	1,032	0,28	0,03	1870	30	0,25	0,025
	0,30 ± 0,005	1,036	0,37	0,02	2242	32	0,39	0,020
	0,40	1,038	0,44	0,01	2397	33	0,44	0,020
	0,50	1,040	0,50	0,01	2610	34	0,48	0,015
	0,60	1,044	0,54	0,01	2812	34	0,53	0,010
0,60 ± 0,0018	0,10	1,028	0,14	0,05	1722	30	0,19	0,030
	0,20	1,034	0,25	0,03	1879	30	0,25	0,025
	0,30 ± 0,005	1,038	0,33	0,02	2163	32	0,36	0,020
	0,40	1,044	0,40	0,01	2420	33	0,44	0,020
	0,50	1,050	0,45	0,01	2574	34	0,47	0,015
1,37 ± 0,0018	0,10	1,033	0,07	0,05	1642	29	0,12	0,035
	0,20 ± 0,005	1,040	0,13	0,02	1772	30	0,20	0,030
	0,30	1,050	0,18	0,02	1806	30	0,22	0,025
	0,40	1,060	0,22	0,01	1864	30	0,24	0,025

Tabela (V-24) Medidas de fração de vazio em escoamento bifásico de água-ar por transmissão de nêutrons.
Regime de Escoamento a Bolsões.

Q_f (m ³ /h)	Q_g (m ³ /h)	Pressão (bar)	Fração de vazio Calculada	σ_α	C_L	σ_L	Fração de Vazio Medida	σ_α
0,18 ± 0,0018	2	1,180	0,92	0,04	6344	52	0,92	0,010
	3	1,184	0,94	0,02	6557	53	0,93	0,010
	4	1,188	0,96	0,02	6747	54	0,94	0,010
	5	1,194	0,96	0,01	6938	54	0,94	0,010
	6 ±0,055	1,198	0,97	0,01	7212	55	0,95	0,005
	7	1,210	0,97	0,01	7421	56	0,96	0,005
	8	1,220	0,98	0,01	7646	56	0,96	0,005
	9	1,225	0,98	0,01	7830	57	0,97	0,005
	10	1,230	0,98	0,01	7865	57	0,97	0,005
	11	1,250	0,98	0,01	7927	57	0,97	0,005
	0,35 ± 0,0018	2	1,188	0,85	0,04	5876	51	0,89
3		1,196	0,89	0,02	6008	51	0,90	0,010
4		1,215	0,92	0,02	6157	52	0,91	0,010
5		1,224	0,93	0,01	6333	52	0,92	0,010
6 ±0,055		1,231	0,95	0,01	6505	53	0,92	0,010
7		1,238	0,95	0,01	6587	53	0,93	0,010
8		1,248	0,96	0,01	6614	53	0,93	0,010
9		1,260	0,96	0,01	6734	54	0,93	0,010
10		1,275	0,97	0,01	7252	55	0,95	0,005
11		1,288	0,97	0,01	7437	56	0,96	0,005
0,50 ± 0,0018		2	1,195	0,80	0,03	5221	48	0,85
	3	1,218	0,86	0,02	5363	49	0,86	0,010
	4	1,220	0,89	0,02	5544	49	0,88	0,010
	5	1,225	0,91	0,01	5876	51	0,89	0,010
	6 ±0,055	1,230	0,92	0,01	5952	51	0,89	0,010
	7	1,244	0,93	0,01	6074	51	0,90	0,010
	8	1,260	0,94	0,01	6284	52	0,91	0,010
	9	1,288	0,95	0,01	6387	52	0,92	0,010
	10	1,295	0,95	0,01	6519	53	0,92	0,010
	11	1,300	0,96	0,01	6742	54	0,93	0,010

Tabela (V-25) Medidas de fração de vazio em escoamento bifásico de água-ar por transmissão de nêutrons.
Regime de Escoamento Anular.

Q_f (m ³ /h)	Q_g (m ³ /h)	Pressão (bar)	Fração de Vazio Calculada	σ_α	C_L	σ_L	Fração de Vazio Calculada	σ_α
0,60 ± 0,0018	2	1,198	0,77	0,03	5198	48	0,85	0,01
	3	1,219	0,83	0,02	5317	49	0,86	0,01
	4	1,225	0,87	0,02	5413	49	0,86	0,01
	5	1,233	0,89	0,01	5468	49	0,87	0,01
	6 ±0,005	1,238	0,91	0,01	5571	50	0,88	0,01
	7	1,250	0,92	0,01	5715	50	0,88	0,01
	8	1,265	0,93	0,01	5896	51	0,89	0,01
	9	1,298	0,94	0,01	6192	51	0,91	0,01
	10	1,310	0,94	0,01	6415	52	0,92	0,01
	11	1,320	0,95	0,01	6683	53	0,93	0,01
	1,37 ± 0,0018	2	1,210	0,59	0,03	4434	46	0,78
3		1,221	0,69	0,02	4529	47	0,80	0,01
4		1,236	0,74	0,02	4699	47	0,82	0,01
5		1,244	0,78	0,01	4926	48	0,83	0,01
6 ±0,005		1,259	0,81	0,01	5004	48	0,84	0,01
7		1,270	0,85	0,01	5049	48	0,84	0,01
8		1,285	0,85	0,01	5211	48	0,85	0,01
9		1,310	0,87	0,01	5246	48	0,86	0,01
10		1,328	0,88	0,01	5317	49	0,86	0,01
11		1,335	0,89	0,01	5454	49	0,87	0,01

Tabela (V-26) Medidas de fração de vazio em escoamento bifásico de água-ar por transmissão de nêutrons. Regime de Escoamento Anular.

zões de ar nas medidas variaram de 2 a 11 m³/h.

As frações de vazio obtidas, com os seus respectivos erros, assim como as contagens líquidas e os parâmetros de escoamento são mostrados nas tabelas (V-25) e (V-26).

Para o regime de escoamento anular, foram efetuadas 3 contagens de 5 minutos cada, sendo os valores mostrados nas tabelas a média das três medidas, já descontada as contagens devidas à radiação de fundo, cujo valor médio foi de 937 contagens em 5 minutos.

C A P Í T U L O VI

DISCUSSÃO E CONCLUSÕESVI-1 - Medidas com os Modelos de Lucite

As várias calibrações preliminares, testes e medidas de precaução tomadas, contribuíram decisivamente para a melhoria dos resultados apresentados, para o ajuste das curvas de calibração obtidas.

As primeiras medidas foram realizadas com um detector BF_3 de 250 mm de diâmetro, com o feixe de neutrons entrando pelo costado. A máxima razão de contraste conseguida foi $RC = 2,6$. Esse detector foi então substituído por outro maior com 50 mm de diâmetro, com o qual foram realizadas posteriormente todas as medidas. O feixe de neutrons passou a penetrar pela face anterior, o que melhorou enormemente os resultados. A taxa de contagem aumentou sensivelmente e a razão de contraste chegou a 6,3.

Nas primeiras medidas a contribuição de radiação de função era muito grande. A colocação de folhas adicionais de cádmio na frente do tanque moderador e nas bordas do colimador reduziu a radiação de fundo aos valores obtidos nas medidas, ou seja, menos que 5% das contagens totais.

Um procedimento que melhoraria a razão de contraste e minimisaria o efeito da radiação de fundo seria o afastamento maior do sistema de objetos, paredes, etc. para evitar espalhamento de neutrons, o que nas condições do laboratório não foi possível.

Os modelos de lucite foram confeccionados com comprimentos bem maiores que a altura do feixe de neutrons. Esse cuidado evitou a possível influência do efeito de bordo dos espaçadores. Isso se constitui numa melhoria em relação a trabalhos apresentados anteriormente. O efeito de bordo considera o espalhamento múltiplo nos espaçadores aumentando as contagens no detector. As contagens aumentam ainda mais com o aumento da fração de vazio.

Para medidas de fração de vazio em qualquer regime de escoamento, é de grande importância que o colimador forneça um feixe simétrico em relação ao seu eixo. A figura (V-1) mostra que para $\alpha = 1$ esse objetivo foi alcançado plenamente. Para $\alpha = 0$, quando o detector se afasta da posição de máxima transmissão, se acentua o efeito da difusão nas contagens. Esse efeito é máximo a 15 mm do eixo do colimador. Nas medidas por difusão, a contagem máxima aconteceu para o ângulo de 9° (Fig. V-8), sendo que nessa posição o centro de face anterior do detector encontrava-se cerca de 14 mm do eixo do colimador. Nas três curvas obtidas, uma leve discrepância em relação a simetria foi verificada e atribuída ao efeito da radiação de fundo não ser igual de um lado e do outro do colimador talvez devido à diferença nas espessuras das folhas de cádmio na frente do tanque moderador.

As experiências feitas variando-se as distâncias entre a saída do colimador, a seção de testes e o detector mostraram que existe uma relação de distância em que a razão de contraste é máxima. Além disso, ficou evidente que a colocação de uma janela no detector, com a largura que considerava a divergência do feixe contribuiu para melhorar a razão de contraste.

Das curvas obtidas para o escoamento a bolhas, pelo método de transmissão (Fig. V-2), apenas a curva para bolhas de 2,5 mm pode ser usada para calibração, pois, as outras apresentaram comportamento anormal, comprovando falhas de construção dos modelos que não puderam ser superadas. Um problema que surgiu durante as medidas foi empeno dos discos de lucite mais finos, fato que alterou a fração de vazio real da teórica (calculada).

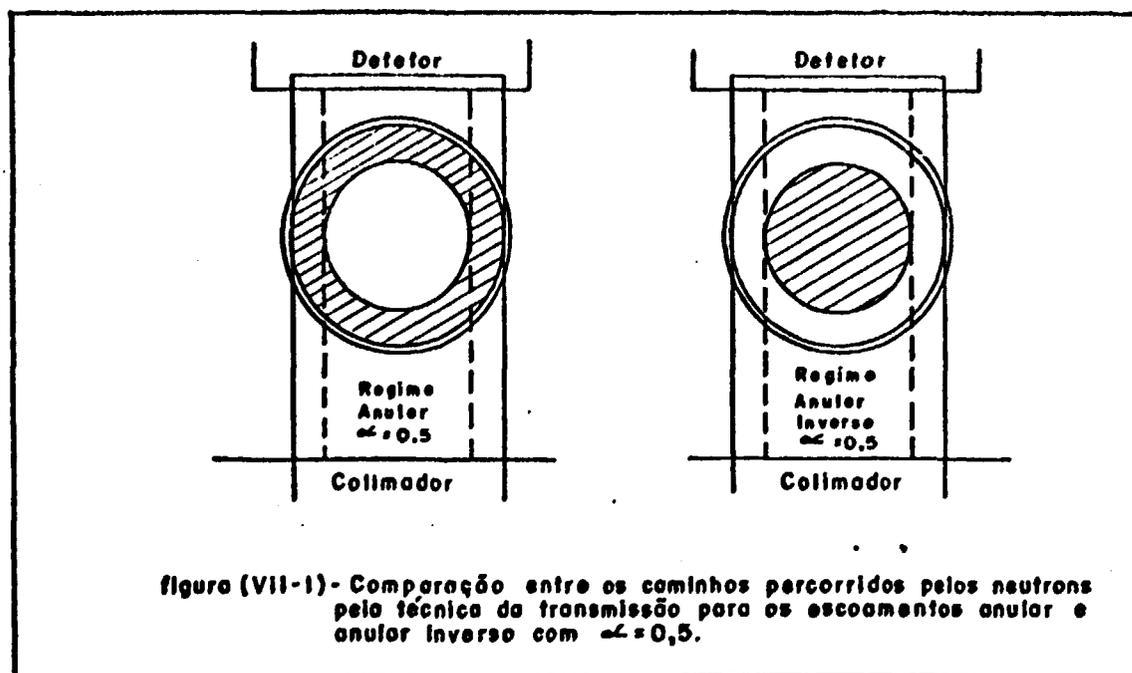
As medidas feitas em três posições com os modelos para escoamento a bolsões ("slug") simularam as oscilações desse regime. Esse procedimento propiciou medidas mais reais de fração de vazio.

Torres⁽³⁰⁾ obteve com a mesma fonte de Am-Be uma razão de contraste $RC = 8,4$. Nesse trabalho obteve-se RC máxima de 6,3. Tal resultado é atribuído a dois fatores principais. 1) o tanque moderador deveria ter sido melhor dimensionado para aumentar a

percentagem de neutrons t ermicos (a figura V-3 mostra que a contribui o de neutron rápidos e epitérmicos foi grande). 2) o colimador deveria ter sido projetado com uma largura um pouco maior.

As curvas da figura (V-4) mostram que o alumínio do tubo da se o de testes quase não interfere nas medidas, por possuir baixa se o de choque total ($\sigma_T = 1,23$ barns). Para os a os inoxidáveis a influência da se o de choque do ^{56}Fe (com 91% de abundância isotópica) de $\sigma_T = 13$ barns já   sentida com mais intensidade, conforme foi mostrado por Torres⁽³⁰⁾.

Uma compara o entre as curvas de figura (V-3) mostra que para a mesma fra o de vazio as contagens são diferentes para cada regime de escoamento. Esse fen meno   explicado porque o caminho percorrido pelos neutrons em cada regime de escoamento   diferente. A compara o entre os regimes anular e anular inverso, por exemplo para $\alpha = 0,5$, (figura (VII-1))



mostra que o caminho no caso do escoamento anular inverso   mais livre que para o anular. Mais de 1/4 do feixe de neutrons passa livremente pela se o de testes atingindo o detector, sem nenhuma intera o com a fase líquida do escoamento.

Se as curvas de calibração obtidas pelo método de transmissão fossem utilizadas para medidas em um canal aquecido, onde podem ocorrer os escoamentos anular e anular inverso, mas desconhecendo-se o tipo de escoamento presente, seria possível a determinação de fração de vazio com uma incerteza máxima ($\Delta\alpha$) de $\pm 0,05$ do valor real na faixa de $0,45 < \alpha < 0,65$, tomando-se como curva de calibração, nesse caso, os pontos médios entre as curvas de calibração obtidas para o escoamento anular e o anular inverso. Fora da faixa acima, o erro é sempre menor chegando a zero para $\alpha = 0$ e $\alpha = 1$. Naturalmente que essa aproximação só é válida quando há evidências de transição entre esses dois regimes de escoamento.

Considerando o canal aquecido do parágrafo anterior, os escoamentos anular e anular inverso podem ser identificados com o auxílio das curvas obtidas com máscaras parciais de cádmio. De posse dessas curvas e das curvas de calibração sem máscara, é possível uma identificação do tipo de escoamento através de duas medidas: uma com máscara e outra sem máscara. Suponha-se que por exemplo, na primeira medida tenha-se obtido a média líquida de 2100 contagens em 5 minutos. Entrando com esse valor na curva de calibração encontra-se os valores $\alpha = 0,23$ para anular inverso e $\alpha = 0,36$ para anular. Fazendo-se uma medida com uma máscara parcial de cádmio de 13,7 mm de largura obtém-se o valor de 2000 contagens. Entrando-se com esse valor na curva de calibração com máscara, obtém-se os valores $\alpha = 0,22$ para anular inverso e $\alpha = 0,58$ para anular. Comparando esses 4 valores observa-se que o valor mais correto é 0,25 sendo o escoamento do tipo anular inverso. Se o escoamento fosse anular as contagens com máscara dariam próximas de 1300.

Aplicando este mesmo raciocínio às curvas obtidas com barreira do tipo janela, observa-se que a identificação não é possível (figura V-6).

Quando se utiliza uma máscara de cádmio com 17,7 mm de largura (o que equivale a $\alpha = 0,5$ para o escoamento anular) a forma das curvas obtidas é aproximadamente simétrica (figura V-5). Isso pode ser explicado porque a máscara esconde a parte central

do tubo de modo que quando o escoamento é anular inverso, contagens bastante próximas são obtidas para valores de fração de vazio altos ($0,6 < \alpha < 1$). O mesmo ocorre quando $0 < \alpha < 0,4$ para o regime anular.

A comparação entre as curvas obtidas para os regimes a bolsões e anular é difícil de ser feita porque α , num determinado comprimento da tubulação, depende muito do comprimento de cada bolsão e da coluna de líquido que os separa. O regime a bolsões pode, por exemplo, apresentar α muito baixa ($0,1 < \alpha < 0,2$) se a frequência dos bolsões for baixa e há uma grande coluna de líquido separando dois bolsões. Mas, α pode ser elevada quando os bolsões são longos e muito próximos. É interessante notar que um bolsão isolado pode ser considerado um escoamento anular com α elevada ($0,9 < \alpha < 1$).

As curvas da figura (V-8) mostram que a máxima razão de contraste é obtida para $\theta = 0^\circ$, isto é, para medidas de transmissão. Para θ entre 0° e 17° , o efeito da transmissão prevalece sobre o da difusão. Para o ângulo de 17° as curvas de $\alpha = 0$ e $\alpha = 1$ se cruzam. Esse ponto é chamado de transição entre as técnicas da transmissão e da difusão. Nesse ponto a razão de contraste é igual a unidade e não é possível se medir frações de vazio conforme mostra a figura (V-9). A partir desse ângulo a razão das contagens se inverte voltando a crescer. De qualquer maneira, ela é muito menor (quatro vezes menor) que para as medidas por transmissão. Deve-se observar também que para os menores tempos de contagem (5 minutos) as contagens nas condições desse trabalho são muito menores. Por esse motivo, a incerteza devido às baixas contagens registradas foi uma limitação ao uso dessa técnica.

Outro fato limitador dessa técnica no sistema montado é um aumento crescente da radiação de fundo com o aumento do ângulo θ , sendo que para $\theta = 90^\circ$, as contagens da radiação de fundo somam 70% das contagens totais.

Os ângulos que apresentaram melhor razão de contraste foram $\theta = 25^\circ$, $\theta = 60^\circ$ e $\theta = 90^\circ$. De qualquer maneira, o melhor

ângulo foi de $\theta = 60^\circ$ que, apesar de apresentar contagem mais baixas, teve a melhor razão de contraste com menos interferência da radiação de fundo e do efeito da transmissão. Para o ângulo $\theta = 25^\circ$, por exemplo, as contagens foram mais altas. Mas, a curva da fig. (V-10) sugere que ainda havia influência dos neutrons transmitidos.

Dessa maneira, apenas as curvas obtidas para o ângulo de 60° devem ser utilizadas como curvas de calibração, devido às restrições já relatadas anteriormente.

Em face dos resultados não muito bons obtidos pela técnica da difusão as curvas de calibração obtidas não foram utilizadas para medidas em escoamento real.

VI-2 - Medidas no Circuito de Água-Ar

Para as medidas de fração de vazio efetuadas com o circuito de água-ar, a vazão de fase gasosa Q_g apresentada na tabela (V-24) para escoamento a bolsões é a vazão média da leitura direta tomada no rotâmetro. A vazão, como era de se esperar, flutuava aproximadamente 10%, em virtude do regime a bolsões ser pulsativo.

Para a faixa de vazão da fase líquida $0,18 \text{ m}^3/\text{h} < Q_f < 1,37 \text{ m}^3/\text{h}$, em relação ao regime a bolsões, a variação da vazão da fase gasosa permitiu se fazer medidas desde a transição do regime a bolhas para bolsões ($Q_g = 0,05 \text{ m}^3/\text{h}$) até o final do regime a bolsões, quando já se iniciavam os regimes de transição "Froth" "wispy annular", "churn", etc., com a vazão do gás $Q_g = 0,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Como era de se esperar, para, as mesmas vazões da fase gasosa as frações de vazio são bem menores para vazões mais altas da fase líquida.

Para o regime de escoamento anular, a mais baixa vazão de gás Q_g utilizada foi de $2 \text{ m}^3/\text{h}$, abaixo dessa vazão o escoamento era de transição, mesmo para baixas vazões do líquido ($Q_f = 0,18 \text{ m}^3/\text{h}$).

A fração de vazio mais baixa encontrada foi de $\alpha = 0,763$ com $Q_f = 1,37 \text{ m}^3/\text{h}$ e $Q_g = 2 \text{ m}^3/\text{h}$. O sistema operou apenas com a pressão da água da rua. Para obter-se frações de vazio mais baixas seriam necessárias altas vazões de fase líquida; o que não foi possível devido a falta de uma bomba de elevada altura monométrica. Por outro lado, a utilização de uma parte da tubulação em vidro não permitiria o uso de altas pressões no circuito.

A maior fração de vazio obtida foi $\alpha = 0,974$, com $Q_f = 0,18 \text{ m}^3/\text{h}$ e $Q_g = 11 \text{ m}^3/\text{h}$. Frações de vazio mais elevadas, até se chegar ao escoamento disperso e, ou mesmo, ao equivalente do título de vapor igual a unidade (escoamento de ar puro), requereriam uma alta vazão da fase gasosa. Isso foi impossível de conseguir-se com o limitado ar do compressor central existente.

O escoamento a bolhas não foi estudado porque havia coalescência das bolhas um pouco abaixo da região de alumínio da seção de testes. Seria necessário a substituição de toda a seção de testes por alumínio e, além disso, descer o tanque moderador até à região das bolhas. Isso não foi possível porque toda a estrutura de sustentação da seção de testes e do detetor de nêutrons teria que ser mudada de posição. Com isso, toda a geometria seria alterada e em consequência as curvas de calibração obtidas não mais poderiam ser utilizadas.

Em todas as medidas realizadas neste trabalho observa-se um aumento da radiação de fundo com o crescimento da fração de vazio. Esta variação pode ser explicada porque os neutrons da radiação de fundo, sejam térmicos ou epitérmicos, interagem com as amostras e são em parte retirados do feixe. Quando $\alpha \rightarrow 1,0$ isso tende não ocorrer.

A simulação de escoamento a bolhas de diâmetro muito pequenos não funciona muito bem por causa das dificuldades encontradas na confecção dos modelos de lucite.

Em face do exposto conclui-se que a utilização de modelos de lucite é uma boa ferramenta para simulação dos escoamen

tos a bolsões e anular, quando as curvas de calibração são usadas em circuitos de água-ar.

As medidas de fração de vazio para os regimes a bolsões e anular, com utilização de um feixe colimado de neutrons provenientes de uma fonte de Am-Be, são perfeitamente viáveis para escoamentos reais de água-ar.

O material da parede do tubo pode ter efeito acentuado nas medidas experimentais, sendo necessário se levantar uma curva de calibração para cada tubo de material diferente.

O método das máscaras de cádmio só tem utilidade para identificação entre os regimes anular e anular inverso.

As fontes de neutrons de Am-Be são boas para a técnica da transmissão mas produzem um feixe de neutrons muito fraco para a técnica da difusão.

VI-3 - Sugestões

Uma sugestão para trabalhos posteriores é a utilização de tubos de "Zircaloy IV" por causa da baixa seção de choque do zircônio ($\sigma_T = 8$ barns), que além dessa vantagem já é o material utilizado para confecção das varetas dos elementos combustíveis dos reatores PWR. Neste trabalho o Zircaloy IV não foi utilizado por causa de grandes dificuldades em conseguir-se tubos no diâmetro desejado.

Outra sugestão, é a utilização de feixes de neutrons térmicos provenientes de reatores de pesquisa com fluxo térmico mínimo de 10^{12} n/cm.s. Os geradores de neutrons também podem ser usados como fonte de neutrons rápidos monoenergéticos, principalmente para leituras de escoamento onde existem feixes de multibarras aquecidas envolvidas por vasos de parede espessa.

S I M B O L O G I A

- α - fração de vazios
 A - área da seção
 x - qualidade da mistura líquido-vapor
 v - volume específico
 v - velocidade do escoamento
 \dot{m} - massa da mistura que escoar
 w - vazão mássica para um escoamento
 G - fluxo de massa
 ρ - densidade do material
 β - qualidade volumétrica
 j - fluxo volumétrico
 s - razão de deslizamento
 A_0 - número de Avogrado
 Q - vazão volumétrica
 V - volume
 Σ - seção de choque macroscópica
 ϕ - fluxo de neutrons
 n - densidade de neutrons
 R - taxa de reação
 ϵ - eficiência do detetor em função da energia
 B - fator de empilhamento
 x - distância percorrida pelo feixe de neutrons
 σ - seção de choque microscópica
 C - média das contagens totais
 C_B - média das contagens da radiação de fundo
 $C_L = C - C_B$ - contagem líquida
 σ - desvio padrão em relação a média C
 σ_B - desvio padrão em relação a média C_B
 σ_L - desvio padrão em relação a $C - C_B$
 E - energia dos neutrons
 M - massa atômica do material
 $R.C$ - razão de contraste
 D_i - diâmetro interno
 D_e - diâmetro externo

Índices:

subscritos:

f -fase líquida

g -fase gasosa

Z -número atômico

sobrescrito:

A -número de massa

B I B L I O G R A F I A

- (1) Burgholz, R., "A Method of Measuring Flow in Pipes with Röntgen or X-Rays", Arch. Tech. Messen. 107, 1247, December (1949).
- (2) Grohse, E.W., "Analysis of Gas-Fluidized Solid Systems, by X-Ray Absorption", GE Research Lab., RL-1218, Research Information Service Section, the Knolls, Schenectady, New York (1954).
- (3) Ball, W.P., Langmuir, R.W., "X-Ray Measurement of Time Varying Steam Void Fraction in a Thin Water Channel", Trans. ANS, 12, 59 (1958) RW-RL-137 (1959).
- (4) Smith, A.V., "Transient Density Measurements in Two-Phase Flows Using X-Rays", Journal British Nuclear Energy Society, 10, 99, (1971).
- (5) Sterman, L.S., Surnov, A.V., "The use of Gamma Rays for Determination of Volumetric Vapor Content in Terms of Pressure and of the Time Level in an Aparatus" Teploenergetika, 2, 8, 39, (1955).
- (6) Gardner, R.P., Bean, R.M., Ferrell, J.K., "On The Gamma-Ray One-Shot-Collimator Measurement of Two-Phase Void Fractions". Nucl. Appl. Technol. 8, 88 (1970).
- (7) Swift, W.L., Dolan, F.X., Runstadler, P.W., "A Scanning Gamma Ray Attenuation System for Void Fraction Measurements in Two-Phase Flow", ASME, 25, (1978).
- (8) Nevstrueva, E.I., Gonsalez, K., "Determination of Steam Content Distribution During Surface Boiling of Water by Means of Beta Radiation", Teploenergetika, 7, 9, 34, (1960).
- (9) Cravarolo, L., Hassid, A.Villani, S., "A Beta-Ray Attenuation Method for Density Measurements of Liquid-Gas Mixtures in Adiabatic Flow", Energia Nucleare 8, 85, (1981).

- (10) Perkins, H.C. Jr., Yusuf, M., Leppert, G., "A Void Measurement Technique for Local Boiling", Nucl. Sci. Eng., 11, 304 (1961).
- (11) Saba, N., Lahey, Jr., R.T., Corelli, J.C., "An Experimental Technique for Determination of Steam Fraction in Flowing Steam-air Mixtures" Nucl., Techn., 48, 5 (1980).
- (12) Untermyer, S, et al., "Operation of a High Performance Light Water Boiling Reactor", Proceeding of Second Geneva Conference, 9, 455 (1958).
- (13) Untermyer, S., "Neutron Telescope Monitors Local Power Density", Nucleonics, 20, 52 (1962).
- (14) Sha, W.T., Bonilla, C.F., "Out-of-Pile Steam-Fraction Determination by Neutron-Beam Attenuation" Nucl. Appl., 1, 69 (1965).
- (15) Jackson, C.N., Alleman, R.T., Shear, W.G., "Neutron Densitometer for Measuring Void Fraction in Steam-Water Flow", Trans. Am. Nucl. Soc., 11, 366, (1969).
- (16) Harms, A.A., Lo, S., Hancox, W.T., "Measurement of Time-Average Voids by Neutron Diagnosis" Journal of Applied Physics, 42, 4080 (1971).
- (17) Harms, A.A., Forrest, C.F., "Dynamic Effects in Radiation Diagnosis of Fluctuating Voids", Nucl. Sci. and Eng. 46, 408 (1971).
- (18) Hancox, W.T., Forrest, C.F., Harms, A.A., "Void Determination in Two-Phase Systems Employing Neutron Transmission" Proceedings of AIChE-ASME Heat Transfer Conference, Denver, Colorado, ASME Paper N9 72-HT-2 (1972).
- (19) Jones, O.C., Zuber, N., "The Interrelation Between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow", Int. Journal of Multiphase Flow, 22, 273-306 (1975).
- (20) Rousseau, J.C., Czerny, J., Riegel, B., "Void Fraction Measurements During Blowdown by Neutron Absorption or

- Scattering Methods", OECD/NEA, Specialist Meeting on Transient Two-Phase Flow, Toronto, (1976).
- (21) Franzzoli, F.V., Magrini, A., Mancini, C., "Void Fraction Measurement in Water-Steam Mixture by Means of a ^{252}Cf Neutron Source", Int. J. Appl. Rad. Isotopes, 29, 311 (1978).
- (22) Franzzoli, F.V., Magrini, A., "Neutron Gauge for Measurement of High Void Fraction in Water-Steam Mixtures", Nuclear Technology, 45, 177 (1979).
- (23) Banerjee, S., Hussein, E., Meneley, D.A., "Simulation of a Neutron Scattering Method for Measuring Void Fraction in Two-Phase Flow", Nuclear Engineering and Design, 53, 393, (1979).
- (24) Banerjee, S., Heidrick, T.R., Rhodes, E., "Development and Calibration of Instruments for Measurements in Transient Two-Phase Flow", Proceedings of the second CSNI Specialists Meeting, Paris, 2, 745 (1978).
- (25) Banerjee, S., Yuen, P.S.L., Vandenbrock, M.A., "Calibration of a Fast Neutron Scattering Technique for Measurement of Void Fraction in Rod Bundles", Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 101, 295 (1979).
- (26) Freitas, R.L., "Hidrodynamic des écoulements eau-vapeur dans la zone remouillée d'un tube chauffant en renoyage", Thèse de Docteur Ingénieur, Université Scientifique et Médical de Grenoble / Institut National Polytechnique de Grenoble (1981).
- (27) Freitas, R.L., Pic, P., Delpluque, R., Zabe, B., "Essais Préliminaires de Mésure de Taux de Vide par Diffusion et/ou Transmission de Neutrons (1979).
- (28) Freitas, R.L., "Medida de Fração de Vazio num Tubo Aquecido nas Condições de Remolhamento - IV Encontro Nacional de Física de Reatores - CENTRECON - STG-D-(1982).
- (29) Younis, M.H., Hoffmann, T.W., Harms, A.A., "Neutron Diagnosis of Two-Phase Flow", Nucl. Instr. and Methods,

187, 489 (1981).

- (30) Torres, W.M., "Medida de Fração de Vazios em Escoamento Bifásico Usando Neutrons", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, (1982).
- (31) Torres, W.M., Rogers, J.D., "Medidas de Fração de Vazios em Misturas Bifásicas Usando Neutrons Térmicos" IV- Encontro Nacional de Física de Reatores - CENTRECON pp.284-294 (1982).
- (32) El-Wakil, M.M., "Nuclear Heat Transport", International Textbook Company, pp.325-331 (1971).
- (33) Collier, J.G., "Convective Boiling and Condensation", McGraw-Hill Book Company, pp. 1-53, (1972).
- (34) Wallis, G.B., "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill Book Company, New York, 400 páginas (1969).
- (35) Hewitt, G.F., Lovegrove, P.C., "Experimental Methods in Two-Phase Flow Studies", UKAEA, PB-252227.
- (36) Hewitt, G.F., King, I., Lovegrove, P.C., "Holdup and Pressure Drop Measurements in the Two-Phase Annular Flow of Air-Water Mixtures", U.K. Atomic Energy Report AERE-R3764, (1961).
- (37) Knoll, F.F., "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons, pp. 517-551 (1979).
- (38) Price, W.J., "Nuclear Radiation Detection" McGraw-Hill Book Company, Second Edition pp. 30-39 (1958).
- (39) Hewitt, G.F., Roberts, D.N., "Studies of Two-Phase Flow Patterns by Simultaneous X-Ray and Flash Photograph", Rept. AERE-M2159, UKAEA, Harwell (1969).
- (40) Lamarsh, J.R., "Introduction to Nuclear Reactor Theory", Addison- Wesley Publishing Company, Inc. 585pg, 1966.

A P E N D I C E A

CARTAS DE ESCOAMENTO

A-1 Diagrama de Wallis

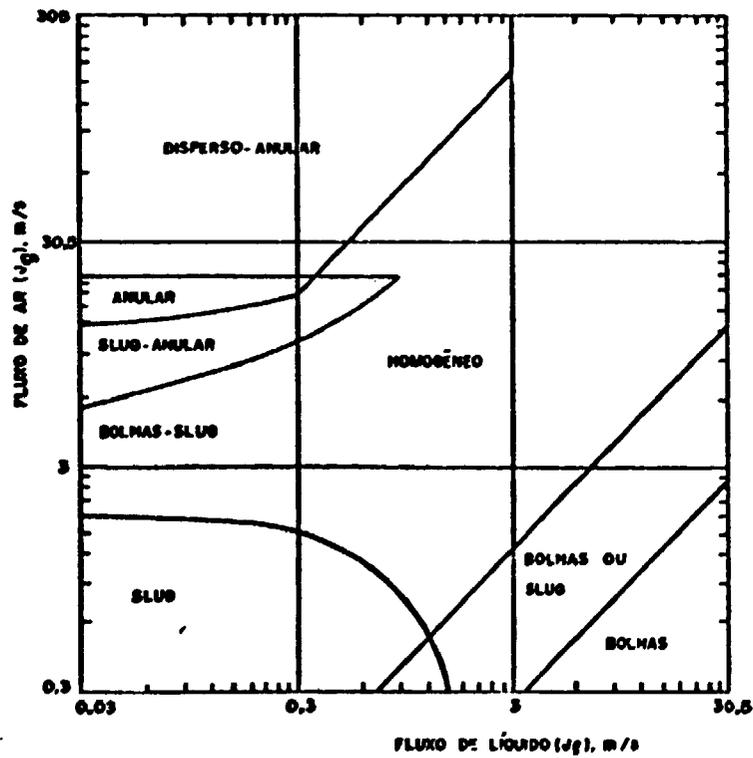


FIGURA (A-1) - DIAGRAMA DE WALLIS PARA ESCOAMENTO VERTICAL ASCENDENTE DE ÁGUA-AR A 1,02 BAR EM TUBULAÇÃO DE 25,4mm DE DIÂMETRO.

A-2 Diagrama de Hall-Taylor e Hewitt

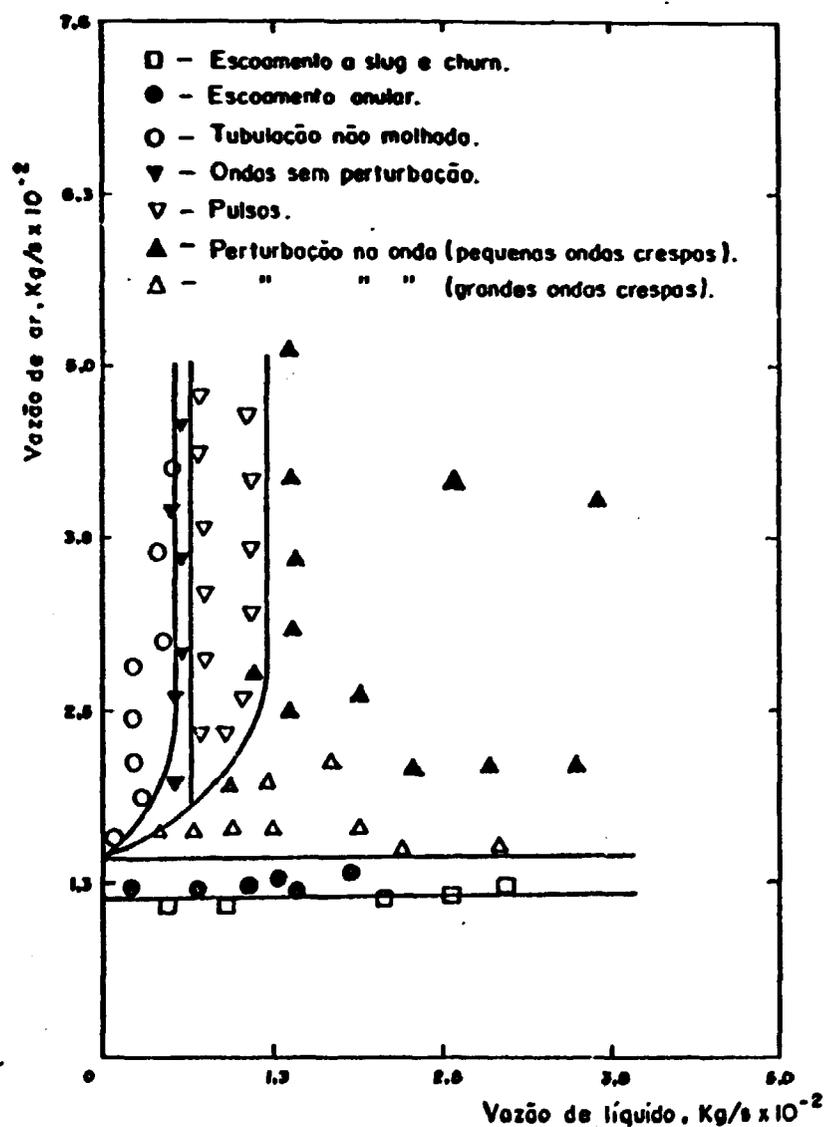


Figura (A - 2) - Diagrama de Hall-Taylor e Hewitt para vários regimes e transições entre bolsões "slug" e anular para escoamento ascendente de água-ar em tubo de 31,8mm de diâmetro a pressão de 1,02 bar.

A-3 Diagrama de Hewitt e Roberts

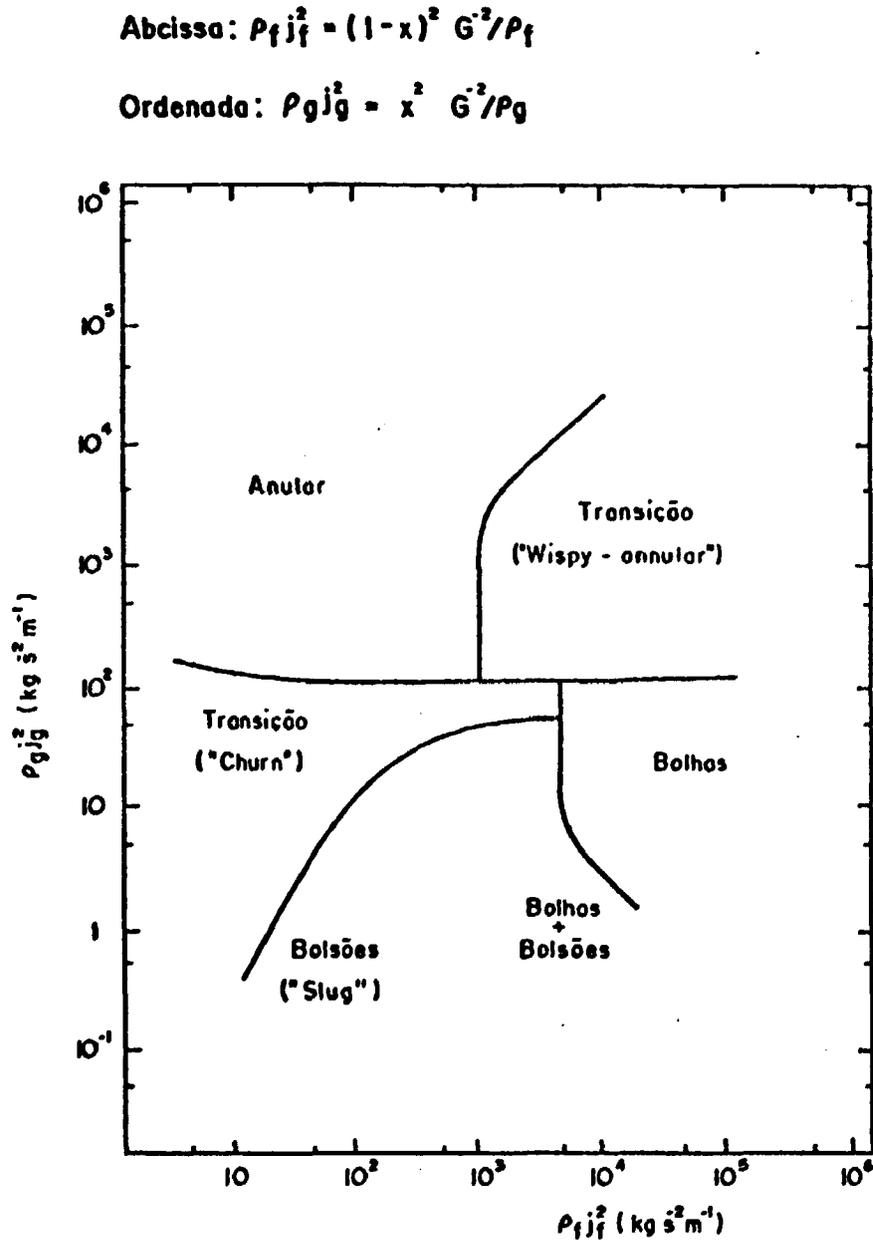
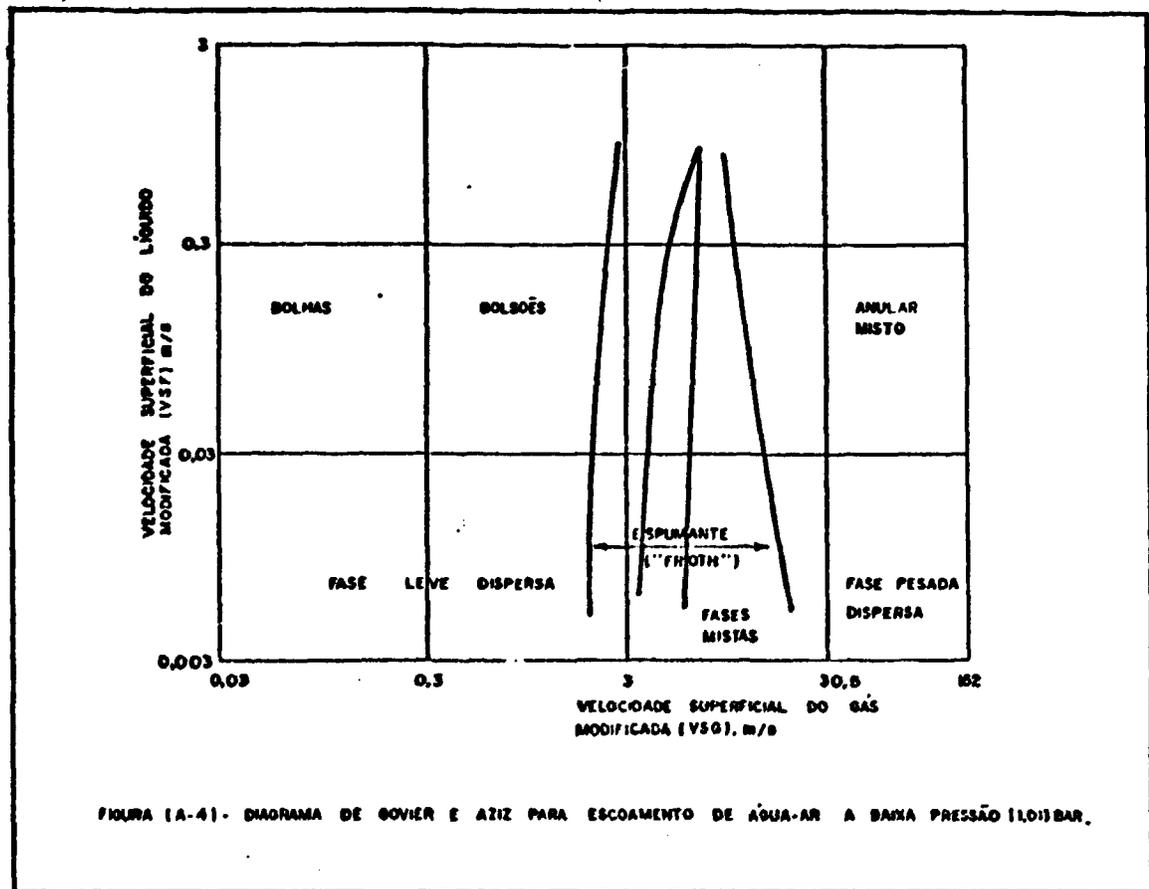


Figura (A - 3) - Diagrama de Hewitt e Roberts para escoamento de água-ar a baixa pressão (0,4 - 4,5 bar) e escoamento de água-vapor a alta pressão (35-70 bar) para tubulação de 10 a 30 mm de diâmetro.

A-4 Diagrama de Govier e Aziz



Abcissa $X = j_g$
 Ordenada $Y = j_f$
 onde

$$Y = \frac{\rho_f G_{wa}^{1/4}}{\rho_a \sigma_s} \quad \text{e} \quad X = \frac{\rho_g^{1/3}}{\rho_a} Y$$

sendo

ρ_f = massa volumétrica do líquido nas condições do escoamento

ρ_g = massa volumétrica do gás nas condições do escoamento

σ_s = tensão superficial nas condições do escoamento

σ_{wa} = tensão superficial nas condições do escoamento

ρ_a = massa volumétrica de ar a 1,01 bar a 15,6°C

A P E N D I C E B

DETEÇÃO DE NEUTRONS COM UTILIZAÇÃO DE DETETORES BF₃

Os detetores proporcionais são intermediários entre as câmaras de ionização e os detetores G.M. no que se refere aos princípios de operação, construção e aplicação. Nos detetores proporcionais o efeito principal é o de ionização secundária.

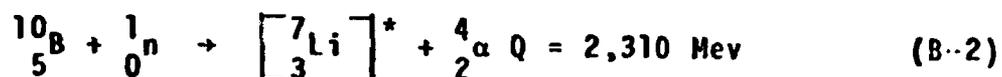
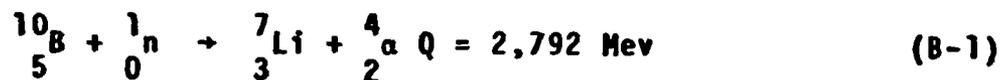
Uma consideração importante em relação a utilização dos detetores BF₃ para detecção de neutrons de uma fonte de Am-Be é a discriminação da radiação γ que acompanha o fluxo de neutrons. Os γ interagem inicialmente com a parede do detetor, criando eletrons secundários que produzem ionização no trifluoreto de boro. De qualquer maneira, a interação desses eletrons com o gás é pequena e um eletron que escapa da parede, em geral, alcança com facilidade o outro lado, depositando no gás apenas uma pequena parcela de sua energia inicial. Assim, uma pequena amplitude de discriminação dos pulsos é suficiente para eliminar a influência da radiação γ sem prejuízo da eficiência de detecção de neutrons.

Os neutrons sendo partículas sem carga, não produzem ionização por sua passagem pela matéria. Por isso, não podem ser observados diretamente em nenhum detetor cuja resposta dependa de uma ionização causada por uma partícula. A detecção de neutrons depende de efeitos secundários resultantes das interações dos neutrons com os núcleos dos átomos constituintes do detetor.

A reação $^{10}_5\text{B} (n, \alpha) ^7_3\text{Li}$ é amplamente utilizada na detecção de neutrons. A seção de choque média da reação é elevada e a dependência com a energia segue a lei $1/v$ um grande intervalo de energia (0 a 10^4 ev). A reação é fácil de ser observada mesmo na presença de alto fluxo de γ , dada a alta ionização específica e a alta energia das partículas carregadas liberadas.

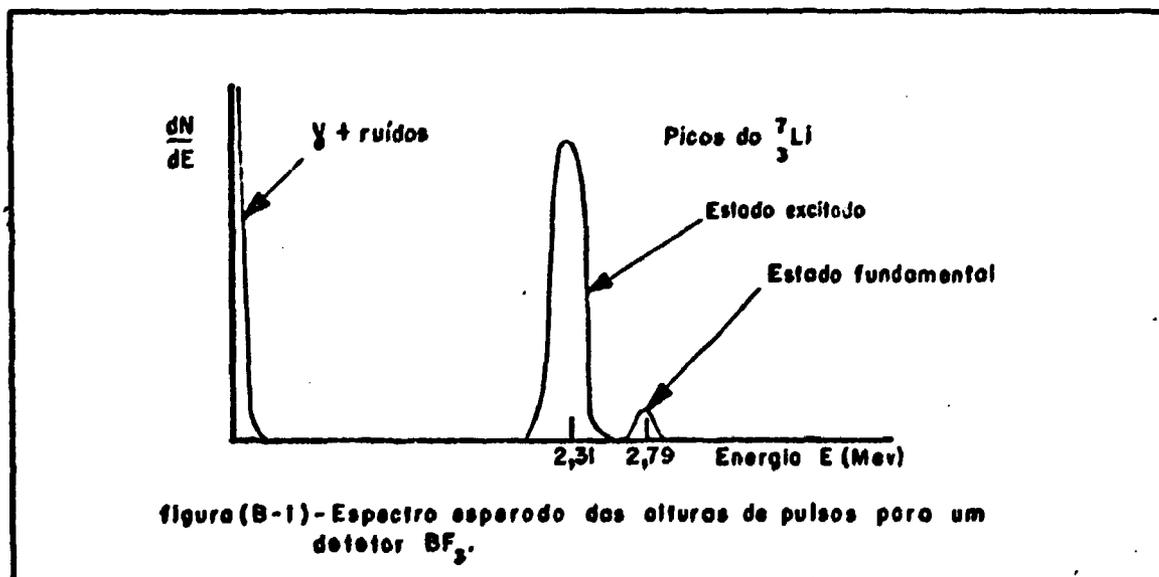
O boro natural é composto de 80,2% do isótopo $^{11}_5\text{B}$ e 19,8% do isótopo $^{10}_5\text{B}$. As propriedades químicas do boro são boas e podem ser facilmente incorporadas ao detetor.

A reação $^{10}_5\text{B} (n, \alpha) ^7_3\text{Li}$ é exotérmica com liberação de 2,792 Mev a ser distribuída entre o ^7_3Li e a partícula α . O ^7_3Li pode ser formado diretamente no estado fundamental, ou, no estado excitado, que emite posteriormente um γ de 0,482 Mev, para retornar ao estado fundamental. As equações abaixo mostram essas duas reações:



Na equação (B-1) o ^7_3Li está no estado fundamental e na equação (B-2) o $\left[^7_3\text{Li} \right]^*$ está no estado excitado. A probabilidade de ocorrência de primeira reação é da ordem de 6,4% e a da segunda de 93,6%.

A figura (B-1) mostra o espectro ideal das alturas de pulsos esperadas para um detetor do tipo BF_3 , cujas dimensões são tais que aproximadamente todas as reações ocorrem suficientemente longe das paredes, de modo a depositar no gás proporcional toda energia das partículas.

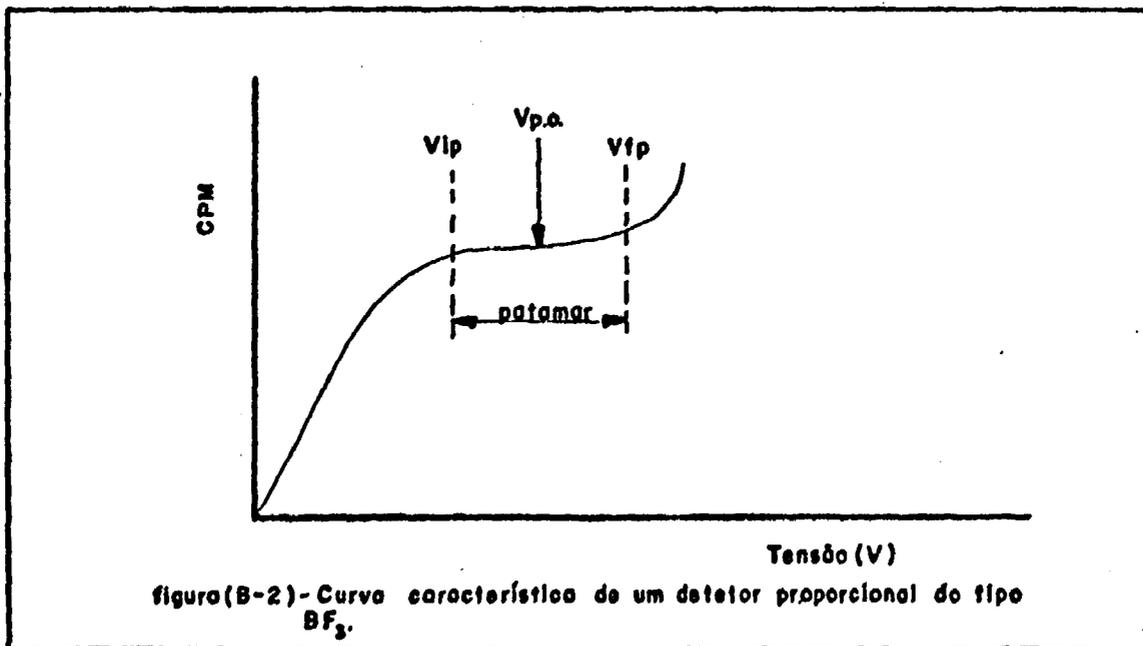


Em geral, os detetores BF_3 são construídos com tubos metálicos (catodo) tendo no seu centro um filamento metálico (anodo). O alumínio é frequentemente escolhido como material do tubo por causa de sua baixa seção de choque para neutrons, embora sejam também usados latão, aços inoxidáveis e outros. O gás presente no interior do tubo é o trifluoreto de Boro. A utilização de um composto gasoso é conveniente pois, o boro tem a função de alvo para captura dos neutrons e um gás atua como transportador, sendo que o fluor serve como agente de ionização. Assim, o BF_3 é um composto gasoso ideal. A pressão do gás, em geral, é de 12mm de Hg, com o boro do BF_3 enriquecido a 96%.

A tensão de operação de um detetor BF_3 depende da curva obtida pelas contagens versus a tensão aplicada, onde aparece o seu patamar característico, conforme a figura (B-2).

O patamar da curva do detetor fornece a tensão de operação da seguinte maneira: Se em relação a esse patamar chamarmos V_{ip} a tensão em seu início e V_{fp} a tensão em seu final então $\Delta V = V_{fp} - V_{ip}$. A tensão de operação do detetor ($V_{p.o}$) será

$$V_{p.o} = V_{ip} + \frac{1}{2} \Delta V \quad (\text{B-3})$$



A eficiência de detecção dos neutrons incidentes ao longo do eixo do detetor BF_3 é dada aproximadamente por

$$\epsilon(E) = 1 - e^{-\Sigma_a(E)L} \quad (\text{B-4})$$

onde $\Sigma_a(E)$ é a seção de choque macroscópica de absorção do ^{10}B à energia E e L o comprimento ativo do detetor.

A P E N D I C E C

Tabela (C-1) - Parâmetros de Difusão para Neutrons Térmicos para Lucite e Água⁽⁴⁰⁾

PARÂMETRO	LUCITE	ÁGUA
Densidade (g/cm ³)	1,18	1,00
Coefficiente de Difusão \bar{D} (cm)	0,136	0,16
Seção de choque de Absorção Térmica Σ_a (associada a \bar{v}_T) (cm ⁻¹)	$1,73 \times 10^{-2}$	$1,97 \times 10^{-2}$
Comprimento de Difusão $L = \sqrt{\frac{\bar{D}}{\Sigma_a}}$ (cm)	2,80	2,85
Idade dos Neutrons de Fissão para energias térmicas $\tau = \bar{D} \bar{v}$ cm ² /s ($\bar{v} = 2,2 \times 10^5$ cm/s)	$3,40 \times 10^4$	$3,57 \times 10^4$
Valor Médio do Tempo de Difusão Térmica $t_d = \frac{1}{\bar{v} \Sigma_a}$ (μs)	232	210