

VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM TUBULAÇÕES METÁLICAS
POR NEUTRONGRAFIA EM TEMPO REAL

Leandro da Conceição Luiz

DISSERTAÇÃO 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 EM ENGENHARIA
NUCLEAR.

Aprovada por:

Prof^a. Verginia Reis Crispim, D.Sc.

Dr. Luís Eduardo Barreira Brandão, D.Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2007

LUIZ, LEANDRO DA CONCEIÇÃO

Visualização de Escoamentos Bifásicos
em Tubulações Metálicas por Neutronografia
em Tempo Real [Rio de Janeiro] 2007.

IX, 75 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Nuclear, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Neutronografia em Tempo Real
2. Escoamentos Bifásicos
3. Processamento Digital de Imagens

I.COPPE/UFRJ II. Título (série)

Ao Digno de Toda Honra e Toda Glória

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Bondoso Deus por todas as coisas que Ele tem realizado em minha vida e principalmente por ter restaurado a minha saúde.

Ao Programa de Engenharia Nuclear (PEN) pela oportunidade e credibilidade.

À minha orientadora Verginia Reis Crispim pela paciência de me ensinar, dedicação, compreensão e por suas palavras de incentivo.

À CAPES pela concessão da bolsa de Mestrado.

Ao IEN/CNEN, a equipe do SEREA pela confiança no trabalho, ao chefe do setor, Carlos Renke, aos operadores do reator Argonauta, ao colega Francisco José de Oliveira Ferreira pela sua colaboração com o SEI e a João Carlos pela dedicação em grande parte do trabalho. Ao professor Luís Eduardo Barreira Brandão pelas sugestões no aparato e pela colaboração com os instrumentos de medidas. Ao Paulo Ramos por sua colaboração no processamento das imagens e a Niomedes Schwambach por sua atenção ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao corpo docente da COPPE/UFRJ, pelo empenho na minha formação acadêmica, e à equipe do PEN, principalmente, às sras. Josevalda Laranjeira Noronha e Tânia Regina Magalhães Moraes, ao Reginaldo Baptista de Oliveira pelo apoio administrativo. Aos colegas Karol Amon Marx, Clara Teresa dos Santos Lima, Ilka Helena Taam Santos Monteiro, Ricardo Elias Candeiro e Vitor Santos Ramos pela colaboração e incentivo.

Aos meus pais Damião Luiz e Georgina da Conceição Luiz pela paciência e apoio em todos os dias de minha vida acadêmica e ao meu irmão Adriano Luiz.

À minha noiva Rafaela Tavares Batista pela compreensão e companheirismo.

Aos profissionais de saúde: Ricardo Viana Carvalho, Luiz Alejandro Acosta Saltos, Antonio Roberto Polita, Gláucia Baeta Lopes, Gisele de Azevedo e toda equipe médica que cuidou com carinho de mim e acreditou em minha recuperação.

Ao colega Thiago Magalhães pela ajuda no processamento das imagens.

Ao saudoso Pe Valter Costa Santos (*In Memoriam*) que me deu muita força com suas palavras de fé e esperança.

E a todos que de alguma forma tornaram possível o desenvolvimento e a realização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM TUBULAÇÕES METÁLICAS POR NEUTRONGRAFIA EM TEMPO REAL

Leandro da Conceição Luiz

Fevereiro/2007

Orientadora: Verginia Reis Crispim

Programa: Engenharia Nuclear

A Neutronografia térmica tem sido aplicada à visualização de escoamentos bifásicos. Como os nêutrons térmicos penetram a estrutura metálica das tubulações mais usadas, essa técnica pode ser usada para a visualização de fluidos escoando dentro delas. A proposta do presente trabalho é visualizar em tempo real o escoamento bifásico água-ar em tubos de pequenos diâmetros, por Neutronografia. Escoamentos bifásicos ar-água foram visualizados pelo sistema instalado no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta/IEN/CNEN. Várias imagens neutronográficas de escoamentos bifásicos ar-água dos tipos slug, anulares e possíveis bolhas foram obtidas com o Sistema de Imageamento em Tempo Real (SEI). Incrustações nas paredes internas das tubulações foram nitidamente visualizadas pelo sistema neutronográfico. A correlação entre as correntes de arraste líquido-gás mostrou ser linear. Obteve-se ainda as frações de vazio, em função da vazão de ar injetado, para uma vazão fixa de água.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

VISUALIZATION OF TWO-PHASE FLOW AT PIPE LEAD USING NEUTRON
RADIOGRAPHY REAL TIME.

Leandro da Conceição Luiz

February/2007

Advisors: Verginia Reis Crispim

Department: Nuclear Engineering

Real Time thermal neutron radiography has been applied to the visualization of fluid flows. As thermal neutrons can penetrate metal casings, the technique may be useful for the visualization of fluids flowing inside metal enclosures. The purpose of this study is to visualize in real time an two-phase flow water-air in a small diameter tube by neutron radiography technique. The two-phase flow water-air was visualized for the system installed in J-9 irradiation channel of Argonauta/IEN/CNEN Research Nuclear Reactor. The various images of two-phase flow water-air of the type slug have been obtained with a new electronic Imaging System for Real Time Neutron Radiography (SEI). Incrustations in the internal walls of the pipe clearly had been visualized by neutrographic system. The drift flux correlation liquid-gas showed to be linear. The void fraction in function of the injected air for a fixed water outflow was gotten.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

Introdução	01
I.1 – Introdução	01
I.2 – Motivação e finalidade	02
I.3 – Revisão da literatura	03

CAPÍTULO II

Considerações teóricas	17
II.1 – Interação dos nêutrons com a matéria	17
II.2 – Fontes de nêutrons	23
II.2.1 – Reatores nucleares	23
II.2.2 – Aceleradores de partículas	24
II.2.3 – Fontes radioisotópicas	25
II.3 – A Neutronografia	27
II.3.1 – Uma breve descrição histórica	27
II.3.2 – Transmissão de nêutrons pela matéria	28
II.3.3 – Sistema neutronográfico	29
II.3.3.1 – Fonte de nêutrons	29
II.3.3.2 – Colimador	30
II.3.3.3 - Dispositivo de registro de imagem neutronográfica	33
II.4 – Regimes de escoamentos bifásicos em dutos metálicos	38
II.4.1 – Regimes de escoamentos em tubulações verticais	38
II.4.1.1 – Escoamento de bolhas	38
II.4.1.2 – Escoamento de golfadas (<i>slug</i>)	39
II.4.1.3 – Escoamento agitado	39

II.4.1.4 – Escoamento anular com bolhas	39
II.4.1.5 – Escoamento anular	39
II.4.2 – Parâmetros básicos	40
II.4.3 – Mapa de escoamento	43
CAPÍTULO III	
Metodologia	44
III.1 – Reator Argonauta	44
III.2 – Sistema Eletrônico de Imageamento Neutronográfico em Tempo Real	48
III.3 – Ensaios neutronográficos em tempo real	49
III.3.1 – Ensaios preliminares	49
III.3.2 – Ensaios realizados com o aparato V.1	50
III.3.3 – Ensaios realizados com o aparato V.2	50
III.3.4 – Ensaios realizados com o aparato V.3	51
III.4 – Procedimento experimental	53
III.5 – Processamento digital de imagens	54
CAPÍTULO IV	
Resultados	56
IV.1 – Ensaios preliminares	56
IV.2 – Processamento das imagens capturadas	57
IV.3 – Ensaios realizados com o aparato V.2	58
IV.4 – Correntes de arraste e Fração de Vazio	60
IV.5 – Simulação de incrustações interna na tubulação metálica	63

CAPÍTULO V

Conclusões **69**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **71**

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A Neutronografia (NR) é uma técnica de Ensaios Não Destrutivos (END) que permite visualizar a imagem dos componentes internos de uma amostra, verificando a existência ou não de descontinuidades ou defeitos sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso, posteriormente.

Há outras técnicas de inspeção não-destrutiva de amostras, as quais a Neutronografia pode vir a complementar suas respostas, sendo que, particularmente, se destacam a: ultrasonografia e a radiografia com raios-X e raios- γ . Em algumas inspeções, são mais práticas, mais econômicas, podendo ser portáteis, em relação a Neutronografia, ou vive-versa.

Pode-se utilizar a Neutronografia com filme radiográfico (Neutronografia convencional), com filmes plásticos (polímeros – SSNTD) e em tempo real. A Neutronografia em Tempo Real (NRTR) tem sido utilizada em diversas aplicações, tais como: inspeção de tubulações de troca de calor; escoamentos bifásicos; tomografia computadorizada com nêutrons; corrosão em componentes de foguetes espaciais; manutenção de aeronaves; inspeção de explosivos; análises microbiológicas; solos, inspeção de juntas metal-cerâmica, objetos de artes, dentre outras. Sendo assim, a Neutronografia tem sido reconhecida como uma ferramenta essencial em recentes trabalhos científicos, militares e industriais. É uma técnica semelhante à radiografia com raios-X, diferindo pelo mecanismo de interação, já que os nêutrons não dependem da interação com os elétrons orbitais e, sim, interagem diretamente com os núcleos atômicos.

Para se realizar uma Neutronografia é necessário um arranjo constituído de uma fonte de nêutrons, um conversor e um dispositivo para registro e visualização da imagem. A fonte de nêutrons pode ser oriunda de um reator nuclear, de um acelerador de partículas ou de uma fonte radioativa. Na escolha da fonte deve-se levar em consideração os seguintes fatores: a intensidade e a energia de emissão dos nêutrons; a relação entre os fluxos neutrônicos e de radiações γ ; tamanho; custo; portabilidade e blindagem necessária. Os sensores mais utilizados eram os filmes radiográficos convencionais e os polímeros que exigiam um intervalo de tempo maior devido ao processo de revelação. Com o avanço

tecnológico, a imagem neutronográfica passou a ser obtida por sensores eletrônicos, que permitem a visualização de eventos dinâmicos, em tempo real.

A Neutronografia em Tempo Real possibilita estudar eventos como os de fluidos em movimentos, no interior de tubulações metálicas, visualizando comportamentos dos tipos: escoamentos, evaporação, processo de condensação, em tempo real e de forma não destrutiva. A utilização da NRTR permite ampliar o campo de aplicações, a saber:

- Verificação de cavidades e entupimento de injetores de combustível;
- transporte de água em solos agrícolas, visando observar o crescimento das raízes e a otimização das condições solo-planta para obtenção de melhores colheitas;
- escoamento bifásico do tipo gás-líquido em tubulações metálicas;
- detecção de infiltração e de fluidos em peças submetidas a altas pressões de água ou de líquidos orgânicos;
- vazamento de combustíveis e óleos dos sistemas hidráulicos de aeronaves.

I.2 – Motivação e finalidade

Nos últimos anos, o estudo dos regimes de escoamentos bifásicos tem sido de grande interesse para a Engenharia e Indústria de Petróleo. A produção de óleo e gás natural envolve o transporte de fluidos nas fases líquidas e gasosas até a unidade de processamento, onde será realizada a separação das fases. A importância da previsão de escoamentos bifásicos em tubulações de petróleo é notável e uma tarefa extremamente complicada. O método óptico ainda é muito utilizado na visualização do escoamento bifásico no interior de tubulações. Ele consiste em usar uma câmera de alta velocidade permitindo a visualização em uma determinada região, porém, ele é restrito às tubulações feitas com materiais opacos. O Sistema Eletrônico de Imageamento (SEI) implantado no canal J-9 do reator Argonauta/IEN/CNEN mostrou estar apto a realizar Neutronografias em Tempo Real de amostras estáticas [8]. No curso de Ensaios Não Destrutivos oferecido pelo Programa de Engenharia Nuclear (PEN/COPPE/UFRJ), foi demonstrado que o SEI poderia ser utilizado para estudos dinâmicos, uma vez que foram realizados ensaios com tubulação e um recipiente de alumínio sendo preenchidos com água em seus interiores.

Tendo em vista a importância dos estudos de escoamentos bifásicos em tubulações metálicas e levando-se em consideração de que o método óptico não é a ferramenta adequada para esse tipo de inspeção, este trabalho objetivou visualizar escoamentos bifásicos, formados pela mistura ar-água, passando no interior de um tubo de alumínio com diâmetro interno e espessura de parede específica, usando-se a técnica de Radiografia com Nêutrons em Tempo Real, e, inclusive, observar a mudança desse escoamento, ao encontrar um “estrangulamento” no tubo, em decorrência de uma incrustação.

Na NRTR, um Sistema de Imageamento é utilizado, constituído de um cintilador que converte nêutrons em fótons de luz (conversor cintilador), uma câmera CCD, uma placa de captura de imagens e um computador com programas computacionais específicos para o processamento dessas imagens [24]. Como fonte de nêutrons utilizar-se-á o canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta/IEN/CNEN que, operando na potência de 340 W, disponibiliza um fluxo de $4,46 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$.

I.3 – Revisão da literatura

Esta revisão tem como finalidade discorrer sobre os artigos científicos publicados que serviram de referência para este trabalho, mostrando a potencialidade da Neutronografia para inspeções diversas.

As primeiras Neutronografias foram realizadas em Berlim, em 1938, no Laboratório de Pesquisa *I. G. Farben Aktiengesellschaft*, e, no ano de 1944, no Laboratório *Forschungsanstalt de Reichspost* [1].

Entre 1935 e 1938, H. Kallmann e Kuhn [25] usaram fontes de Ra-Be e um pequeno gerador de nêutrons, no Laboratório de Pesquisa *I. G. Farben Aktiengesellschaft*, visando desenvolver uma nova metodologia para obter imagens com nêutrons. Adotando a metodologia de Kallmann e Kuhn, o pesquisador O. Peter [26] do Laboratório *Forschungsanstalt der Deutschen Reichspost* foi capaz de radiografar diferentes objetos, utilizando um acelerador como fonte de nêutrons. Os últimos experimentos foram finalizados em dezembro de 1944, antes que o exército russo chegasse a Berlim. Todos os equipamentos e grande parte dos documentos referentes a essas investigações foram

perdidos, durante a Batalha de Berlin 1944/45. A pesquisa nuclear reiniciou dez anos depois, em 1955, após a Primeira Conferência de Genebra.

O estudo de fluídos dinâmicos no interior de metais é de grande importância para muitas indústrias e uma ferramenta valiosa em várias linhas de pesquisa. Um programa implantado no *Penn State Breazeale Reactor (PSBR)* utilizou a técnica de Neutronografia em tempo real para visualizar as características de líquidos em sistemas estáticos e dinâmicos. Em 1987, Cimballa et al aplicaram a Neutronografia na visualização de fluidos [16]. Para isso, fizeram uso do reator TRIGA do *PSBR*, capaz de pulsar 2 MW ou 1 MW de potência, com fluxo térmico de aproximadamente $1,0 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$. O sistema de imageamento em tempo real consistiu de uma tela conversora/cintiladora de $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ com 50 μm espessura escolhida de forma a minimizar as sensibilidades para raios-X e raios- γ , junto a tela ficava o fotocátodo do tubo intensificador de imagens. Para os líquidos testados no *PSBR*, o líquido eletrônico *3M – FC – 70* da *3M Corporations*, foi indicado por ser o refrigerante bifásico mais transparentes aos nêutrons. Partículas sólidas de óxido de boro, esferas revestidas de gadolínio, gotas de água, cloreto de cádmio e óxido de gadolínio em pó foram introduzidos no líquido de forma a melhorar o contraste da imagem. Os nêutrons térmicos penetraram facilmente nos metais e os fluidos no interior deles foram visualizados com a Neutronografia, bem como a trajetória dos traçadores. A técnica utilizada mostrou-se útil para a visualização de vários objetos no interior de um líquido que escoam no interior de peças metálicas, tais como válvulas, motores, componentes de transmissão, etc.

Em 1990, Y. Ikeda, K. Ohkudo, M. Tamaki et al utilizaram o método de radioscopia com nêutrons para a visualização em tempo real dos movimentos dos fluidos dinâmicos e estudaram o comportamento de metais derretidos [5]. Para obterem imagens nítidas em tempo real, foi usado o fluxo de nêutrons térmicos na ordem de $10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$, na posição da imagem de três reatores de pesquisa: *Kyoto University Research Reactor (KUR)*, *Musashi Institute of Technology Research Reactor (MITRR)* e *Rikkyo University Reactor (RUR)*. O sistema de imagem foi montado de maneira que acomodasse tanto a Neutronografia com filme radiográfico quanto a em tempo real. A câmera de TV era de alta sensibilidade e o sinal de saída era seguido de um processador de imagem temporário *Image Σ* do *Japan Avionics Co*. O processamento da imagem em tempo real foi possível com esse

processador, mas para favorecer a análise da imagem, o sinal de saída era gravado e transferido para um microcomputador contendo programas para análise de imagens. A Universidade de Nagoya fabricou vários tipos de tubulações de troca de calor com diferentes geometrias que destinavam-se ao escoamento de líquidos, tais como: água, água pesada, álcool iso-octane ou outros fluidos orgânicos, além de sódio líquido ou lítio. Em arranjos com escoamentos bifásicos, o ar foi misturado com água num misturador e as velocidades aparentes de escoamento da água variaram de 0,01 *m/s* a 0,5 *m/s*, enquanto que as do ar, de 0,05 *m/s* a 2,25 *m/s*. Nessas velocidades, vários tipos de escoamentos foram observados. A visualização do escoamento bifásico nas tubulações de aço foi possível por Neutrongrafia em tempo real, em tubos de 23 *mm* e 2 *mm* de diâmetro e espessura. As imagens observadas em tempo real por *Ikeda et al* forneceram vários padrões de escoamentos que concordaram com os resultados obtidos por Mandhane [6].

Em 1990, S. Fujine, K. Mishima, K. Yoneda et al introduziram a técnica de NRTR para visualizar o escoamento bifásico gás-líquido num duto retangular estreito [7] e para medir a fração de vazio, após o processamento das imagens. As experiências foram realizadas nos reatores *KUR* e *NSRR* do *Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)*. A aplicação da técnica de Neutrongrafia em tempo real na análise do escoamento bifásico em dutos metálicos exigiu os seguintes procedimentos: (1) simulação experimental usando o método óptico para o escoamento ar-água num duto transparente; (2) experimento usando NRTR para escoamento ar-água num duto de alumínio; (3) experimento usando NRTR para o escoamento ar-água num duto de aço aquecido. Dois sistemas de imagens com câmeras distintas foram utilizados. O primeiro sistema era composto de uma câmera *Orticon (HITACHI XTV – 10 A)* com tela conversora de $Gd_2O_2S(Tb)$ *SAKURA KH*; o segundo foi um SIT (*Tóquio Denshi – Kogyo VC – 7000*) com conversor NE – 426 (LiF+ZnS(Ag)). As imagens obtidas pelo método óptico foram de ótima qualidade, sendo reproduzidas e processadas para o cálculo da fração média de vazio. Na NRTR, a visualização dos escoamentos, *slug* e anular, relativamente aos dois sistemas, foi obtida e as imagens processadas resultaram de boa qualidade. A fração média de vazio total foi calculada e *Fujine et al* concluíram que o sistema *on line* de nêutrons produziu imagens de vídeo de

boa qualidade e que a fração média de vazio obtida com o processamento das imagens neutronográficas concordou com a obtida pelo método óptico.

Em novembro de 1987, o *Phoenix Memorial Laboratory (PML)* e o *Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)* assinaram um convênio de cooperação acadêmica e técnico-científica envolvendo pesquisadores e estudantes. Visto que o escoamento bifásico em canais estreitos tem atraído a atenção em muitos projetos científicos, então, em 1992, S. Fujine, T. Hibiki, K. Mishima et al (*KURRI*) e J. T. Lindsay, H. S. Fogler e J. C. Lee (*PML*) estudaram a visualização dos fenômenos de fluidos usando a Neutronografia [4]. Foram utilizados os fluxos de $1,2 \times 10^6 \text{ n.cm}^2.s$ do reator *KUR* e $3,2 \times 10^6 \text{ n/cm}^2.s$ do *Ford Nuclear Reactor (FNR)*. Para o sistema radioscópico com nêutrons, foram usados: uma tela fluorescente de nêutrons, uma câmera TV de alta sensibilidade e um microcomputador para o processamento das imagens. A fim de comparar o sistema de Neutronografia do *KUR* com o sistema do *FNR*, foram executados experimentos preliminares, que consistiam em obter imagens de: pequenos furos numa chapa de cádmio e uma espiral feita de corda de nylon com diferentes diâmetros, ao redor de um cilindro de cerâmica. Para a visualização do escoamento bifásico, ar-água, um tubo circular (2 mm diâmetro interno) e um duto retangular (1 mm de espessura e 40 mm de largura), ambos de alumínio, foram montados. A água foi pressurizada para cima por uma bomba e o ar foi fornecido por um compressor. Os resultados mostraram que, para o escoamento bifásico, as imagens obtidas no *FNR* assemelharam-se às do *KUR*. Com relação às imagens da corda de nylon, o sistema instalado no *FNR* forneceu imagens com melhor resolução. Para objetos estáticos o sistema *LIXI NID* utilizado no *FNR* apresentou excelente resolução espacial.

Quando o escoamento multifásico ocorre num tubo ou recipiente transparente, a visualização é fácil, entretanto, quando as condições operacionais exigem alta temperatura e pressão, torna-se difícil, sendo assim, a utilização de raios-X ou nêutrons para observar o interior de objetos opacos se torna viável. Em 1992, K. Sonoda, A. Ono, N. Takenaka, T. et al utilizaram NRTR no *Sumimoto Heay Industries* em Tokyo, para visualizarem o escoamento de água disperso num bocal ejetor de alumínio [14]. O bocal foi construído com alumínio e a água utilizada, foi aquecida a 60 °C, por meio de um aquecedor elétrico,

após ser pressurizada por meio de bombas. Quando a pressão e temperatura da água no tanque atingem determinados valores, inicia-se a irradiação no bocal. As imagens de vídeo foram feitas numa taxa de 30 quadros por segundo, com equipamentos de vídeo NTSC. As imagens tridimensionais foram reconstruídas, por tomografia computadorizada de imagens bidimensionais em várias direções, através da rotação do objeto, uma vez que a fonte de nêutron é fixa. Os resultados experimentais foram comparados com resultados analíticos e concluíram que a distribuição bidimensional da fração de vazio do escoamento bifásico de um componente de água em um bocal, bem como, a visualização tridimensional do escoamento disperso no recipiente foram obtidas por NRTR e algumas técnicas de processamento de imagens, mostrando que a Neutronografia em tempo real era aplicável para medidas de fração de vazio e visualização de escoamentos bifásicos 3D.

No mesmo ano, F. Ogino, M. Kamata, K. Mishima et al aplicaram a técnica de Neutronografia para o estudo do escoamento bifásico sólido líquido [20]. Do ponto de vista da Engenharia Química, este estudo foi importante para medir a velocidade de escoamento do líquido e das partículas sólidas, pois são indispensáveis para avaliação da transferência de massa e de calor entre o sólido e o líquido. Já a compreensão do estudo gás-sólido é muito utilizada em “secadores” de grãos agrícolas. As pesquisas anteriores para as medidas dessas velocidades utilizavam técnicas limitadas, uma vez que a existência de partículas sólidas no fluxo impedia sua visualização pelo método óptico. Assim a técnica de Neutronografia foi usada para visualizar o movimento das partículas sólidas, em termos de seus perfis e de suas velocidade e trajetória. Como fonte de nêutrons utilizou-se o reator do *KUR* que, operando com potência de 5 MW, fornece um fluxo de $1,2 \times 10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$, razão L/D e n/γ de 100 e $1,1 \times 10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{mR}$, respectivamente, no canal experimental E-2 as imagens foram obtidas usando um sistema em tempo real para visualização do movimento das partículas e o método convencional com filme radiográfico. O aparato construído para a visualização do movimento dessas partículas foi feito de alumínio em forma de duto cilíndrico com comprimento de 200 mm e 45 mm de diâmetro, junto a um bocal ejetor instalado na parte inferior do cilindro com 5 mm de diâmetro. As partículas sólidas e os líquidos de fluidos usados foram esféricos com de 1 mm e o *Fluorinert FC-77 (3M)*, respectivamente. Uma partícula de boro serviu de agente de contraste. A imagem do

escoamento bifásico sólido-líquido foi visualizada em tempo real, com o movimento da partícula traçadora registrado, porém, com baixa qualidade, carecendo de processamento digital. Ao adotarem o ajuste pela média das imagens, a imagem processada forneceu a posição da partícula traçadora de boro e, a partir dela, as trajetórias das partículas sólidas na camada foram obtidas e representadas por linhas sólidas. As velocidades verticais e radiais da partícula traçadora foram determinadas pelas distâncias por ela percorridas nos intervalos de 0,5 s ou 1 s. Sendo assim, *Ogino et al*, concluíram que os perfis das trajetórias e das velocidades das partículas podiam ser obtidos por NRTR e os perfis da densidade, através do método convencional, mostrando que seus resultados validavam a técnica neutronográfica, em particular, a Neutronografia em Tempo Real, para o estudo de escoamento bifásico em sólido-líquido.

Ainda em 1992, S. S. Glickstein, W. H. Vance e H. Joo utilizaram a NRTR para estudar o comportamento dinâmico de escoamento bifásico ar-água em tubulações e medir a fração de vazio [29]. Inicialmente, eles utilizaram um sistema com um tubo feito de vidro com 5 cm de diâmetro e com 61 cm de altura. O ar era injetado na parte inferior do tubo, através de outra tubulação contendo vários furos de pequeno diâmetro. A água foi circulada por meio de uma bomba e a mistura ar-água subia através da tubulação e o ar escapava de um tanque, aberto na parte superior. A imagem dinâmica do escoamento, com o tubo na posição vertical e inclinada, foi registrada, por uma câmera *Panasonic WV-BL600*. As vazões foram variadas entre 0 e 0,47 L/s de ar e entre 0 e 3,78 L/min de água. Em seguida, o tubo foi substituído por outro feito de aço inoxidável, com formato oval de aproximadamente 5 cm de largura. Os testes foram realizados no reator nuclear da Universidade do Estado da Pensilvânia que fornecia um fluxo de nêutrons térmicos da ordem de $10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$. As imagens obtidas pelo sistema neutronográfico em tempo real. A distribuição da medida de fração de vazio foi determinada, para várias combinações de vazões, mostrando que o experimento realizado credenciava a Neutronografia como uma técnica indicada para medidas de fração de vazio.

Em 1993, T. Hibiki, K. Mishima, K. Yoneda et al estudaram a visualização do escoamento bifásico e usaram técnicas para o processamento das imagens obtidas [3]. Eles

utilizaram a Neutronografia aliada ao processamento de imagens, para visualizar escoamentos bifásicos de ar-água e de vapor-água e mediram a fração de vazio, num duto retangular com espessura, largura e comprimento de 10 mm, 40 mm e 1400 mm, respectivamente, e num outro tubo cilíndrico de diâmetro interno, diâmetro externo e comprimento de 4,08 mm, 6,00 mm e 1200 mm, respectivamente. A pesquisa foi realizada nos reatores nucleares *Kyoto University Research Reactor (KUR)* e *Japan Research Reactor 3 (JRR3)*, em fluxos de neutrônicos de $1,2 \times 10^6 \text{ n/cm}^2.s$ e $1,5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2.s$, respectivamente, desses um feixe pulsado de nêutrons com uma fluência de $1,0 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$, provindo do *Nuclear Safety Research Reactor (NSRR)* foi utilizado. A fração média de vazio nos dutos foi obtida, após o processamento das imagens. No experimento realizado no *KUR*, foi usada a combinação da tela conversora cintiladora, NE-426 (LiF+ZnS(Ag)), e um tubo intensificador de silício (*Silicone Intensifier Target Tube – SIT*), fabricado pela *Tokyo Densi Kogyo VC –7000*. No experimento feito no *JRR3*, foi utilizada a combinação de um conversor fluorescente (*Kasei Opt NR*) e uma câmera de TV (*Hamamatsu C1000-12*). Com relação ao experimento realizado no *NSRR*, a combinação de um conversor fluorescente (*Kasei Opt NR*) e o sistema de vídeo de alta velocidade (*Nikon Kodak Ektapro 1000*) foi empregada, o que proporcionou aquisição de imagens neutronográficas na velocidade de 1000 quadros por segundo. Água deionizada foi pressurizada por uma bomba e o ar, fornecido por um compressor. O ar foi misturado à água numa câmera misturadora, fluindo para cima e descarregado na atmosfera, após passar por um separador. Para gerar o escoamento vapor-água, revestiram o tubo com uma “manta” aquecedora. Com os ensaios realizados no *KUR*, obtiveram imagens neutronográficas de escoamentos dos tipos *slug* e anular para a mistura ar-água no interior do duto retangular. Os feitos no *JRR3* geraram imagens de melhor qualidade. O escoamento do tipo *slug* também foi observado no tubo circular para a mistura ar-água e dos tipos *slug* e bolhas para a mistura vapor-água. Obtiveram a fração média de vazio, após efetuarem o processamento das imagens. Concluíram que a visualização de escoamentos bifásicos em dutos retangulares e cilíndricos de alumínio é possível de ser obtida por Neutronografia e que as características do escoamento bifásico podem ser observadas através das imagens neutronográficas.

Em 2000, M. R. Barbazelli analisou o escoamento bifásico em tubos capilares não-adiabáticos, usando o modelo com dois fluidos [10]. Ele apresentou um modelo numérico para a simulação do escoamento no interior de tubos capilares, os quais são largamente usados como dispositivos de expansão em sistemas de refrigeração e condicionamento de ar de pequeno porte. O escoamento ao longo do tubo capilar foi assumido unidimensional, em condições de regime permanente, sendo dividido uma região líquida e outra região bifásica. Barbazelli utilizou o modelo de dois fluidos para analisar a região bifásica, visando representar melhor o escoamento. Comparou os resultados técnicos com os dados experimentais obtidos em diferentes condições de operação e geometrias, utilizando o fluido refrigerante HFC-134a. O desvio absoluto entre as vazões em massa calculadas e as medidas foi 3,6 %. Barbazelli apresentou resultados adicionais que se referiam a fração de vazio, fração em massa e velocidade de cada fase, bem como, alguns métodos de solução das equações governantes do problema e métodos de estimativa da vazão em massa e da temperatura do fluido refrigerante na saída de sucção.

Em 2000, M. O. Menezes instalou um sistema neutronográfico em tempo real, num dos canais de irradiação do reator IEA-R1 do IPEN [9]. Neste sistema, foi utilizada uma tela conversora de $Gd_2O_2S(Tb)$, acoplada a um intensificador de Luz (*LIXI*), uma câmera de vídeo *Javelin Systems*, modelo JE8242, uma placa digitalizadora *Targa 1000* de 8 bits e um microcomputador. As imagens neutronográficas foram obtidas nas condições de fluxo de nêutrons de $1 \times 10^6 \text{ n/cm}^2.s$, razão de colimação L/D , de 70, e razão n/γ na ordem de $10^6 \text{ n/cm}^2.mR$ e energia efetiva dos nêutrons de 7 meV e depois processadas, mediante emprego de um programa computacional específico. Menezes objetivou a obtenção de imagens neutronográficas em tempo real e, conseqüentemente, demonstrar a viabilidade do sistema para a realização de ensaios estáticos e dinâmicos. O sistema neutronográfico em tempo real demonstrou ter sensibilidade de 0,07 cm em relação ao *Lucite* e resolução de 440 μm , obtida através da MTF (Modulation Transfer Function), para uma modulação de 90 %, correspondente à frequência espacial de 0,3 linhas/mm. Apresentou ainda algumas propostas para a melhoria do sistema, tais como, automatizar o sistema de foco e de iluminação da câmera de vídeo e utilizar uma placa de vídeo que permitisse a realização do processamento digital em tempo real.

Em 2002, N. Takenaka, J. Kadowaki, K. Tohara et al apresentaram um estudo para a visualização da cavitação do combustível em um bocal de um motor a diesel por Neutronografia [13]. Tendo em vista que a cavitação ocorre dentro do bocal de um motor a diesel e que a mesma afeta muito na injeção do combustível, a Neutronografia foi utilizada para visualizar o nível do combustível no interior dos bocais metálicos. As imagens foram obtidas por uma câmera CCD refrigerada que registrou as imagens de um bocal com injeção de combustível para caminhão, navio e dínamo. O combustível foi bem visualizado em todos os bocais metálicos. Bolhas de gás também foram vistas nitidamente pela Neutronografia. As imagens neutrongráficas foram convertidas para ópticas e capturadas pela câmera CCD. As injeções de combustível foram repetidas periodicamente para obter imagens neutrongráficas naquelas condições de injeções. *Takenaka et al* concluíram que as diferentes injeções de combustível nos carburadores de máquina a diesel puderam ser bem visualizadas pelo método por NRTR.

Visto que sistemas radioscópicos eram utilizados para inspeções de aeronaves, em 2003, W. J. Richards, M. J. Tuttle, K. Ulowetz et al resolveram adotar a NRTR nos ensaios não-destrutivos na indústria automotiva [18]. Para isso, usaram o fluxo de nêutrons provindo do reator de pesquisa TRIGA com potência de 2 MW do *UCD McClellan Nuclear Radiation Center*. O sistema de imagem radioscópica com nêutrons dispunha de um tubo *tri-field Thomson CSF* contendo um cintilador de sulfeto de óxido de gadolínio, uma câmera CCD e o programa de processamento de imagem *Datacube*. Como o feixe neutrônico permitia irradiar grandes amostras, inspecionaram o funcionamento do conjunto de motores e válvulas de transmissão. *Richards et al* examinaram motores em plena operação, com intuito de observar o processo de combustão, bem como a visualização de uma válvula solenóide do sistema de freio em ação. As imagens obtidas mostraram as taxas e padrões de enchimentos para várias pressões e orientações estruturais. Na inspeção das válvulas solenóides em operação no sistema de freios, as imagens com nêutrons mostraram a mudança da situação de válvula de aberta para fechada e a compararam em relação às condições com os fluxos padrões causados por tais movimentos.

Em 2003, F. J. O. Ferreira realizou um estudo de implantação de um sistema eletrônico de imagens neutronográficas no reator Argonauta do IEN/CNEN [8]. Tendo em vista que os sensores eletrônicos de imagens permitem inspecionar eventos dinâmicos ou objetos em tempo real, Ferreira pesquisou sobre quais seriam as características de um sistema neutronográfico dotado de um dispositivo eletrônico de obtenção de imagens, para futura implementação no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta. No sistema Eletrônico de Imageamento (SEI), o objeto em estudo podia ser visualizado por um sistema de câmera, vídeo e monitor acoplado. A imagem pode ser arquivada e processada por sistemas auxiliares, tais como, um vídeo cassete e microcomputadores. Utilizando uma tela cintiladora, uma câmera CCD e uma placa digitalizadora no interior de uma caixa a prova de luz, Ferreira conseguiu visualizar os objetos em tempo real. Para obter maior quantidade de dados experimentais que o auxiliassem na especificação adequada de um SEI com nêutrons, escolheu o SEI em tempo real, instalado no canal de irradiação nº 8 do reator nuclear de pesquisa IEA-R1, do IPEN/CNEN/SP, para testá-lo no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta do IEN/CNEN/RJ. Ferreira realizou, então, ensaios neutronográficos com filmes radiográficos dos Indicadores de Qualidade e resolução, nos reatores do IPEN e do IEN, e comparou as Neutronografias obtidas, buscando deduzir se os desempenhos do SEI, quando instalado em ambos, difeririam muito. Comparando essas imagens neutronográficas, Ferreira observou que as que utilizaram o sistema eletrônico eram de menor qualidade, porém, a resposta do sistema foi compatível com as dos sistemas utilizados em diversos laboratórios apresentando a vantagem da realização de ensaios dinâmicos em tempo real. O grupo de Neutronografia do LNRT/PEN/COPPE/UFRJ realizou trabalhos de grande importância para segurança pública nacional e internacional utilizando feixes de nêutrons térmicos para inspecionar narcóticos e explosivos plásticos, ocultos por algum tipo de materiais, obteve imagens de sete amostras com o SEI e comparou-as com as imagens delas produzidas com filme *A400S Industrex* da *Kodak* (com conversor de gadolínio de 100 μm de espessura). Ferreira observou que as imagens obtidas com o SEI eram tênues e de baixo contraste, quando comparadas com as obtidas com filme radiográfico, porém, o sistema neutronográfico com o SEI em tempo real foi capaz de caracterizar a presença de narcóticos e explosivos, a partir de amostras de composição conhecida, mesmo quando oculta. Concluiu ainda que o arranjo neutronográfico instalado no canal J-9 do reator Argonauta do

IEN estaria apto a realizar ensaios com um SEI, possibilitando a realização de ensaios neutrongráficos de eventos dinâmicos, como por exemplo, o escoamento de líquido em tubos metálicos. Concluiu ainda que o sistema de imageamento eletrônico permitiria uma inspeção de alta eficiência e menor tempo de exposição.

Em 2004, M. Ortega realizou ensaios neutrongráficos para investigar a formação de *slug* em tubulações horizontais, utilizando o modelo de dois fluidos [12]. Ortega desenvolveu um código numérico, baseado em um método proposto por Issa e Kempf, o qual pode prever, de forma automática, do crescimento natural das instabilidades, a formação de um *slug* e de séries de *slugs*. Para analisar o problema, ele considerou duas formulações, uma conservativa e outra não conservativa, comparando seus resultados numéricos aos disponíveis na literatura.

Em 2004, J. M. Cimbala, J. S. Brenizer, Jr, A. P. Chuang et al usaram a Neutronografia para o estudo de um tubo curvilíneo de calor (*Loop Heat Pipe – LHP*) [15]. Esses tubos eram usados em várias aplicações, tais como, refrigeração de aeronaves, trocas de calor, refrigeração de equipamentos eletrônicos, entre outros. Assim, *Cimbala et al* utilizaram as imagens neutrongráficas dos escoamentos para melhor compreenderem a operação de um *LHP*, usando a amônia como fluido de operação. Com o feixe de nêutrons provindo do reator de pesquisa TRIGA do *Breazeale Nuclear Reactor* da Universidade do Estado da Pensilvânia, operando a 1 MW de potência, o sistema de imagem *LIXI*, juntamente com equipamentos destinados ao processamento de imagens, observaram que a operação de um *LHP* era sensível a um efeito gravitacional. Obtiveram resultados também para escoamentos reversos, bifásicos e estados transitórios. Sendo assim, concluíram que a Neutronografia, não somente visualizou o escoamento de um *LHP*, como contribuiu muito para o entendimento de sua operação.

No mesmo ano, a radiografia com nêutrons frios mostrou ser adequada para a visualizar fenômenos termo-hidráulicos em componentes metálicos de uma máquina. Muitas das máquinas são construídas por metais e o fluido escoando contém hidrogênio. Como os nêutrons frios penetram muitos metais e são atenuados no fluido, N. Takenaka, K.

Sugimoto, K. Kawabata et al visualizaram a ação dos fluidos num bocal metálico de injeção de combustível de um motor a diesel [19]. A injeção do combustível no bocal foi visualizada, utilizando uma tela conversora de LiF/ZnS inclinada a, aproximadamente, 60 graus, em relação à direção do feixe de nêutrons. A inclinação da tela conversora foi a metodologia proposta pelos autores para aumentar a resolução espacial. As imagens foram processadas e mostradas de três formas diferentes: normal, girada e comprimida, mostrando que a resolução espacial horizontal aumentou, embora a resolução vertical não tenha mudado.

Ainda em 2004, Harold Berger [2] relatou os avanços da técnica neutronográfica e suas aplicações, no periódico internacional *Applied Radiation and Isotopes*. Há cerca de 104 Centros de Pesquisas que usam Neutronografia no mundo, sendo que, aproximadamente, 75 % deles utilizam os reatores nucleares como fonte de nêutrons. Os aceleradores de partículas fornecem feixes de nêutrons para diversos tipos de inspeções; o *mini-ciclotron*, por exemplo, pode se utilizado para serviços de inspeções móveis ou fixos, podendo fornecer um feixe de nêutrons de $7,3 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ e uma razão L/D de 100 [27]. Uma fonte de nêutrons que pode oferecer vantagens para problemas de transportes é a *fonte focus plasma* [28], pois pode ser particularmente atrativa para uma Neutronografia com nêutrons rápidos. Para o sistema de aquisição de imagens em tempo real as câmeras CCD mostraram possuir boa sensibilidade, porém, um ruído constituído de pontos brancos é freqüente, proveniente da radiação espalhada pelo sistema eletrônico. O uso de técnicas de processamento de imagem e o projeto da câmera propiciam a redução desse efeito espúrio nas imagens, porém, essa radiação causa danos à CCD. Alternativamente, outros sistemas com câmera CCD podem ser considerados, tais como, o *Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)* ou *Charge Injection Device (CID)*. O *CID* mostrou-se muito tolerante a esse tipo de ruído. Muitos desses recursos foram usados nas investigações tomográficas de peças com feixes de nêutrons. Os métodos de filme foram usados antes para inspecionar as linhas de montagens de combustível nuclear. As investigações com Tomografia Computadorizada (CT) são mais recentes e têm sido empregadas para a obtenção de imagens eletrônicas em planos específicos ou tridimensionais. Nêutrons frios podem ser empregados quando materiais leves, tais como, o hidrogênio, estão revestidos

por materiais pesados como o aço. Para melhorar a transmissões em estruturas que atenuam muito os nêutrons térmicos, como, por exemplo; linhas de montagens de combustível enriquecido de reatores e materiais biológicos, um feixe com nêutrons epitérmicos devem ser empregados. H.Berger certamente não tocou em todas as aplicações da Neutronografia, por exemplo: médica-biológica, metalúrgica, artes, investigação de fluxo e difusão, entre outras, onde recentes conferências internacionais fornecem descrições destas aplicações. Berger conclui que a Neutronografia continuará servindo como um método útil para os Ensaio Não Destrutivos.

Tendo em vista a dificuldade da visualização nas mudanças do estado de calor no interior de materiais metálicos, em 2005 T. Kim, Y. Jung, M. Kim et al usaram a técnica de imagens por nêutrons para visualizar escoamentos bifásicos no interior de mini-tubos [17]. Alguns métodos indiretos têm sido desenvolvidos para observações de padrões dos escoamentos em tubulações metálicas, como por exemplo, janelas que são instaladas em pontos de visão ou guias condutoras, porém ainda são restritas as limitações, entretanto quando se aplica a técnica de Neutronografia algumas destas limitações são solucionadas. As Neutronografias foram realizadas nos canais BNCT e N/R em *HANARO* no *Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)*. O fluxo de nêutrons, a razão $n-\gamma$ e a razão L/D , para o canal *BNCT*, eram : $2,58 \times 10^8 \text{ n/cm}^2.s$; $1,48 \times 10^8 \text{ n/mR}$ e 55,2, enquanto que, para o canal *N/R*, eram: $5,97 \times 10^6 \text{ n/cm}^2.s$, $3,39 \times 10^6 \text{ n/mR}$ e 266. O sistema de imagem neutronográfica instalado no salão neutronográfico era composto de um cintilador, uma caixa com espelho, e uma câmera CCD. O aparato foi construído com dois grupos de material de tubo (Al e Cu) e três grupos de diâmetros (1/4", 1/8" e 1/16"); os tanques superior e inferior eram conectados por dois tubos que faziam circular a água. Cada tubo de teste foi envolvido por um fio aquecido, que permitia um fluxo de calor ajustado adequadamente. Os tanques foram preenchidos com refrigerante HFC – 134a, que era aquecido pelo fio e evaporava quando o fluxo subia pelo tubo teste. As imagens pós-processadas dos tubos de 1/4", a uma determinada temperatura, mostraram bolhas menores que as com temperaturas maiores. Para os tubos menores que 1/4", o fenômeno bifásico não pode ser visualizado nitidamente. *Kim et al* concluíram que se a técnica experimental foi otimizada para mini-tubos e

materiais de alta atenuação e consideraram que a Neutrongrafia era uma boa técnica para visualização desses escoamentos no interior de tubos metálicos.

CAPÍTULO II

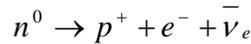
CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

A Neutronografia é uma técnica não destrutiva de visualização de imagem capaz de investigar as características internas de uma amostra. A transmissão dos nêutrons num material é função da probabilidade de interações possíveis entre um nêutron e cada núcleo do material, sendo expressa pela grandeza denominada seção de choque microscópica. A atenuação diferencial dos nêutrons num meio pode ser medida, mapeada e visualizada, onde a imagem resultante pode então ser utilizada para se avaliar as características internas da amostra, em termos da existência ou não de discontinuidades ou defeitos, sem alterar as características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais da amostra e não interferindo em seu posterior uso. Este capítulo destina-se a uma breve descrição teórica dos parâmetros físicos atrelados à técnica neutronográfica.

II.1 – Interação dos nêutrons com a matéria

A evidência de uma partícula neutra no núcleo atômico foi sugerida por Ernest Rutherford, em 1920, quando apresentou os resultados de suas experiências a Sociedade Real de Londres. Para Rutherford, o isótopo de ^{17}O poderia ser o já conhecido ^{16}O , acrescentado de uma partícula neutra com massa aproximadamente igual a do então conhecido próton. A interpretação de tal radiação como uma partícula neutra – *o nêutron* – foi feita, em 1932, pelo físico inglês James Chadwick, ao afirmar que partículas alfa expulsavam do núcleo de berílio partículas neutras e que recuavam prótons da parafina. Chadwick, por comparação entre a ionização do nitrogênio e do hidrogênio, avaliou a massa do nêutron com um valor situado entre 1,005 e 1,008 (*u.m.a*), ligeiramente maior que a do próton.

O nêutron livre é uma partícula radioativamente instável, cuja meia vida é de 12,8 min, dada pelo decaimento:



onde: $\bar{\nu}_e$ é o anti-neutrino eletrônico.

Supondo o núcleo atômico como uma representação esférica de raio R , e que uma partícula se move na direção que passa pela secção reta dessa esfera, compreende-se que a área da superfície dessa secção serve de medida da probabilidade de ocorrência de colisão entre a partícula e o núcleo. Então, a probabilidade de um evento particular ocorrer entre um nêutron e o núcleo é expressa através do conceito de *secção de choque* (σ).

Uma outra compreensão para o entendimento do conceito de secção de choque microscópica é considerar a probabilidade de um nêutron individual passar através de uma fina camada de um material com área A contendo um número de núcleos alvos, N , cada um com área seccional s . A soma de todas as áreas do núcleo é Ns . A área seccional de choque físico, s , de um núcleo pesado é de aproximadamente $2,0 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$. As seções de choque microscópicas para muitos núcleos são tipicamente entre 10^{-27} cm^2 e 10^{-21} cm^2 . Por questões algébricas, uma unidade de área foi definida, o *barn* (b), de modo que a área seccional transversal física de um núcleo pesado seja 2 b, ou seja, 1 *barn* corresponde a 10^{-24} cm^2 .

As interações dos nêutrons com os núcleos podem ser de dois tipos: *espalhamento* ou *absorção*. Quando o nêutron é *espalhado* por um núcleo, sua velocidade e direção mudam e o núcleo é deixado com o mesmo número de prótons e nêutrons que tinham antes da interação. O núcleo recuará e pode ser deixado em estado excitado, o que conduzirá à liberação eventual de uma radiação eletromagnética. Na reação de *absorção* do nêutron pelo núcleo, diferentes tipos de radiações podem ser emitidas, podendo, inclusive, induzir a uma fissão do núcleo.

Os eventos de espalhamento podem ser subdivididos em *elástico* e *inelástico*. No *espalhamento elástico* (n, n), a energia cinética total (a do nêutron e a do núcleo) não é modificada pela interação. Durante a interação, uma fração da energia cinética dos nêutrons é transferida para o núcleo, que recua. Para um nêutron com energia cinética, E , encontrando um núcleo de peso atômico, A , a energia média perdida por colisão é dada por

$\frac{2EA}{(A+1)^2}$. Assim sendo, para se reduzir a velocidade dos nêutrons (moderá-los) com a

menor quantidade de colisões elásticas com os núcleos alvos, deve-se utilizar núcleos leves

(A pequeno). Para o hidrogênio, por exemplo, a energia média perdida será $E/2$ por colisão. Um nêutron com 2 MeV de energia cinética deverá ter em média 1 MeV , após a primeira colisão com um núcleo de hidrogênio, e assim por diante. Para atingir a energia cinética de $0,025 \text{ eV}$ serão necessárias 27 colisões. Com essa energia o nêutron estará em *equilíbrio térmico* com sua vizinhança, sendo assim considerado um *nêutron térmico*.

Expandindo-se a expressão $\frac{2EA}{(A+1)^2}$, tem-se que, após n -colisões elásticas, a energia dos nêutrons será:

$$E_n = E_0 \left[\frac{(A^2 + 1)}{(A + 1)^2} \right]^n \quad (2.1)$$

O número médio de colisões para o nêutron reduzir sua velocidade de E_0 para E_n , será dado por:

$$n = \frac{\log\left(\frac{E_n}{E_0}\right)}{\log\left[\frac{(A^2 + 1)}{(A + 1)^2}\right]} \quad (2.2)$$

A tabela II.1 mostra o número de colisões necessárias para termalizar nêutrons de 2 MeV , em diferentes materiais.

Tabela II.1 – Número médio de colisões necessárias para reduzir a energia dos nêutrons de 2 MeV para 0,025 eV, por espalhamento elástico.

Elemento	Peso atômico	Número de colisões
Hidrogênio	1	27
Deutério	2	31
Hélio	4	48
Berílio	9	92
Carbono	12	119
Urânio	238	2175

Embora o estudo das interações dos nêutrons com um único núcleo forneça uma base para a compreensão do processo de interação, as medidas são realizadas com amostras de espessuras consideráveis, que são descritas pelas seções de choque macroscópicas dos materiais.

A definição de *seção de choque macroscópica* é obtida pela transmissão de um feixe paralelo de nêutrons por uma amostra de determinada espessura. A espessura da amostra pode ser considerada um conjunto de finas camadas, para os quais se aplica o conceito de seção de choque microscópica. Ao se integrar as finas camadas atômicas alcançando a espessura da amostra, x , a intensidade do feixe de nêutrons que a atravessam sem sofrer colisão, $I(x)$, pode ser representada por:

$$I(x) = I_0 e^{-N\sigma_t x} \quad (2.3)$$

onde:

I_0 é a intensidade do feixe antes de penetrar a amostra, [$n/cm^2 \cdot s$];

N é a densidade atômica [$\text{átomos}/cm^3$];

σ_t é a seção de choque microscópica total, barn (b).

A figura II.1 mostra a intensidade de um feixe colimado de nêutrons ao atravessar uma camada de espessura L do material.

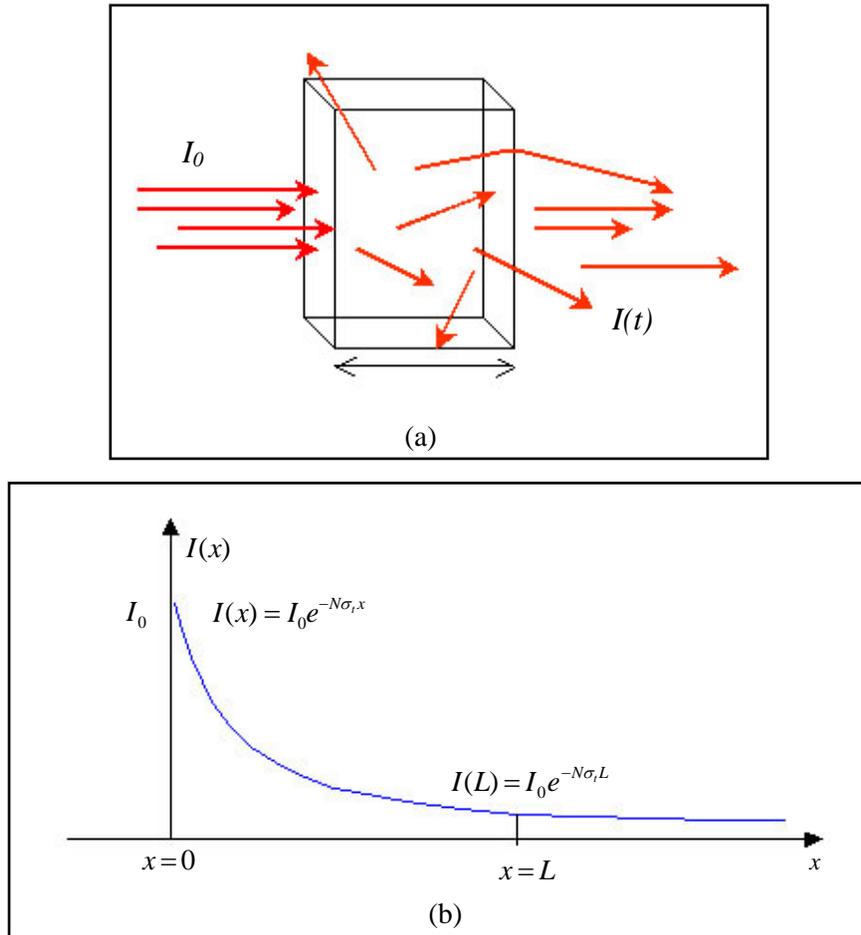


Figura II.1 – (a) Representação esquemática da interação de um feixe paralelo de nêutrons com os núcleos das camadas finas da amostra; (b) Intensidade de um feixe neutrônico paralelo ao atravessar diferentes espessuras da amostra.

A seção de choque macroscópica total é:

$$\Sigma_t = N\sigma_t \quad (2.4)$$

com dimensões de cm^{-1} . Se a amostra for composta de vários elementos químicos, a seção de choque macroscópica total é a soma das seções de choque macroscópicas totais de todos os elementos.

$$\Sigma_t = \sum_{i=1}^n \Sigma_{ti} \quad (2.5)$$

A seção de choque macroscópica total pode ser expressa em termos da densidade atômica, N_i , de cada elemento por:

$$\Sigma = \frac{\rho N_a}{M} \left(\sum_{i=1}^n n_i \sigma_{ti} \right) \quad (2.6)$$

onde:

$$N_i = \rho \frac{N_a n_i}{M} \quad (2.7)$$

ρ é a densidade do composto;

M é o peso molecular do composto;

N_a é o número de Avogrado ($6,022 \times 10^{23}$ átomos/mol);

n_i é o número de átomos do elemento i numa molécula.

No *espalhamento inelástico* (n, n'), (n, n', γ), não há conservação de energia, assim podendo emitir fótons. Para este processo, o nêutron deve ter energia muito superior a 1 *MeV*, para que possa perturbar o núcleo atômico.

Além das interações citadas dos nêutrons com os núcleos dos materiais [21], outras podem ocorrer, tais como:

- Na *absorção*, onde o núcleo captura o nêutron que provoca uma mudança no seu estado, pois não há conservação de energia cinética, uma vez que parte dela excita o núcleo formado, tendendo, posteriormente, ao estado fundamental pela emissão de um ou mais fótons ou partículas.
- Na *captura radioativa*, (n, p), ($n, 2n$), (n, γ) ou (n, α), onde o nêutron é capturado pelo núcleo e fótons ou partículas carregadas são emitidas. A probabilidade de ocorrer uma captura radioativa é maior para nêutrons de baixa energia.
- Numa *reação de fissão*, o núcleo se parte em dois ou mais fragmentos, produzindo dois ou três novos nêutrons.

II.2 – Fontes de nêutrons

Pode-se obter feixes de nêutrons a partir de um reator nuclear, de um acelerador ou de uma fonte radioisotópica. Alguns fatores, tais como: intensidade e energia dos nêutrons produzidos, intensidade e energia da radiação γ que acompanha o feixe de nêutrons, custo, tamanho, portabilidade e blindagem necessária devem ser considerados na escolha de uma determinada fonte. É possível reduzir a energia dos nêutrons, fazendo-os colidir com os núcleos de certos materiais. Este processo é denominado *moderação de nêutrons*. Os nêutrons são classificados por sua energia cinética, de acordo com a faixa energética em que se encontram, conforme especificado na tabela II.2.

Tabela II.2 – Classificação dos nêutrons segundo sua energia cinética [9].

Classificação	Faixa de energia
Nêutrons lentos	$0 < E < 1 \text{ keV}$
Nêutrons frios	$E < 0,01 \text{ eV}$
Nêutrons térmicos	$0,01 \text{ eV} < E < 0,5 \text{ eV}$
Nêutrons epitérmicos	$0,5 \text{ eV} < E < 10^4 \text{ eV}$
Nêutrons de ressonância	$1,0 \text{ eV} < E < 100 \text{ eV}$
Nêutrons rápidos	$1 \text{ keV} < E < 20 \text{ MeV}$
Nêutrons ultra-rápidos	$E > 20 \text{ MeV}$

II.2.1 – Reatores nucleares

Quando o objetivo do reator nuclear não é a produção de energia, mas a produção de nêutrons para pesquisa, ele é chamado de *reator de pesquisa* e, neste caso ele opera em baixa potência, comparada à dos reatores de potências.

Num reator nuclear, os elementos mais usados como combustível são: urânio natural (^{nat}U), urânio enriquecido, ^{239}Pu e ^{233}U . A concentração do isótopo físsil ^{235}U é de

apenas 0,72 % da composição do urânio natural. Os núcleos de ^{238}U (férteis) correspondem aos 99,28 % restantes, o que significa que somente uma pequena fração do material é físsil e, portanto, pode capturar nêutrons térmicos e produzir 2 a 3 nêutrons rápidos por fissão nuclear. Aumentando-se a concentração de ^{235}U , ou seja, “*enriquecendo*” a amostra, para até 2 a 3% [22], a produção de nêutrons por fissão nuclear aumentará, proporcionando a extração de um feixe neutrônico caracterizado pela sua intensidade e distribuição energética.

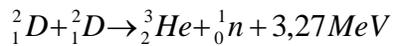
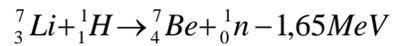
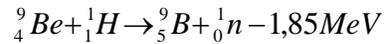
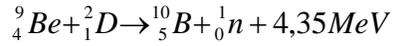
Os elementos físséis ^{239}Pu e ^{233}U são obtidos dos núcleos ^{238}U e ^{232}Th , respectivamente, a partir da captura de nêutron, seguida de dois decaimentos beta. Como os nêutrons liberados no processo de fissão são bem energéticos, $\sim 2 \text{ MeV}$ (rápidos), é necessário reduzir-se essa energia, através do emprego de materiais moderadores, tais como, o grafite, a água e a água pesada (D_2O) que têm a função de diminuir a energia dos nêutrons liberados, na fissão por colisões elásticas, sem absorver-los transformando-os em nêutrons lentos.

Nas proximidades do núcleo de um reator de fissão nuclear, o fluxo neutrônico pode atingir cerca de $10^{14} \text{ nêutrons/cm}^2 \cdot \text{s}$. Através de um canal que liga o núcleo à parte externa do reator pode-se realizar experiências com o feixe neutrônico extraído do mesmo.

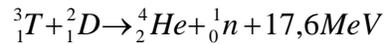
II.2.2 – Aceleradores de partículas

Os nêutrons também podem ser produzidos através de uma reação nuclear envolvendo um núcleo-alvo e uma partícula acelerada. O processo de produção baseia-se na colisão entre uma partícula energética com um alvo fixo de material leve, que resulta num núcleo composto excitado. Se a energia total de excitação for maior do que a energia de ligação do último nêutron no núcleo composto, a emissão de um nêutron é provável. O alvo mais utilizado é o núcleo do berílio, pelo fato de apresentar o menor valor para energia de ligação entre todos os nuclídeos, cerca de $1,65 \text{ MeV}$. Outros alvos, por exemplo: deutério, trítio e lítio também são usados. Há duas classes para os aceleradores de partículas: os aceleradores de alta potência e os de baixa potência.

Na primeira classe, utiliza-se o acelerador linear (*Linac – Linear accelerator*), o acelerador de *Van de Graff* e os *ciclotrons*. Nesses aceleradores, as partículas incidentes devem possuir alta energia cinética para vencer a barreira coulombiana apresentada pelo núcleo alvo. Abaixo é apresentada as reações usualmente envolvidas nestes aceleradores.



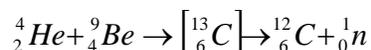
Na segunda classe os *mini aceleradores* são utilizados, estes apresentam a vantagem de serem “móveis”, pois são portáteis [30]. A reação na qual se baseia este acelerador é a seguinte:



II.2.3 – Fontes radioisotópicas

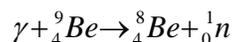
São fontes compostas de um material alvo e de um radioisótopo. Os nêutrons são produzidos pela reação nuclear no material alvo provocada pela incidência de uma radiação emitida por algum radioisótopo. Estas fontes apresentam as vantagens de serem “móveis” e de fácil operação, porém são menos intensas comparadas aos reatores nucleares e aceleradores de partículas. Dentre as reações nucleares mais importantes nestas fontes estão as do tipo (α, n) e (γ, n) .

A reação responsável pela descoberta do nêutron pode ser usada para produção de nêutrons apropriados para laboratórios. O isótopo estável do berílio ${}^9\text{Be}$ tem uma energia de ligação do último nêutron de $1,65 \text{ MeV}$. Se uma partícula alfa de $5,6 \text{ MeV}$ típica de um decaimento radioativo interagir com um núcleo de ${}^9\text{Be}$, o último nêutron pode ser liberado, formando a reação nuclear:



Para haver uma taxa constante de produção de nêutrons, mistura-se ${}^{226}\text{Ra}$ junto ao berílio. A energia mais provável e a taxa de produção do nêutron são de aproximadamente, 5 MeV e 10^7 nêutrons por segundo para cada Ci de ${}^{226}\text{Ra}$, respectivamente. Pelo fato do ${}^{226}\text{Ra}$ apresentar elevada taxa de emissão radiação gama, a fonte Ra-Be foi substituída pelas fontes que usam ${}^{210}\text{Po}$, ${}^{238}\text{Pu}$ e ${}^{241}\text{Am}$, que produzem cerca de $2\text{-}3 \times 10^6$ nêutrons por segundo por Ci de atividade.

Num processo similar a fonte (α, n) discutido acima, pode-se usar a reação (γ, n) para produzir nêutrons. A vantagem da produção fotoneutrônica é que os nêutrons produzidos são quase monoenergéticos. Por exemplo, o ${}^{24}\text{Na}$ emite um raio- γ de $2,76 \text{ MeV}$, que, ao ser absorvido pelo núcleo de berílio, teria energia suficiente para superar a energia de ligação do ${}^9\text{Be}$, segundo a reação nuclear:



Nesse caso, o rendimento da reação é de 2×10^6 nêutrons por segundo por Ci de ${}^{24}\text{Na}$, mas a meia vida da fonte radioativa ${}^{24}\text{Na} - {}^9\text{Be}$ é curta, cerca de 15 h. A energia do nêutron emitido é de $0,8 \text{ MeV}$. Os alvos para produção fotoneutrônica são restritos somente ao berílio e o deutério, pois a energia das radiações γ emitidas pelos radioisótopos são de MeV [9]. Estas fontes possuem uma elevada intensidade de radiação eletromagnética de fundo, que, além de contaminar o feixe extraído, provoca aumentos significativos nas blindagens radiológicas e atribuirá restrições ao sistema de imageamento. Este problema de contaminação está presente também nas fontes (α, n) , com exceção daquelas que utilizam o ${}^{210}\text{Po}$, que é um emissor α -puro, e o ${}^{241}\text{Am}$, cuja radiação γ tem baixa energia.

O ${}^{252}\text{Cf}$ é uma das fontes mais usadas de nêutrons que são originados por *fissão espontânea*, tendo uma meia-vida de 2,65 anos. Os nêutrons são produzidos diretamente no processo de fissão, numa taxa de cerca de 4 nêutrons por fissão, sendo que a fissão ocorre somente em aproximadamente 3% do decaimento. A taxa de produção é $2,3 \times 10^{12}$ nêutrons

por segundo por grama de ^{252}Cf . As energias dos nêutrons são características a fissão com energia média de 2 MeV [31].

II.3 – A Neutronografia

II.3.1 – Uma breve descrição histórica

Como já visto no capítulo I, as primeiras Neutronografias foram feitas em Berlim, entre 1935 e 1938, usando fontes de Ra-Be e um gerador de nêutrons. Em 1948, foram publicados os primeiros resultados descrevendo idéias básicas sobre a técnica neutronográfica. Porém, nos anos seguintes o desenvolvimento com tal estudo foi comprometido devido ao período de guerra. Após este período de pouca produção, na década de 60, as pesquisas foram reiniciadas e a Neutronografia foi se tornando uma poderosa técnica de inspeção não destrutiva.

A Neutronografia é obtida posicionando-se a amostra a ser inspecionada entre um fluxo colimado de nêutrons e um conjunto formado por um conversor de nêutrons em luz e um sistema de imageamento.

Para um fluxo de nêutrons térmicos, a probabilidade de uma interação do nêutron com o material alvo depende do nuclídeo e não exibe um comportamento tão suave quanto as seções de choque para raios- X , que aumentam continuamente com o número atômico do material. Esta afirmativa pode ser visualizada nas curvas apresentadas na Figura II.2, onde também observa-se que a seção de choque total para nêutrons térmicos é muito maior para o hidrogênio e outros elementos leves do que para quase toda a maioria dos metais, apresentando um comportamento oposto aos raios- X .

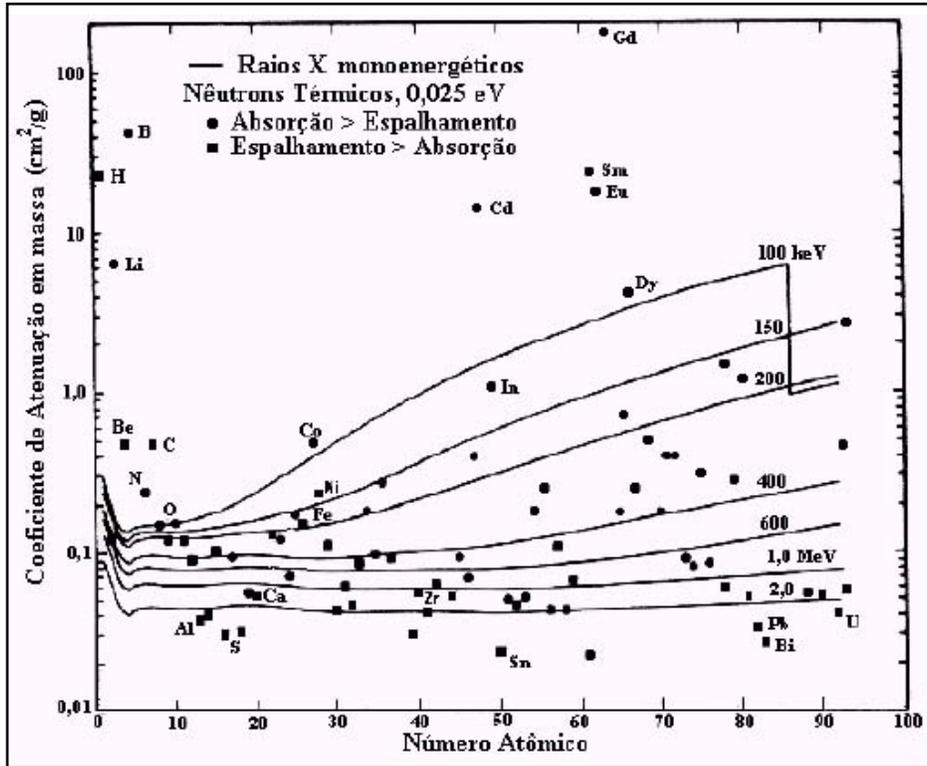


Figura II.2 – Comparação entre os coeficientes de atenuação de alguns elemento para nêutrons térmicos e raios- X [23].

II.3.2 – Transmissão de nêutrons pela matéria

O procedimento de transmissão de um feixe de nêutrons monoenergéticos pode ser descrito pela lei básica da atenuação da radiação com a matéria, como descrito anteriormente. Qualquer não homogeneidade ou defeito nas regiões internas da amostra inspecionada resulta em uma mudança na intensidade do feixe de nêutrons emergente, que fica registrado no detector. A figura II.3 ilustra o princípio de detecção baseado nas diferenças de intensidade dos feixes,

Se a amostra tem uma espessura L e o defeito (ou vazio) encontrado possui largura d , a intensidade do feixe de nêutrons incidente I_0 é atenuada para diferentes graus, de modo que, a equação (2.3), pode ser reescrita como:

$$I = I_0 e^{-N\sigma_t(L-d)} \quad (2.8)$$

Deste modo, a inspeção de amostras por neutrongrafia é limitada quanto à capacidade dos nêutrons penetrarem a amostra, e de interagirem com os materiais da amostra, de forma a distinguí-los e, também, diferenciar regiões internas nela existentes.

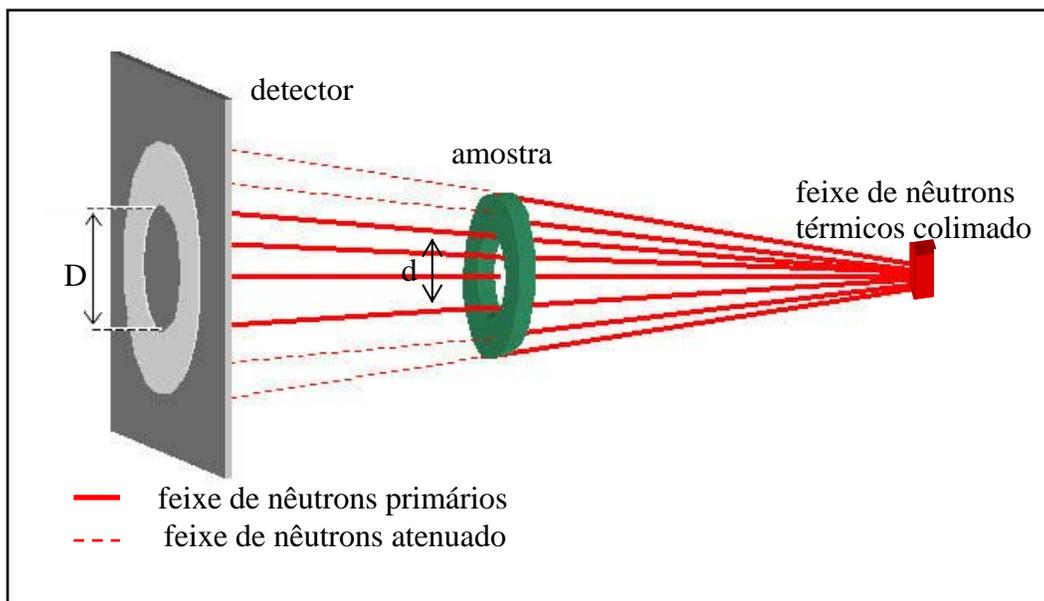


Figura II.3 – Princípio de detecção de um defeito.

II.3.3 – Sistema neutrongráfico

Um esquema experimental básico do sistema neutrongráfico em apreço consiste de um feixe de nêutrons térmicos, um colimador, uma amostra a ser inspecionada e um dispositivo capaz de registrar a informação sobre a transmissão do feixe neutrônico através da amostra.

II.3.3.1 - Fonte de nêutrons

O feixe neutrônico para o sistema neutrongráfico pode provir de fontes, tais como: um reator nuclear, um acelerador de partículas ou radioisotópicas (Am-Be, Po-Be, ^{252}Cf , entre outras). Os fatores determinantes para a escolha da fonte são: intensidade do feixe

neutrônico e a energia dos nêutrons produzidos; intensidade do feixe de radiação γ e sua distribuição energética; custo; tamanho; portabilidade e blindagem necessária.

As características dos reatores nucleares, dos aceleradores de partículas e das fontes radioisotópicas são apresentadas na Tabela II.3.

Tabela II.3 – Características das fontes de nêutrons [30].

<i>Tipo de fonte</i>	Fluxo (n/cm ² .s)	Resolução radiográfica	Tempo de exposição	<i>Operação</i>	<i>Custo</i>	<i>Portabilidade</i>
<i>Reatores nucleares</i>	10 ⁵ a 10 ⁸	Excelente	Curto	Complexa e estável	Médio e Alto	Não portátil
Aceleradores de partículas	10 ³ a 10 ⁶	Média	Médio	Liga-desliga	Médio	Portabilidade possível
Radioisótopos	10 a 10 ⁴	Baixa a média	Longo	Fácil	Baixo	Portátil

II.3.3.2 - Colimador

A colimação de um feixe representa um dos pontos mais importantes num sistema radiográfico, pois o colimador é um dos principais responsáveis pela intensidade de nêutrons térmicos e pela resolução geométrica de uma Neutronografia.

As paredes dos tubos colimadores devem ser revestidas com materiais que possuem elevada seção de choque para absorção de nêutrons, de modo a definir a forma do feixe e caracterizar sua divergência angular, ou *razão de colimação*, que é o parâmetro que melhor descreve as características do colimador. Além disso, radiação secundária produzida pela absorção do nêutron deve ter baixa probabilidade de ser detectada pelo sistema de imageamento. Os colimadores mais utilizados são: *multitubos*, *multiplacas* e *cônico divergente*. A figura II.4 esquematiza os tipos de colimadores empregados em Neutronografia, onde L representa o comprimento do colimador e D , o diâmetro de abertura do colimador na parte próxima ao núcleo.

Utilizando-se os colimadores multitubos ou multiplacas, figura II.4 (a), consegue-se feixes de nêutrons praticamente paralelos, pois são empregados conjuntos de tubos de pequeno diâmetro ou placas equidistantes. Nestes colimadores, a razão de colimação L/D ,

definida para um dos tubos individuais ou pela distância entre duas placas, pode ter valores elevados – o que é desejável, mas em geral, provocam uma perda considerável na intensidade do feixe e podem produzir uma figura com círculos ou linhas na imagem radiográfica.

O colimador cônico divergente é uma solução para estes inconvenientes. A partir da abertura de entrada D , o seu diâmetro interno diverge uniformemente ao longo de seu comprimento L .

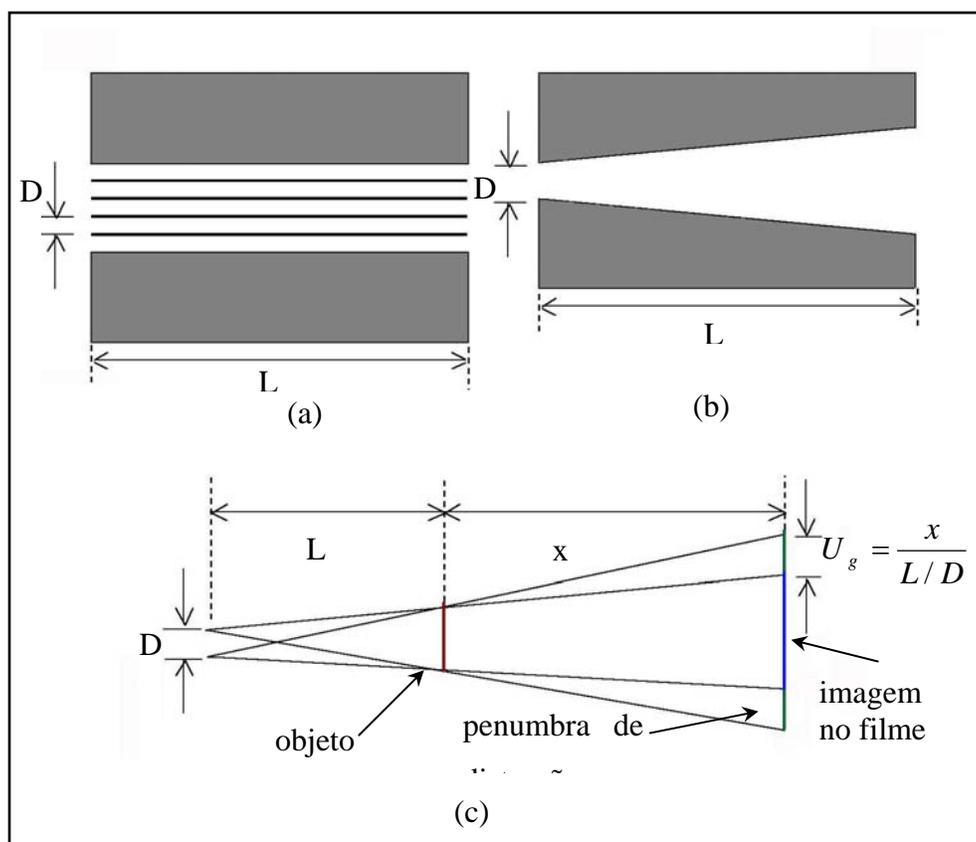


Figura II.4 – Esquema representativo de colimadores usados em Neutronografia: (a) colimador multitubos/multiplacas, (b) colimador cônico divergente e (c) resolução geométrica para um colimador cônico divergente [23].

A divergência angular do feixe de nêutrons provocará uma distorção (penumbra) na imagem registrada, a qual é comumente denominada *resolução geométrica*, U_g , dada por:

$$U_g = \frac{x}{L/D} \quad (2.9)$$

onde x é a distância do objeto ao sistema de imageamento

O fluxo ϕ de nêutrons na saída do tubo do colimador pode ser dado por:

$$\phi = \frac{1}{16} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \left(\phi_i + \frac{1}{\Sigma} \frac{\partial \phi}{\partial Z} \right) \quad (2.10)$$

onde:

ϕ_i é o fluxo de nêutrons na entrada do colimador [$n/cm^2.s$];

Σ é a seção de choque macroscópica do meio moderador [cm^{-1}];

$\partial \phi / \partial Z$ é o gradiente de fluxo na face interna do colimador.

Este gradiente normalmente é muito pequeno [33], e assim o fluxo de nêutrons na saída do colimador pode ser dado por:

$$\phi = \frac{1}{16} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \phi_i \quad (2.11)$$

o que significa uma perda significativa de nêutrons decorrente da colimação, pois a intensidade do feixe no plano de imagem decresce à medida que L cresce. Portanto, minimizar a razão L/D significa também minimizar o tempo de exposição. Entretanto a resolução geométrica U_g cresce linearmente com o decréscimo da razão L/D . Assim, para se obter radiografia de boa qualidade é essencial otimizar-se a razão de colimação L/D e posicionar-se o objeto o mais próximo possível do detector. Como a distância objeto-detector pode ser pré-fixada, aumentar a razão L/D permite obter-se radiografias de boa qualidade. Isto pode ser feito aumentando o comprimento do colimador L ou diminuindo a abertura de entrada D . Em ambos os casos, isso implicará em uma diminuição do fluxo de nêutrons na saída do colimador e num aumento no tempo de exposição.

II.3.3.3 - Dispositivo de registro de imagem neutronográfica

Como os nêutrons não sensibilizam um filme radiográfico, então há a necessidade de utilização de uma tela *conversora* de nêutrons, cuja finalidade é transformar os nêutrons incidentes em um tipo de radiação capaz de sensibilizar o filme radiográfico. As telas conversoras são feitas de materiais com elevada secção de choque para a absorção de nêutrons, tais como: o gadolínio, boro e o lítio. Na maioria das aplicações neutronográficas utiliza-se o *método direto* de exposição ao feixe de nêutrons. No método direto, a tela conversora é colocada em contato íntimo com o filme radiográfico num chassi radiográfico de alumínio posteriormente ao objeto, segundo a direção do feixe de nêutrons, conforme ilustra a figura II.5. Quando os nêutrons interagem com os núcleos do material conversor, ocorre a emissão de radiação secundária (tais como: alfa, beta, gama, etc). Uma vez que os nêutrons praticamente não produzem efeito direto sobre o filme radiográfico, muitas vezes, o filme radiográfico é posicionado na frente da tela conversora, em relação à direção do feixe neutrônico. Sendo assim o feixe atravessa a emulsão do filme praticamente sem sofrer atenuação, é absorvido pelo material conversor, que emite radiações secundárias e sensibiliza o filme radiográfico, formando uma imagem [8][33]. A figura II.5 mostra o princípio básico de uma Neutronografia convencional.

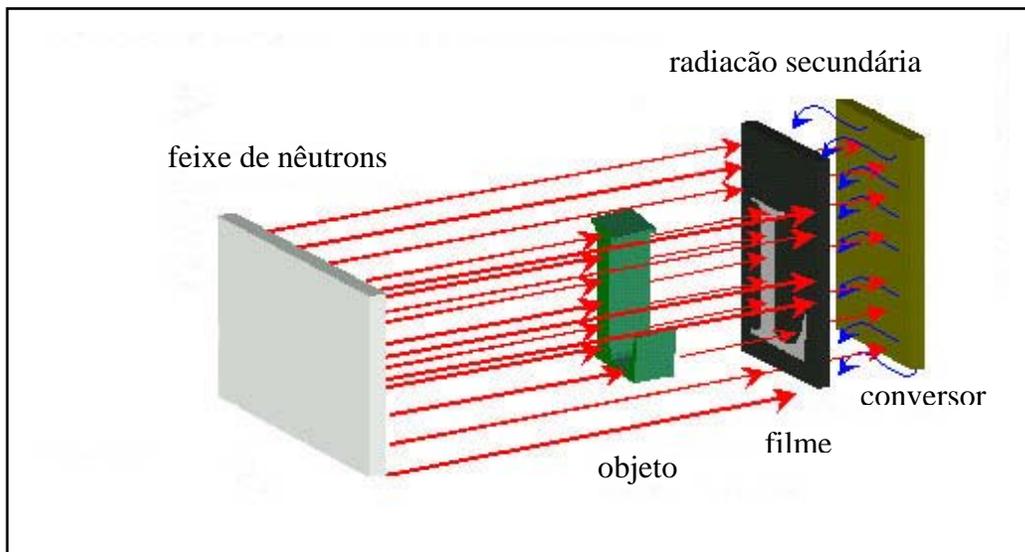


Figura II.5 – Esquema representativo de uma Neutronografia convencional pelo método direto de exposição ao feixe neutrônico.

O posicionamento do filme radiográfico com a tela conversora não fica restrito somente ao mostrado na figura II.5. A configuração esquematizada acima é utilizada quando a espessura da tela conversora é maior do que o alcance da radiação gerada na mesma. Como a grande maioria das reações nucleares acontecem nas proximidades da superfície de incidência, a disposição do filme radiográfico antes da tela conversora torna o processo de irradiação mais rápido.

Um outro tipo de tela conversora muito utilizada é a *cintiladora*, constituída de um material absorvedor de nêutrons, como por exemplo, gadolínio, lítio, boro e um material fluorescente, tal como sulfeto de zinco, tem como principal função, converter o feixe de nêutrons incidente em fótons de luz. Neste caso há uma redução de até 100 vezes no tempo de irradiação, quando comparado com o conversor utilizado no método convencional [33]. Empregando dispositivos que propiciam uma rápida captura de imagens juntamente a tela cintiladora, torna-se possível estudar ensaios dinâmicos por sistemas neutrongráficos. O ensaio é, então denominado Neutronografia em Tempo Real (NRTR), e neste caso, a luz emitida pela tela cintiladora é amplificada por um intensificador de luz e capturada por uma câmera de vídeo, que possibilita a sua visualização instantânea em um monitor. A figura II.6 ilustra, um sistema de Neutronografia em Tempo Real.

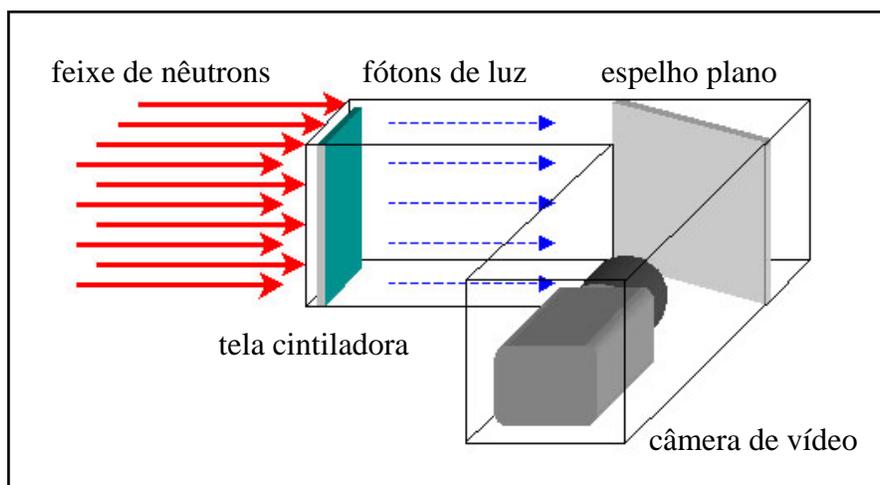


Figura II.6 – Esquema representativo de um sistema neutrongráfico em tempo real.

A tela cintiladora, a câmera de vídeo e o espelho plano ficam no interior de uma caixa a prova de luz externa. O feixe de luz emitido pela tela cintiladora é refletido pelo espelho plano e capturado pela câmera de vídeo posicionada perpendicularmente ao feixe

de nêutrons. Assim a câmara pode capturar os fótons de luz sem ser atingida pelos feixes de nêutrons e gamas que saem do canal.

As telas cintiladoras mais utilizadas são as constituídas dos elementos com elevada seção de choque citados anteriormente, na qual se destacam: $ZnS(Ag)$ com 6LiF , $ZnS(Cu)$ com LiF ou B e $Gd_2O_2S(Tb)$. Algumas características, tais como: elevada seção de choque para absorção de nêutrons, baixa probabilidade de interação para radiação γ , alta eficiência de conversão dos nêutrons em fótons de luz, alta transparência à luz emitida e alta resolução espacial, devem ser consideradas buscando tornar ideal uma tela cintiladora. Porém, nas telas cintiladoras disponíveis comercialmente, várias destas características são excludentes ou incompatíveis.

Numa Neutronografia, as telas cintiladoras são excitadas pela radiação secundária gerada pelos nêutrons incidentes. As telas cintiladoras ${}^6LiF+ZnS$ são excitadas pela radiação ionizante gerada pela reação, emitindo fótons de luz (aproximadamente $1,7 \times 10^5$ fótons por nêutrons detectados). Na tela de dioxissulfeto de gadolínio (Gd_2O_2S), esta radiação é principalmente um elétron de conversão com energia mais provável de $70 keV$. A Tabela II.4 apresenta um resumo das características dos materiais conversores mais utilizados em telas cintiladoras.

Tabela II.4 – Características de materiais conversores utilizados em telas cintiladoras [8].

Material	Composição da tela	Reação nuclear predominante	Tipo e energia da radiação ionizante
6_3Li	${}^6LiF+ZnS$	(n, α)	$\alpha(2,05 MeV)$ T(2,74 MeV)
${}^{10}_5B$	${}^{10}B_4C$	(n, α)	$\alpha(1,47 MeV)$ Li(0,84 MeV)
${}^{Nat}_{64}Gd$	Gd_2O_2S	(n, γ)	EC (70 keV) principal

Uma tela cintiladora consiste numa *base* feita de plástico ou outro material que mantenha a rigidez e evite a sua deformação, procurando evitar a fragmentação do fósforo. Entre o fósforo e a base há uma fina *camada auxiliar*, que dependendo da aplicação da tela, pode conter pigmentação branca de reflexão irregular visando aumentar a saída de luz, ou ela pode conter um absorvedor para reduzir o espalhamento de luz aumentando a resolução espacial do sistema [9]. Já as *partículas do fósforo* possuem tamanho típicos de $10\ \mu\text{m}$ e são solidificadas em um agente de coesão transparente, com espessura que varia entre $70\ \mu\text{m}$ e $280\ \mu\text{m}$. A última camada é uma *camada protetora de cobertura*, com espessura tipicamente $15\ \mu\text{m}$ que deve proteger a tela e manter o espalhamento da luz gerada o menor possível. A figura II.7 mostra uma representação esquematizando a estrutura típica de uma tela cintiladora.

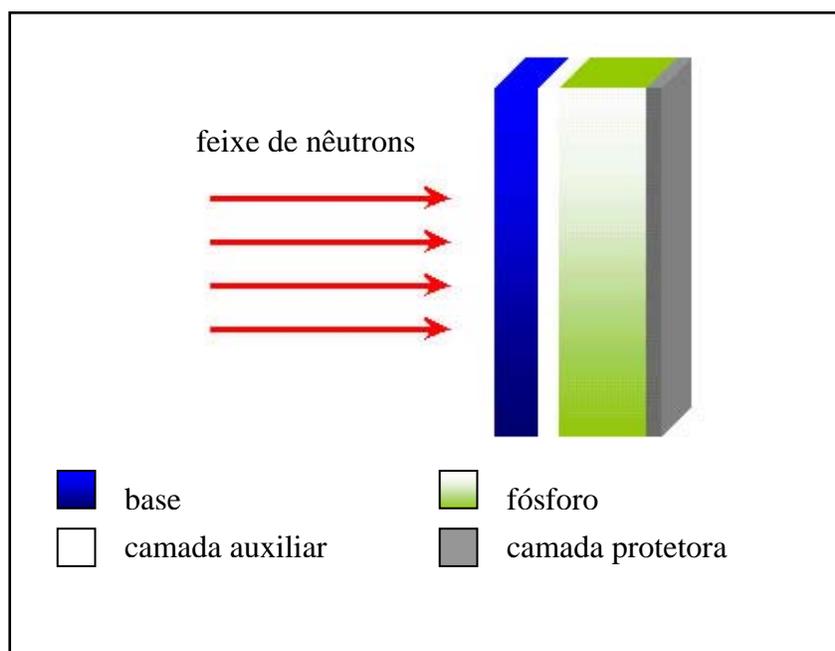


Figura II.7 – Estrutura típica de uma tela cintiladora.

Através da figura II.8 tem-se uma compreensão da cadeia de eventos que ocorre em uma tela cintiladora, que pode ser descrito na seqüência abaixo:

- a) O cintilador tem “armadilha” preenchida próximas ao topo da banda proibida; os elétrons de conversão interagem na banda de valência do fósforo e perdem

grande parte da sua energia ionizando o átomo absorvedor, principalmente nas camadas eletrônicas *K* e *L*.

- b) Os elétrons ejetados se movem pela rede cristalina, perdendo energia por colisões inelásticas com elétrons de valência, promovendo-os à banda de condução e deixando lacunas (vacâncias) na banda de valência.
- c) Os elétrons que estão nas armadilhas (banda proibida) migram para as lacunas na banda de valência, emitindo fótons de luz em tempos típicos de $\sim 10^{-8}$ a 10^{-9} s.
- d) Os elétrons da banda de condução, então, migram para as lacunas na banda proibida [9].

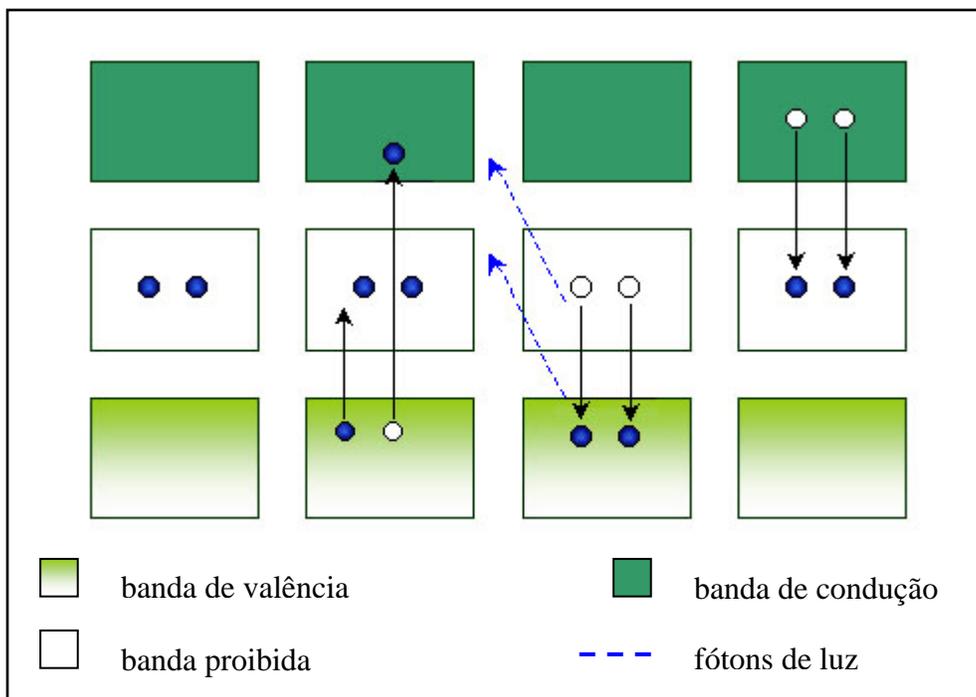


Figura II.8 – Cadeia de eventos em uma tela cintiladora fluorescente.

Além dos componentes citados na figura II.6, um microcomputador com uma placa de captura de imagem e programas apropriados compõem o sistema neutronográfico em tempo real. A utilização do microcomputador permite a o emprego de técnicas de processamento de imagens digitais, visando melhorar a qualidade da imagem.

II.4 - Regimes de escoamentos bifásicos em dutos metálicos

A visualização dos padrões de escoamento e medida de frações de vazio em tubulações é muito importantes para o estudo do escoamento multifásico. Na literatura, são divulgadas diferentes configurações geométricas formadas por escoamentos bifásicos no interior de tubulações. Estes escoamentos estão presentes em inúmeros problemas de engenharia. Algumas aplicações importantes são:

- Sistemas de geração de potência: reatores nucleares, usinas convencionais de geração de potência, usina de energia geotérmica, máquina de combustão interna, propulsores bifásicos e outros;
- Sistemas de transferência de calor: trocadores de calor, evaporadores, secadores, refrigeradores e outros;
- Sistemas de lubrificação, controle ambiental e outros.

Diferenças nos padrões de escoamento bifásicos podem ser encontradas, dependendo da posição do tubo, se vertical ou horizontal. Uma das principais diferenças entre esses dois casos é a freqüente tendência à estratificação que ocorre nos escoamentos horizontais, em função da influência da força gravitacional. O vapor tende a migrar para a parte superior do tubo, enquanto que a maior parcela de líquido escoar na parte inferior [10]. A seguir, estão descritas as configurações mais conhecidas para sistemas bifásicos líquido-gás para tubulações verticais.

II.4.1 – Regimes de escoamento em tubulações verticais

II.4.1.1 - Escoamento de bolhas (Bubbly Flow)

Nesta configuração, a fase gasosa se encontra distribuída em bolhas discretas, ao longo da fase contínua líquida, que pode ter pequenos diâmetros com forma esférica e diâmetros maiores com forma mais alongadas, conforme se observa na figura II.9 (a).

II.4.1.2 - Escoamento de golfada (Slug Flow)

Nesta configuração, o diâmetro das bolhas são da ordem do diâmetro do tubo, sendo que a parte superior da bolha possui forma esférica e o gás é separado da parede do tubo por um fino filme de líquido que desce, de forma lenta. Duas bolhas sucessivas são separadas por partes líquidas (slug) que podem conter bolhas de menor diâmetro em forma dispersa, conforme mostra a figura II.9 (b).

II.4.1.3 - Escoamento agitado (Churn Flow)

Ocorre quando o escoamento de golfada se estabiliza e as grandes bolhas se quebram dando lugar a um escoamento caótico no centro do tubo, deslocando o líquido contra as paredes. Esse regime possui uma característica oscilatória entre escoamentos de golfada e anular; por isso, é comumente chamado *slug-annular flow*, podendo ser representado pela figura II.9 (c).

II.4.1.4 - Escoamento anular com bolhas (Wispy-Annular Flow)

Neste regime, o líquido se concentra numa camada relativamente grossa sobre as paredes com um núcleo de gás contendo uma quantidade considerável de líquido disperso em forma de gotas. Na região líquida sobre as paredes, existem ainda bolhas de gás dispersas, ou seja, é uma mistura de um escoamento disperso de gotas no centro e um escoamento disperso de bolhas nas paredes, como se pode ver na figura II.9 (d)

II.4.1.5 - Escoamento anular (Annular Flow)

No escoamento anular, o líquido escoia pelas paredes formando um anel fino e o gás escoia pelo centro do tubo, sendo que ambas as fases com escassa ou nenhuma presença de gotas ou bolhas dispersas. Em alguns casos, o anel de líquido pode-se estabilizar dando lugar à penetração de gotas de líquido no núcleo gasoso, porém, é diferente do regime anterior, porque as gotas se encontram em grupos separados, ao invés de estarem presentes de forma contínua no núcleo do gás [10], conforme se nota, ao se comparar as figuras II.9 (d) e (e).

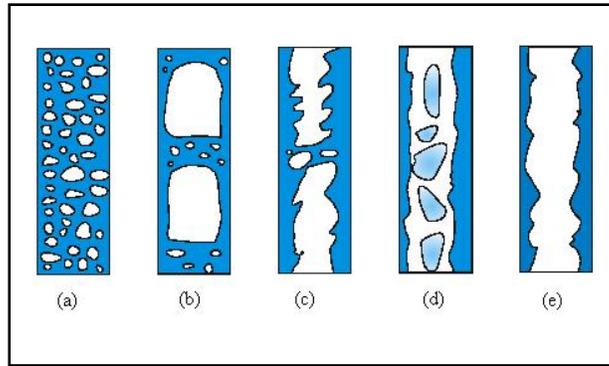


Figura II.9 - Regimes de escoamentos: (a) bolhas; (b) slug; (c) agitado; (d) anular com bolhas e (e) anular

II.4.2 – Parâmetros básicos

Nos escoamentos bifásicos, a velocidade e a fração de vazio local variam através da dimensão do canal, ortogonalmente a direção do fluxo [10]. A fração de vazio, ou fração de gás (α), é definida como a razão entre a área da seção transversal do escoamento ocupada pelo gás e a área da seção transversal total, que é dada por:

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (2.12)$$

na qual,

$$A = A_g + A_L \quad (2.13)$$

onde:

A_g é a área da seção transversal ocupada pelo gás e A_L , a área de seção transversal ocupada pelo líquido.

Da equação (2.13) temos que $A_L = A - A_g$, então:

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A} = \frac{A - A_g}{A} \quad (2.14)$$

Pela equação (2.12), então,

$$\alpha_L = 1 - \alpha = \frac{A_L}{A} \quad (2.15)$$

O valor médio da fração de vazio medida, F , pode ser definido como se segue:

$$\bar{F} = \frac{\langle \alpha F \rangle}{\langle \alpha \rangle} \quad (2.16)$$

Considerando agora a velocidade do gás, v_g , que pode variar através do canal, tem-se que a expressão para a medida da velocidade média do gás pode ser expressa, similarmente, como:

$$\bar{v}_g = \frac{\langle \alpha v_g \rangle}{\alpha} \quad (2.17)$$

A velocidade de arraste do gás é dada por

$$v_{gi} = v_g - j \quad (2.18)$$

onde, j é o escoamento bifásico total:

$$j = j_l + j_g \quad (2.19)$$

na qual j_l e j_g são as velocidades de deslocamento do gás e escoamento do líquido (m/s), respectivamente, dadas por:

$$j_l = (1 - \alpha)v_l \quad (2.20)$$

e

$$j_g = \alpha v_g \quad (2.21)$$

Substituindo as equações (2.18) e (2.21) em (2.17), tem-se que:

$$\bar{v}_g = \frac{\langle \alpha(v_{gi} + j) \rangle}{\langle \alpha \rangle} = \frac{\langle \alpha j \rangle}{\langle \alpha \rangle} + \frac{\langle \alpha v_{gi} \rangle}{\langle \alpha \rangle} \quad (2.22)$$

então:

$$\bar{v}_g = \frac{\langle j_g \rangle}{\langle \alpha \rangle} = C_0 \langle j \rangle + \bar{v}_{gi} \quad (2.23)$$

onde, C_0 é a distribuição de parâmetro definida por:

$$C_0 = \frac{\langle \alpha j \rangle}{\langle \alpha \rangle \langle j \rangle} \quad (2.24)$$

Conseqüentemente, a constante C_0 depende da forma dos perfis da velocidade e concentração (escoamento-padrão). Para um dado padrão, o estudo extensivo de Zuber e Wallis sugerem que C_0 depende da pressão, geometria do canal e talvez da taxa (razão) de escoamento.

A fração de vazio $\langle \alpha \rangle$ em uma determinada posição do tubo pode ser obtida rearranjando a equação (2.23), ou seja:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\langle j_g \rangle}{C_0 \langle j \rangle + v_{gi}} \quad (2.25)$$

A equação (2.25) mostra que $\langle \alpha \rangle$ pode ser obtida se C_0 , e v_{gi} , forem conhecidos, para um dado escoamento, isto é, *slug*, *bubbly*, *churn-turbulent*.

As expressões sugeridas para C_0 e v_{gi} e outras correlações padrões de escoamento dependente da fração de vazio são apresentadas na Tabela II.5 baseadas nos trabalhos dos autores citados.

Tabela II.5 – Valores sugeridos para a velocidade de arraste referente a cada regime [34].

Regime de Escoamento	C_0	v_{gi}	Referências
Bolhas	$1,2 - 0,2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}}$	$1,44 \sqrt{\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2}}$	Ishii, Zuber [34] e Wallis [38]
Golfadas	1,2	$0,35 \sqrt{\frac{g d \Delta \rho}{\rho_l}}$	Ishii [39] e Collier [40]

Na tabela II.5, tem-se que:

V_{gi} é a velocidade do gás [m/s];

$\Delta \rho$ é a diferença entre as densidades das duas fases [Kg/m³];

d é o diâmetro interno do tubo [m];

g é a aceleração da gravidade [9,81 m/s²];

ρ_L é a densidade do líquido.

II.4.3 – Mapa de escoamento

O escoamento bifásico em tubulações pode ser classificado em diferentes padrões de escoamento de acordo com as configurações e condições de operação do sistema, tais como: a razão entre as fases, a vazão volumétrica total, a velocidade de cada uma das fases e o diâmetro e o comprimento da tubulação. A figura II.10 mostra o mapa de classificação de regimes de escoamento proposto por Taitel e Dukler [36][37], que divide o escoamento bifásico em 5 regiões distintas: 1 – bolhas (*bubble*), 2 – bolhas dispersas (*dispersed bubble*), 3 – golfadas (*slug*), 4 – golfadas ou agitado (*slug or churn*) e 5 – anular (*anular*).

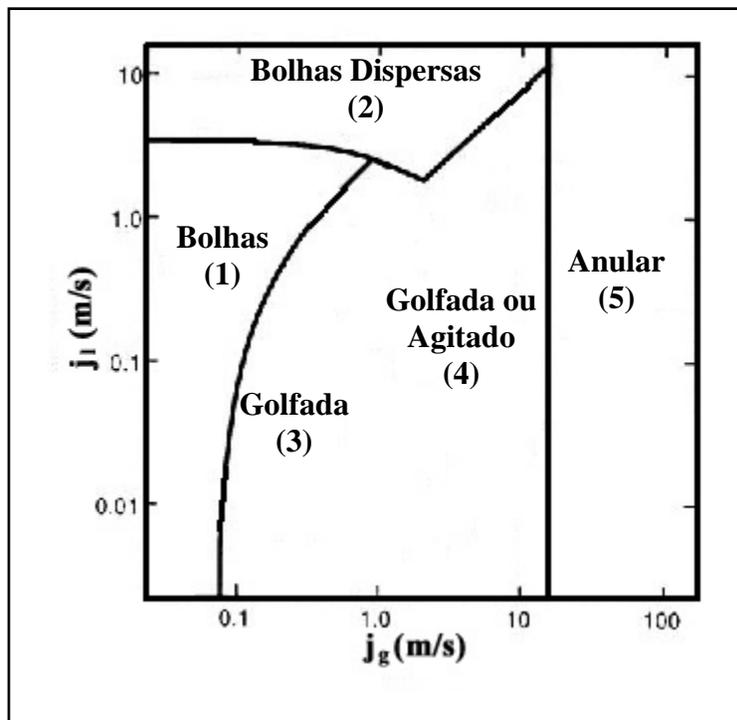


Figura II.10 – Mapa de regimes de escoamentos líquido-gás verticais (Taitel & Dukler)[36][37].

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Para o estudo da visualização dos tipos de escoamento no interior de tubulações metálicas, utilizou-se um feixe de nêutrons oriundo do canal de irradiação J-9 do Reator Argonauta/IEN/CNEN, um sistema de aquisição de imagens em tempo real e aparatos constituídos de tubulações metálicas de pequenos diâmetros, pelas quais o escoamento bifásico ar-água ocorre.

III.1 – Reator Argonauta

O *Reator Argonauta* foi o primeiro reator de pesquisa construído no país por uma empresa nacional. Ele foi projetado pelo *Argone National Laboratory* e construído, em 1964, pela CBV Ltda, através de contrato com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). O projeto original sofreu algumas modificações, a fim de possibilitar o uso dos componentes existentes no mercado nacional. Implantado no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) teve sua primeira criticalidade em 20 de fevereiro de 1965 e, desde então, vem sendo utilizado em pesquisas com nêutrons de cunho didático-científico e para treinamento de pessoal especializado em tecnologia nuclear.

O núcleo do reator é formado por dois cilindros concêntricos de alumínio de 1178 mm de altura e 610 mm e 915 mm de diâmetros (figura III.1 (a)), formando uma coroa cilíndrica. O cilindro menor denominado *tanque interno* é preenchido com grafita e é denominada *coluna térmica interna*; nela existem cinco orifícios de acessos para medidas experimentais, sendo um orifício central circular e outros quatro, retangulares, denominados *gavetas*. Entre os dois cilindros está localizada a *região de combustível*, onde ficam as placas de elemento combustível.

Cada placa de elemento combustível contém uma mistura de alumínio com óxido de urânio (U_3O_8), ambos em pó, sendo o urânio enriquecido a 19,91 % em ^{235}U . Após um

tratamento específico, a mistura é colocada em uma moldura de alumínio com 12 mm de espessura.

O *refletor* é composto de blocos de grafita nuclearmente pura. O *refletor interno*, que se encontra na região de combustível, é formado por cunhas de grafita, geometricamente distribuídas entre os conjuntos de elementos combustíveis. O *refletor externo* é todo montado com blocos de grafita que envolve a região do combustível.

Como material *moderador*, utiliza-se água deionizada entre as placas. O elemento combustível é formado por 17 placas que são fixadas por dois pinos de alumínio, como ilustra a figura III.1 (b). Atualmente, o arranjo de combustível nuclear comporta um total de 8 elementos distribuídos simetricamente, conforme se observa na figura III.2.

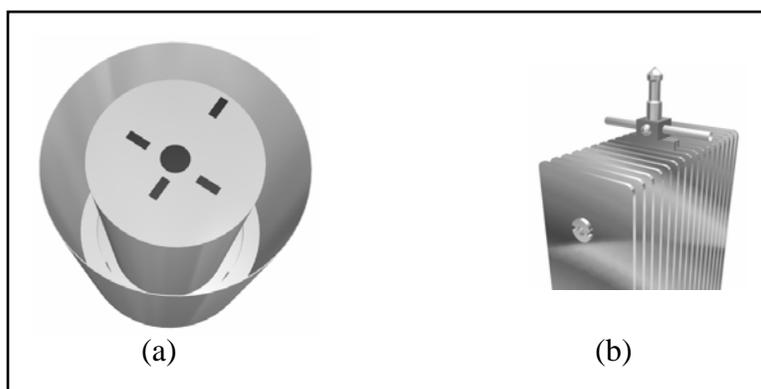


Figura III.1 – Visão do núcleo do reator Argonauta/IEN/CNENE e seus respectivos elementos combustíveis. (a) núcleo do reator constituído de dois cilindros concêntricos, (b) elemento combustível.

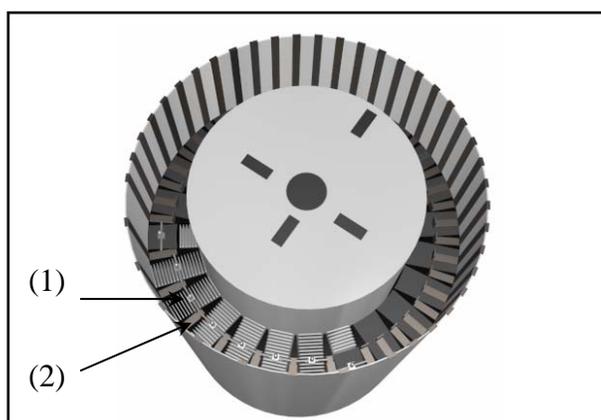


Figura III.2 – Vista superior do núcleo do reator Argonauta/IEN/CNEN mostrando a disposição geométrica das placas de elemento combustível. (1) elemento combustível (2) cunha de grafita.

A coluna térmica externa está situada na parte frontal do reator Argonauta/IEN/CNEN, sendo formada por treze blocos de grafita removíveis para a realização de experimentos. O canal de irradiação principal, denominado J-9, possui a maior intensidade de fluxo de nêutrons, pois alcança o tanque de alumínio externo, na mesma altura dos elementos combustíveis. A profundidade dos outros canais atinge somente o refletor externo. No canal de irradiação J-9, podem ser inseridos diferentes arranjos de colimadores. Um deles tem a configuração divergente, em forma de um tronco de pirâmide construído de placas de grafita, com uma moldura de alumínio, tendo em sua borda, uma faixa de cádmio que reveste o colimador internamente. O colimador divergente tem 60 *cm* de comprimento, divergência angular muito pequena e área seccional quadrada, na entrada, de 16 *cm*² e, na saída, 49 *cm*². Essa configuração assegura uma boa resolução neutrongráfica, permitindo o alinhamento do feixe de nêutrons térmicos, quando o colimador divergente está acoplado ao bloco moderador de grafita. Outro colimador disponível é o de geometria cilíndrica, denominado paralelo, que é moldado com grafita e encamisado com alumínio. Encaixada na saída do canal de irradiação J-9, encontra-se instalada uma gaveta, que visa melhorar o alinhamento do feixe neutrônico no plano de imagem. A figura III.3 mostra a coluna térmica externa situada na parte frontal do reator Argonauta e o arranjo neutrongráfico montado no canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta/IEN/CNEN, com os elementos acima descritos.

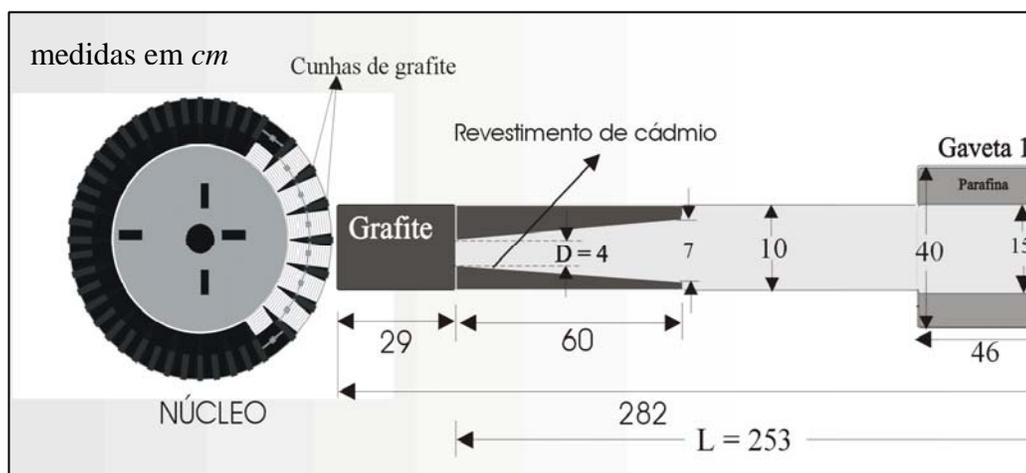


Figura III.3 - Arranjo de colimação do feixe neutrônico, no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta/IEN/CNEN.

O reator Argonauta operando numa potência nominal de 340 W, fornece um fluxo de nêutrons térmicos de $4,46 \times 10^5 \text{ n/cm}^2.s$, na borda do canal de irradiação, J-9, resultando uma razão de colimação, L/D, de 70; uma razão n/γ de $3 \times 10^6 \text{ n/cm}^2.mR$; e energia mais provável dos nêutrons de 30 meV [11].

Para proteção pessoal, em relação aos efeitos biológicos produzidos pelos nêutrons e raios- γ , a implantação de blindagens biológicas torna-se necessária. Os nêutrons térmicos produzidos podem ser absorvidos por camadas finas de *boro* ou *cádmio*, este último apresenta a desvantagem da emissão de raios- γ de altas energias, por reações nucleares do tipo (n, γ) , exigindo uma blindagem adicional para os raios- γ . Uma blindagem efetiva consiste na combinação de compostos hidrogenados, com materiais absorvedores de nêutrons térmicos, e de elementos com alto número atômico, Z, para absorção dos raios- γ [24]. O reator Argonauta foi projetado e construído, dispondo de blindagens biológicas, distribuídas da seguinte forma:

- Lateral: blocos de concreto empilhados em torno do refletor.
- Topo: barreira padrão (tampão), para blindar a radiação provinda da coluna térmica interna, com forma de escalonado circular, construída em aço e preenchida com concreto e barita.
- Lado oposto da coluna térmica externa: água (tanque de contenção).

A população de nêutrons é controlada por seis *barras de controle*, constituídas por lâminas de cádmio que se deslocam verticalmente, por ação gravitacional, dentro de canais existentes no refletor externo de grafita. Elas se deslocam paralelamente à geratriz do cilindro externo, em canais existentes no refletor e estão distribuídas em torno do núcleo. Três dessas barras funcionam como unidades de segurança e são retiradas no início da operação do reator, tendo as outras três a finalidade de controlar o reator.

De acordo com as Normas de Proteção Radiológica, durante o período de operação, o acesso ao salão do reator Argonauta é restrito e sinalizações luminosas (no interior e fora do salão) indicam quando o reator está ligado. Há o monitoramento visual da área por circuito interno de TV e monitoramento radiológico realizado pela equipe do Serviço de Proteção Radiológica do IEN/CNEN.

III.2 – Sistema Eletrônico de Imageamento Neutronográfico em Tempo Real

Como já visto na seção II.3.3, um Sistema Eletrônico de Imageamento (SEI) em Tempo Real é composto basicamente de uma tela cintiladora, uma câmera de vídeo e um espelho plano, todos no interior de uma caixa preta, vedada à luz ambiente, além de um monitor de TV, para a visualização da imagem, ou microcomputador com programas apropriados para o registro e processamento digital das imagens.

Neste trabalho, para se obter as imagens neutronográficas, o SEI em Tempo Real, que se encontra em operação no reator Argonauta (IEN/CNEN), foi utilizado, que é constituído dos seguintes componentes:

Tela Cintiladora (NE – 425), cuja composição típica é ${}^6\text{LiF} + \text{ZnS}$, que converte os nêutrons incidentes em fótons de luz, pela reação predominante ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$, emitindo $1,7 \times 10^5$ fótons de luz por nêutron detectado.

Câmera CCD: câmera de vídeo *Panasonic* série WV-CL 920, que possui CCD de 1/2" (diagonal principal) com resolução de 580 linhas, podendo operar com iluminação mínima de 0,02 LUX, para uma abertura de lente, f , de 1,4. No acoplamento óptico, foi utilizada uma lente f 1.0 MACRO fabricada pela *Canon*, que permite o ajuste manual do foco. O sinal de saída é do tipo *Composite* (NTSC).

Espelho Plano: Um espelho plano fica posicionado a 45° , com determinado índice de refração que permiti a reflexão dos fótons de luz na direção da câmera CCD com o mínimo de refração de luz. O uso do espelho é indispensável, pois ele permite que a câmera capture os fótons de luz sem ser atingida pelos feixes de nêutrons e de raios- γ emergentes do canal de irradiação J-9.

Os componentes do SEI em Tempo Real encontram-se no interior de uma caixa à prova de luz, sendo que, na região onde a câmera CCD está posicionada, há uma blindagem adicional, composta de parafina borada, cádmio e chumbo. O diagrama esquemático do SEI em Tempo Real e a fotografia da caixa à prova de luz são mostrados na Figura III.4, onde se pode distinguir os componentes citados.

As imagens foram digitalizadas utilizando uma placa externa de captura PCTV USB 2.0 da *Pinnacle*, com resolução de 720 x 480 pixels, que grava em compressões de 6,0

kbits/s, no formato *MPEG-2*, conectada a um microcomputador *AMD Sempron 2800*, através do programa computacional *Vision Version 1.00*, fornecido pela *Pinnacle*, que captura as imagens.

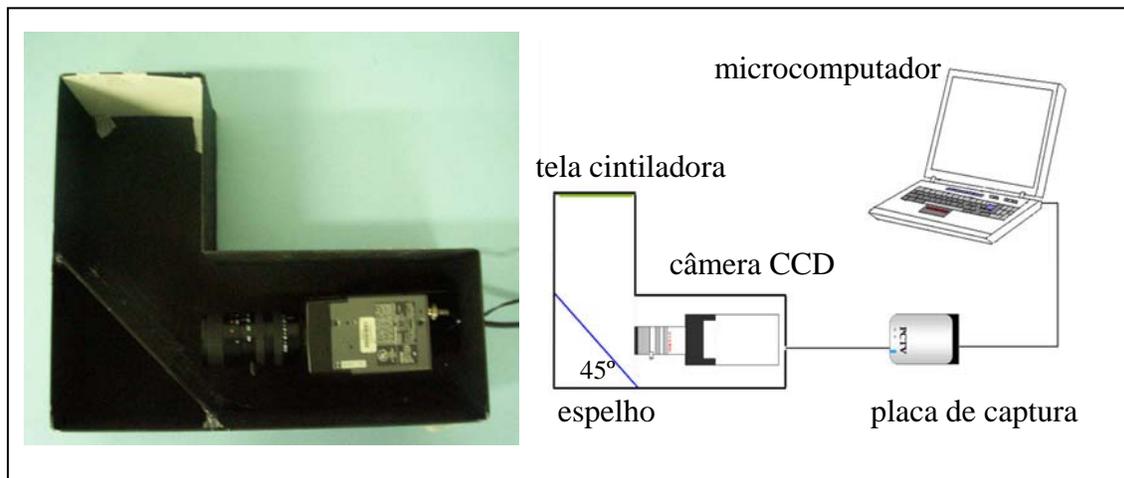


Figura III.4 – Componentes do Sistema Eletrônico de Imagens Neutrográficas em Tempo Real.

Após as imagens terem sido capturadas, foram convertidas para o formato *AVI*, de forma a serem processadas computacionalmente. A conversão é necessária, porque o programa de processamento de imagens, *Image Pro Plus v.4.0*, não é compatível com o formato *AVI*.

III.3 – Ensaio neutrográficos em tempo real

III.3.1 – Ensaio preliminares

Primeiramente, construiu-se dois aparatos, cada um fixado num suporte rígido posicionado em frente ao canal J-9, garantindo a proteção radiológica do operador ao variar a vazão de ar ou de água à distância, ou seja, longe da área de irradiação.

No primeiro aparato, na parte inferior de um tubo de alumínio, com 6,0 *mm* de diâmetro interno e 1,5 *mm* de espessura, foi conectada uma câmara misturadora, por onde

era inserido o ar provindo de um compressor de ar, cuja vazão era controlada por um medidor de vazão de ar. Na parte superior, havia um separador, que permitiu ao ar fluir para a atmosfera.

No segundo aparato, um tubo de alumínio, com 9,0 *mm* de diâmetro interno e 1,5 *mm* de espessura, foi utilizado. O tubo, o misturador e o separador foram enchidos com água.

Esses testes foram feitos com intuito de se ajustar às condições operacionais do Sistema Eletrônico de Imageamento, para este tipo de experimento, ao se variar os diâmetros dos tubos. Nesses testes, o tubo do aparato não pode ser encostado na borda do canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta/IEN/CNEN pela existência de uma parede que faz parte do projeto original do reator, ficando o tubo afastado 32 *cm*.

III.3.2 – Ensaios realizados com o aparato V.1

Para os ensaios neutrongráficos realizados destinados à visualização em tempo real do escoamento bifásico ar-água no tubo metálico onde ele ocorre, utilizou-se um aparato constituído de uma câmara de mistura de seção quadrada de ar-água feita de acrílico transparente, com 20,9 *cm* de largura e 26 *cm* de altura, por onde a água circulava, pela ação de uma bomba d'água instalada na parte lateral. O ar foi injetado por um compressor de ar, fixado na parte interna inferior da caixa. Na parte superior, foi acoplado um tubo de alumínio, com 6,0 *mm* de diâmetro interno, 1,0 *mm* de espessura e 120 *cm* de comprimento, por onde a mistura ar-água fluía para cima e descarregava o ar na atmosfera, através de um separador também construído de acrílico transparente, com 36,5 *cm* de largura e 57,4 *cm* de altura. Na parte inferior do separador, conectou-se um tubo de alumínio; na lateral, uma bomba fazia a sucção da água por uma mangueira e sua parte superior ficava aberta. Os escoamentos eram controlados por medidores de vazão de água e ar (R1 e R2). A figura III.5 mostra o esquema do aparato V1.

III.3.3 – Ensaios realizados com o aparato V.2

Devido aos problemas apresentados na câmara de mistura do aparato descrito anteriormente, tais como: a ruptura das paredes, a instabilidade no tipo de escoamento

desejado e, principalmente, a distância do tubo de teste até a borda do canal J-9, houve a necessidade de se ajustar o aparato ao projeto do reator, de modo que, o tubo de teste ficasse rente à parede desse canal. Assim, o tubo de teste foi deslocado para a borda do canal e desviado da parte superior por meio de conexões. Para os problemas que haviam surgido no misturador, um injetor foi utilizado para fornecer a mistura bifásica ar-água. Com este aparato, obtiveram-se, para diferentes medidas de vazão, as correspondentes imagens neutrongráficas em tempo real. A figura III.6(a) mostra o esquema desse aparato com cada componente citado.

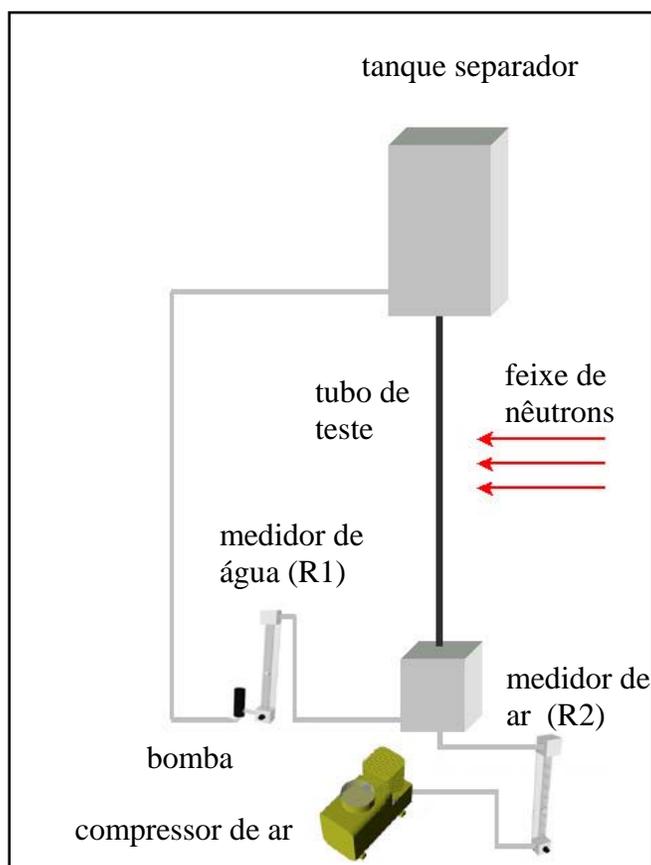


Figura III.5 – Diagrama esquemático do aparato V.1.

III.3.4 – Ensaios realizados com o aparato V.3

O aparato V.3 foi construído de forma a se simular a interferência gerada no escoamento de água, quando se fixam incrustações em determinados pontos da tubulação. Para simular as incrustações, utilizou-se cinco esferas de aço, com 7,9 mm de diâmetro,

revestidas com uma fina cobertura de cádmio, e uma esfera de $6,35\text{ mm}$, sem revestimento. As esferas foram fixadas nas paredes de um tubo de alumínio com $16,7\text{ mm}$ de diâmetro interno e $1,4\text{ mm}$ de espessura, por meio de dois ímãs. O injetor e o suporte foram aqueles utilizados no aparato V.2, tendo sido trocado somente o diâmetro da tubulação de alumínio. A figura III.7(a) mostra a seção de teste do aparato V.3.

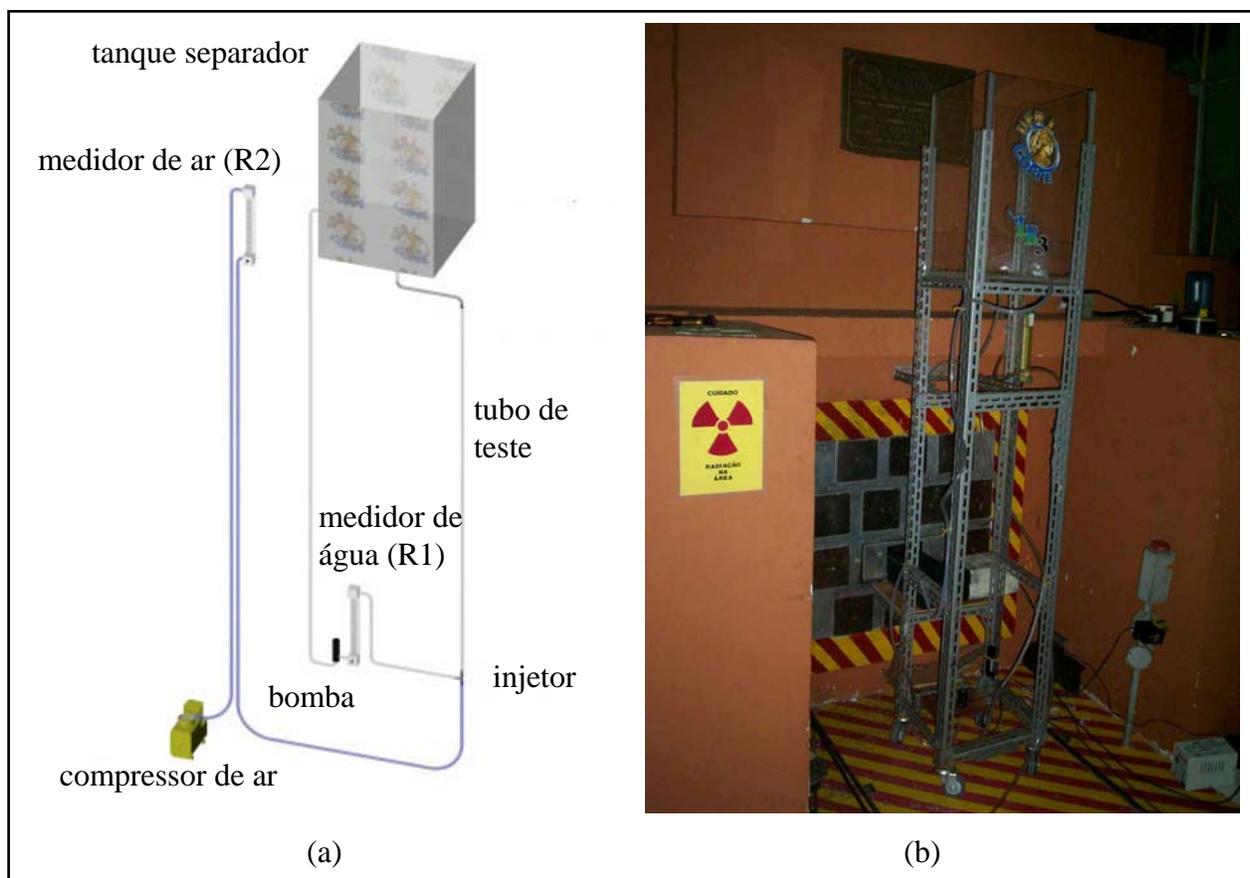


Figura III.6 – (a) Diagrama esquemático do aparato V.2, montado junto ao canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta/IEN/CNEN, para fins de visualização de um escoamento bifásico ar-água. (b) foto do aparato V.2 junto ao canal de irradiação J-9.

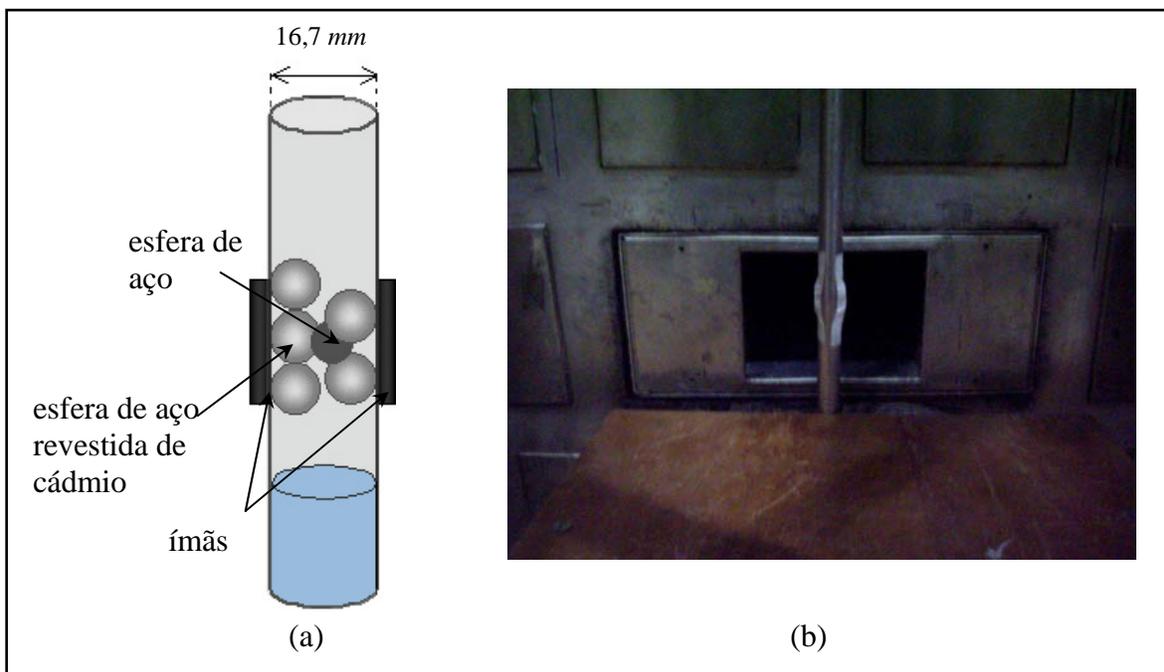


Figura III.7 – (a) Diagrama esquemático do aparato V.3. (b) foto do aparato V.3 junto à borda do canal de irradiação J.9.

III.4 – Procedimento Experimental

É de grande relevância a proteção radiológica individual, durante a irradiação. Sendo assim, as medidas foram realizadas, primeiramente, com o reator Argonauta desligado e visualizada por meio óptico. Para tal, foi introduzido um tubo de mesmo diâmetro interno de material transparente para que os tipos de escoamentos fossem visualizados, ao se variar as vazões de ar e água. Para o tipo de escoamento desejado, as vazões eram tomadas e fixadas, ou seja, pré-conhecidas.

O aparato para a visualização do escoamento bifásico ar-água foi posicionado junto ao SEI, no canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta/IEN/CNEN, para se obter a NRTR com as vazões pré-estabelecidas, para o tipo de escoamento desejado. A bomba de água e o compressor de ar foram ligados para que a mistura ar-água iniciasse e escoasse pelo tubo teste.

Numa bancada, que se encontra em uma área afastada da saída do feixe, encontra-se disponibilizado um microcomputador para o armazenamento/processamento das imagens

neutronográficas em tempo real obtidas. As imagens são capturadas na condição de criticalidade do reator Argonauta/IEN/CNEN. Na figura III.8, o diagrama esquemático do sistema neutronográfico em tempo real implantado nesse canal de irradiação é mostrado.

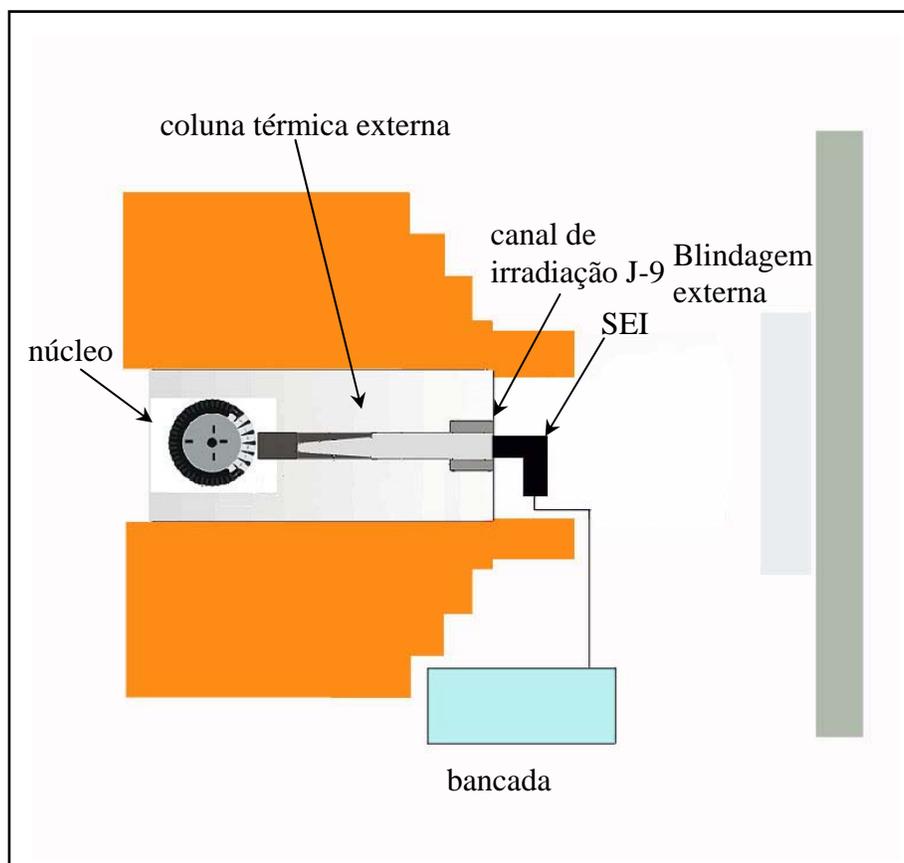


Figura III.8 – Diagrama esquemático do sistema neutronográfico em tempo real instalado no canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta/IEN/CNEN.

III.5 – Processamento digital de imagens

O processamento digital de imagens é de grande necessidade para uma Neutronografia em Tempo Real. A imagem original apresenta ruídos referentes à interação dos nêutrons e da radiação γ com a câmera CCD, que comprometem sua qualidade, dificultando sua

visualização e posterior análise. O processamento de imagem trata matematicamente as informações contidas nos limites da imagem, de modo que possa ser melhor interpretada.

No presente trabalho, após a escolha do quadro da imagem em tempo real a ser processada, ela é convertida em níveis de cinzas; em seguida, utiliza-se uma seqüência de filtros adequados à melhor visualização dos eventos retratados pelas imagens adquiridas. Inicialmente, as imagens neutronográficas obtidas em tempo real foram submetidas a um ajuste de brilho e de contraste. Após esse ajuste, foram utilizados os seguintes filtros:

- *Low-Pass* e *Median*, estes filtros de realce substituem o *pixel* central com o valor médio em sua vizinhança.
- *Watershed* e *Close* que suavizam os contornos completando-os e removendo pequenas manchas.

O processamento digital de uma imagem nem sempre é utilizado em outra. A seqüência de filtro citada acima foi usada para processar outras imagens do mesmo aparato V.2, porém, com diferentes valores para intensidade, passagens, etc. Para o processamento das imagens obtidas com o aparato V.3, não houve a necessidade da utilização do filtro *Watershed*.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Visto que a visualização dos escoamentos bifásicos em tubulações metálicas é de grande importância em diversas áreas de pesquisa, a técnica de Neutronografia em Tempo Real possibilitou a observação desses escoamentos, principalmente, o escoamento *slug*, que está presente em muitas aplicações de engenharia, tais como o transporte de hidrocarbonetos em tubulações e o escoamento de líquido-vapor, em usinas de geração de energia. Neste capítulo, são apresentadas as imagens obtidas para diferentes vazões de ar e água, bem como, a fração de vazio, as correntes de arraste e os perfis de atenuação dos nêutrons para o escoamento no interior de um tubo com incrustação.

IV.1 – Ensaio preliminares

A figura IV.1 mostra as imagens originais obtidas com o Sistema em Tempo Real em um tubo de alumínio com 6 *mm* de diâmetro interno e 1,5 *mm* de espessura, em distâncias diferentes da borda do canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta/IEN/CNEN. As vazões de ar e água não foram precisamente mantidas, pois o objetivo era apenas ajustar o aparato às condições operacionais do Sistema em Tempo Real, para a visualização do escoamento bifásico ar-água na tubulação.

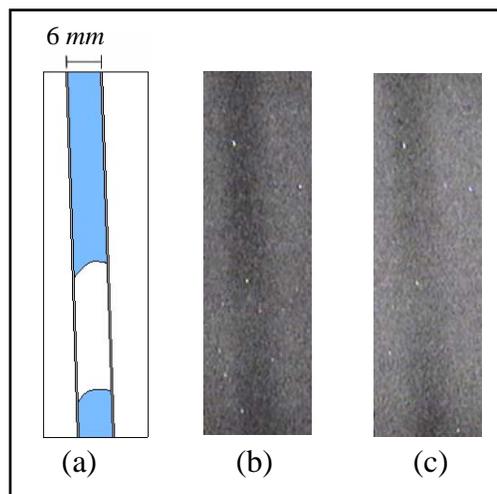


Figura IV.1 – (a) desenho esquemático e imagens obtidas com a tubulação de alumínio: (b) junto à borda do canal de irradiação J-9 do reator Argonauta/IEN/CNEN (c) a 32 *cm* dela.

IV.2 – Processamento das imagens capturadas

Como visto já na seção III.5, a imagem original, ao ser capturada, carrega o ruído decorrente da interação da radiação com os CCD, comprometendo sua qualidade. Sendo assim, o processamento das imagens capturadas é de grande importância, pois, podem ser melhor analisadas.

A figura IV.2 mostra imagens neutrongráficas em tempo real, obtidas para dois aparatos distintos: o primeiro, visando a visualização do escoamento bifásico em tubo de pequeno diâmetro, e o segundo, onde se simulou incrustações no interior de um tubo. Na figura IV.2 (a), a existência do escoamento *slug* no interior do líquido na imagem processada é visualizada pela região mais clara. A imagem observada na figura IV.2 (b), pós-processamento, mostra o início da injeção de água no tubo (região escura na parte inferior) e as seis esferas de aço utilizadas para simular as incrustações no interior da tubulação de alumínio com maior nitidez. As imagens pós-processadas podem ser observadas, em IV.2 (a) “I.P”, após o uso dos filtros *Low-Pass*, *Median*, *Watershed* e *Close*, e IV (b) “I.P” com os filtros *Low-Pass* e *Median*.

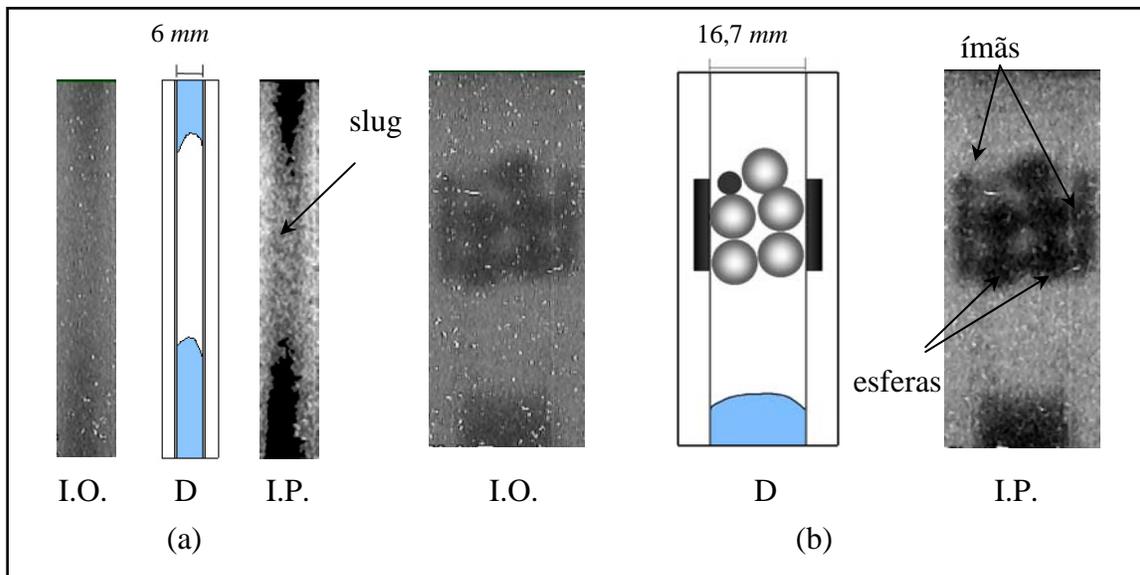


Figura IV.2 – (a) imagem original (I.O.), desenho (D) e imagem processada (I.P.) de um escoamento do tipo *slug* na tubulação de pequeno diâmetro, (b) imagem original (I.O.), desenho (D) e imagem processada (I.P.) do aparato V.3 enchendo.

IV.3 – Ensaios realizados com o aparato V.2

A figura IV.3 mostra, seqüencialmente, as imagens em Tempo Real do escoamento bifásico ar-água obtidas com o aparato V.2. Primeiramente, na figura IV.3 (a), é observada a imagem da fase líquida, onde a água é visualizada pela região escura. Em seguida, o início do escoamento *slug* pode ser observado, onde, neste caso a velocidade de escoamento da água é $0,9 \text{ m/s}$ e a velocidade de deslocamento do ar é $0,7 \text{ m/s}$. Deve-se observar que a fase gasosa possui a forma de bolhas alongadas da ordem do diâmetro do tubo se propagando ao longo do escoamento de água, como visto na seção II.4.1

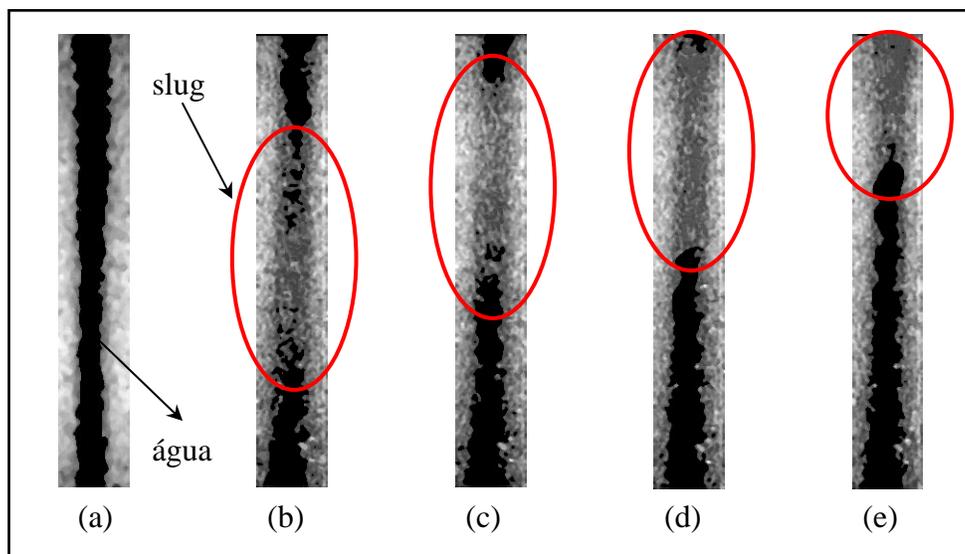


Figura IV.3 – (a) tubulação de alumínio preenchido somente com água, (b), (c), (d) e (e) seqüência de escoamento bifásico *slug*.

No aparato V.2, entre o injetor e o tubo de alumínio encontra-se um tubo transparente com 16 cm de comprimento e com o mesmo diâmetro interno do tubo de alumínio, que permite a visualização dos eventos dinâmicos pelo método óptico. Desse modo, as vazões puderam ser pré-estabelecidas, para o tipo de escoamento desejado.

Com as variações das vazões de ar e água, registradas pelos respectivos medidores de vazão, observaram-se os regimes de escoamentos bifásicos distintos. As velocidades de deslocamento do ar e escoamento da água foram obtidas, dividindo-se as vazões registradas nos medidores de vazão pela área da seção reta transversal da tubulação, por onde passa o

fluido. A figura IV.4 mostra os regimes de escoamentos bifásicos registrados pelo Sistema em Tempo Real. As imagens registradas nas figuras IV.4 (a) e (b) referem-se a uma velocidade de escoamento da água de $0,2 \text{ m/s}$ e uma velocidade de deslocamento do ar de $0,7 \text{ m/s}$. Na figura IV.4 (c), a imagem refere-se a uma velocidade de deslocamento do ar de $0,2 \text{ m/s}$ e de $0,4 \text{ m/s}$ para a água. Na figura IV.4 (d), o evento é retratado para uma velocidade de escoamento da água de $0,4 \text{ m/s}$ e uma velocidade de deslocamento do ar de $11,3 \text{ m/s}$.

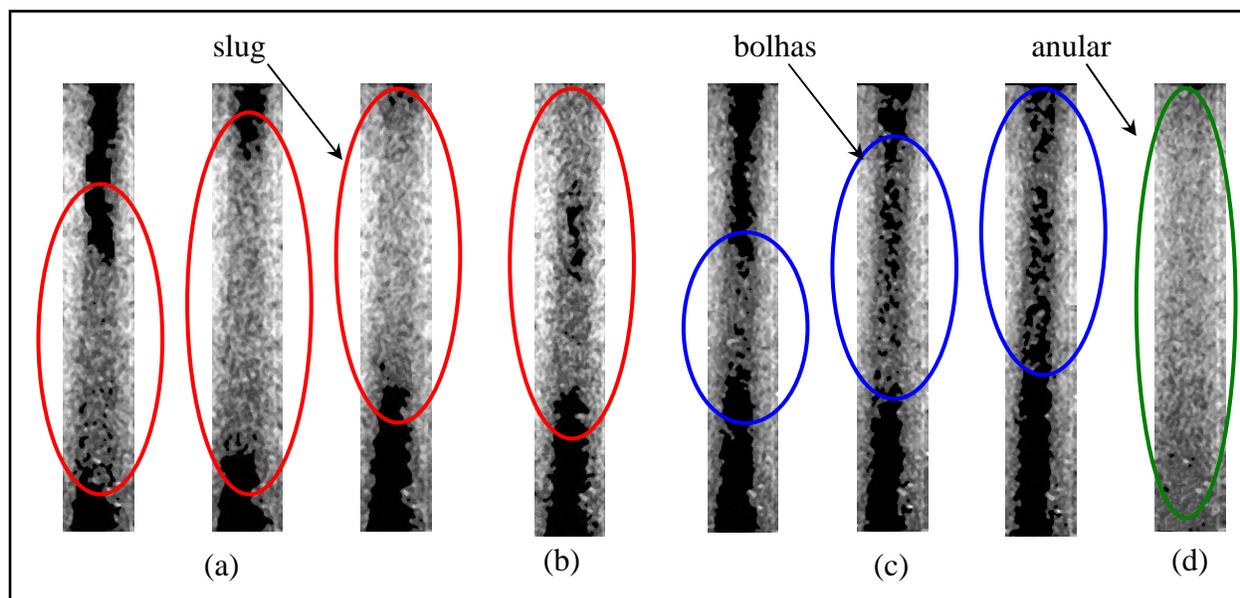


Figura IV.4 – Imagens neutrongráficas em tempo real de diferentes regimes de escoamentos: (a) e (b) escoamento *slug*, (c) possível escoamento de bolhas e (d) escoamento anular.

A figura IV.4 (a) mostra quadros seqüenciais da imagem relativa a um escoamento do tipo *slug*, porém, com um perfil mais alongado do que o visto na figura IV.3. Na figura IV.4 (b), tem-se o registro de outro escoamento do tipo *slug* consecutivo. Com relação às imagens seqüenciais observadas na figura IV.4 (c), os medidores de vazão foram regulados para se obter um escoamento com formação de bolhas, com base na observação prévia de bolhas e pequenos *slugs* com o sistema óptico. Entretanto, apesar das imagens em tempo real não mostrarem nitidamente as bolhas no interior do tubo, pode-se notar que ocorreu a formação de uma certa quantidade de ar no interior do tubo, que não preenche

completamente o diâmetro interno do tubo, como ocorreu no escoamento do tipo *slug*. Isso leva a crer que os eventos vistos na figura IV.4 (c) assemelham-se a bolhas. Na figura IV.4 (d), a imagem registrada refere-se a um escoamento do tipo anular, onde o ar se desloca verticalmente em torno do centro do tubo.

IV.4 – Corrente de arraste e Fração de Vazio

Posteriormente, ensaios foram realizados, em condições experimentais para formação de escoamentos dos tipos *slug* e bolhas, para os quais variam-se as velocidades de deslocamento de ar e de escoamento água, que foram dispostos na tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Velocidade de escoamento do líquido j_l (água) e velocidade de deslocamento do gás j_g (ar).

j_l (m/s)	j_g (m/s)
0,4	0,7
0,9	0,7
0,4	2,2
0,9	1,4
0,4	11,3
0,3	0,7
0,7	0,7
0,4	0,4
0,9	0,4

Utilizando o valor sugerido por Ishii [34], para um escoamento do tipo *slug* citado na tabela II.5, obteve-se o valor de 0,08 m/s, para a velocidade de arraste de um escoamento bifásico ar-água, num tubo com 6 mm de diâmetro interno. Substituindo-se este valor, na equação (2.23), e os valores das velocidades de deslocamento de ar de escoamento de água, fornecidos na tabela IV.1, na equação (2.19), obteve-se a velocidade do gás relativa a cada variação da velocidade de ar e água, conforme mostrado na tabela IV.2.

Tabela IV.2 – Valores obtidos experimentalmente para o escoamento bifásico total ($j = j_{líq} + j_{gás}$) e para velocidade do gás relativa a diversas velocidades de deslocamento de ar e de escoamento de água.

j (m/s)	v_g (m/s)
1,1	1,4
1,6	1,9
2,6	3,2
2,3	2,8
11,8	14,1
1,0	1,2
1,4	1,7
0,8	1,1
1,3	1,6

A figura IV.5 mostra a correlação entre modelos de correntes de arraste referentes aos valores apresentados na tabela IV.2, para o tubo de alumínio com 6 mm de diâmetro interno.

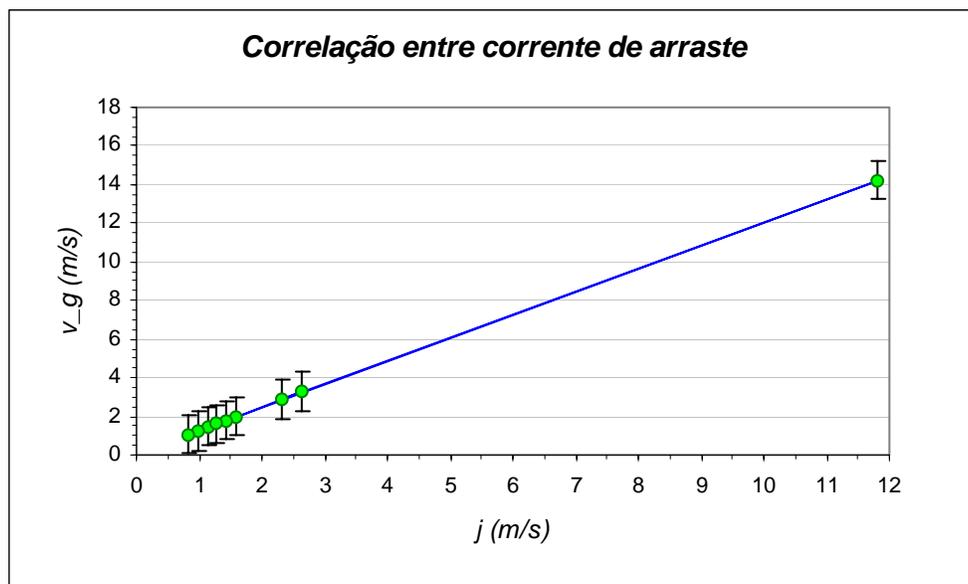


Figura IV.5 –Correlação entre correntes de arraste, para os ensaios neutronográficos em tempo real realizados com um tubo de alumínio com 6 mm de diâmetro.

A correlação entre correntes de arraste obtidas experimentalmente está de acordo com os resultados obtidos por *Hibiki et al* [3], para um tubo cilíndrico com 4,08 mm de diâmetro interno e um duto retangular com espessura, largura e comprimento de 1,0 mm, 40 mm e 1400 mm, respectivamente. Isto mostra que os modelo de correntes de arraste pode ser aplicado também para dutos retangulares e tubulações com diâmetros diferentes.

Na seção II.4.2, enfatizou-se a importância do mapa de escoamento, porque ele permite se definir previamente as condições de contorno necessárias para as simulações dos escoamentos desejados. Sendo assim, a habilidade da metodologia em naturalmente reproduzir os regimes de escoamentos foi demonstrada, através da comparação do regime obtido nas simulações com um mapa de padrões de escoamentos construído, segundo os estudos de Taitel e Dukler [35]. A Figura IV.6. apresenta o mapa de padrões de escoamento em tubulação vertical proposto por Taitel e Dukler. O regime observado, para cada condição de contorno testada na figura IV.4, pode ser localizado no mapa de escoamento da figura IV.6. Utilizou-se os símbolos: quadrado, para indicar que o regime de *slug* foi obtido; circular, para o regime de bolhas; e triangular, para o regime anular.

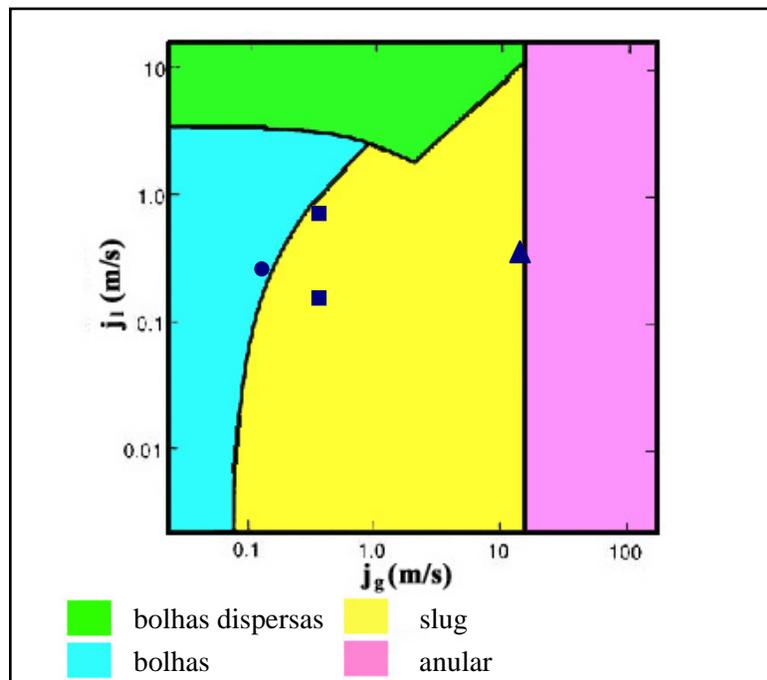


Figura IV.6 – Mapa de escoamento em tubulações verticais e tipos de escoamentos obtidos.

Utilizando-se os dados dispostos nas tabelas IV.1 e IV.2 e os valores sugeridos por Ishii [34], para o escoamento do tipo *slug*, pode-se obter a fração de vazio em uma determinada posição do tubo, pela da equação (2.25). A figura IV.7 mostra a fração de vazio obtida em função do ar injetado (velocidade de deslocamento de ar) para dois valores fixos de vazão de água.

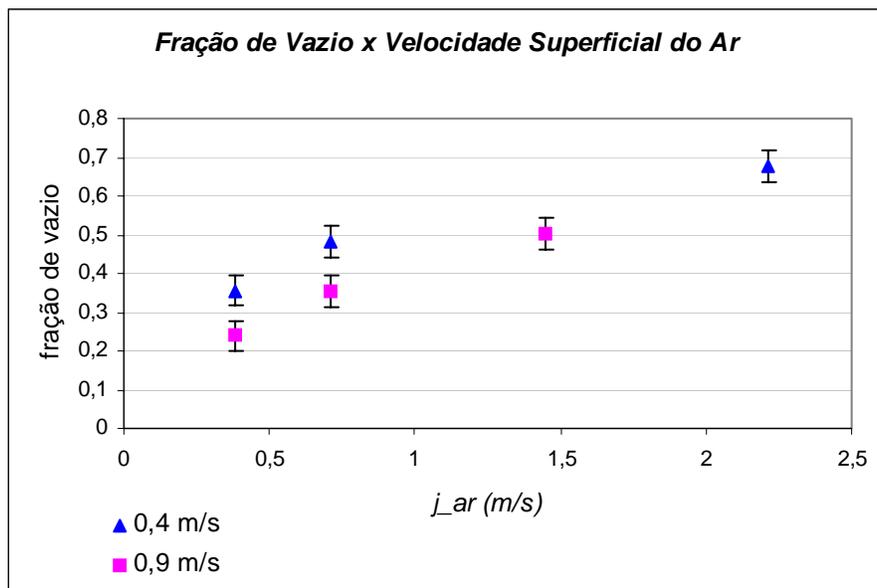


Figura IV.7 – Fração de vazio em função da velocidade de deslocamento de ar.

Observa-se, na figura IV.7, que a fração de vazio aumenta, quando a vazão de ar aumenta, para cada vazão de água.

IV.5 – Simulação de incrustações internas em tubulação metálica

A figura IV.8 mostra imagens seqüenciais do líquido escoando no interior da tubulação metálica, com velocidade de escoamento da água de 0,9 m/s, sem a inserção das esferas metálicas, que simulam a ocorrência de incrustação. Esta imagem foi obtida para se observar o comportamento do escoamento do líquido no interior da tubulação de alumínio e, posteriormente, compará-la com o comportamento do líquido ao encontrar as incrustações, no interior do tubo.

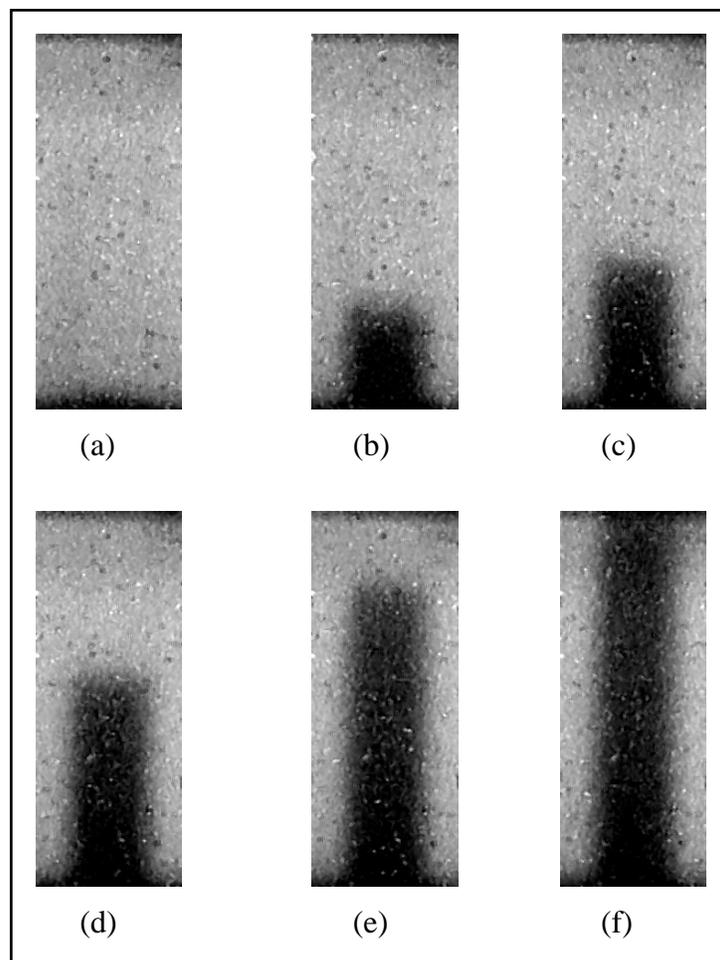
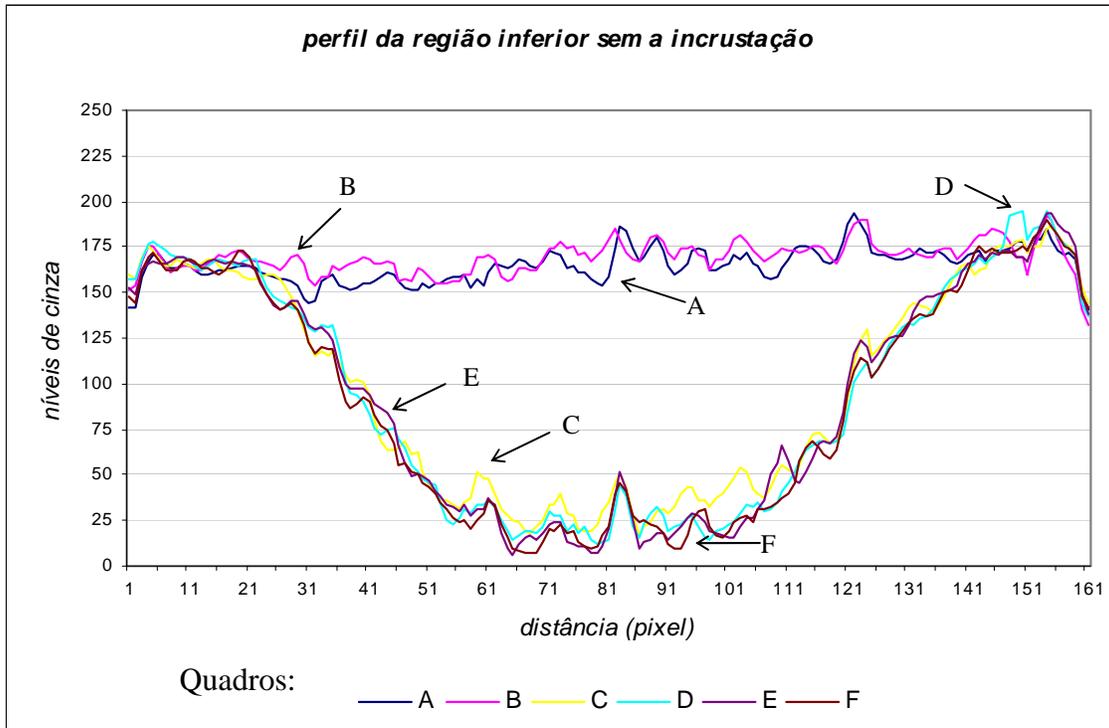
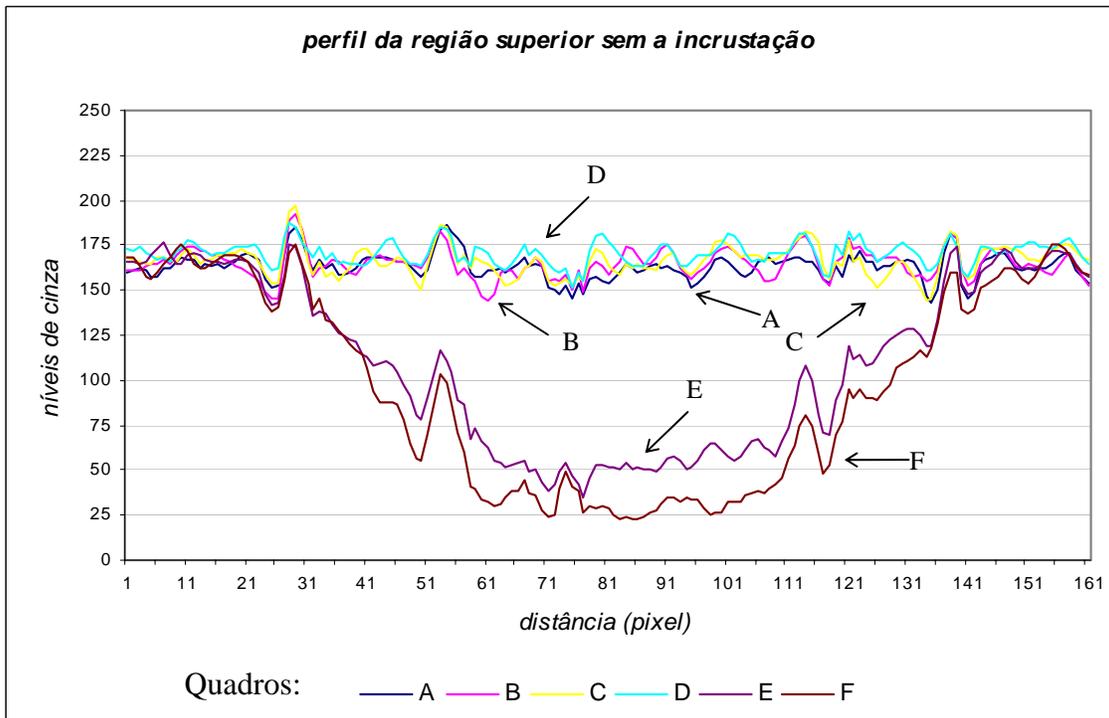


Figura IV.8 – Neutronografia em Tempo Real de: (a) tubulação de alumínio vazia, (b), (c), (d), (e) e (f) seqüência de imagens do líquido escoando na tubulação de alumínio com 16,7 *mm* de diâmetro interno.

Com essas imagens foi possível fazer um perfil de atenuação, para posterior comparação com o escoamento do líquido, no interior do tubo de alumínio, com a presença de incrustação. Para construção deste perfil, foram escolhidas duas regiões para análise do escoamento: uma, na parte inferior, e outra, logo após a incrustação no tubo, quando esta for inserida. Os perfis foram traçados de 80 em 80 quadros, nas mesmas regiões. A figura IV.9 (a) e (b) mostram os perfis obtidos, nas regiões: inferior e superior no tubo, após a passagem do líquido pela região de análise.



(a)



(b)

Figura IV.9 - (a) Perfil da região inferior à da incrustação no tubo, quando inserida , (b) perfil da região superior à da incrustação no tubo, quando inserida.

O escoamento do líquido no interior da tubulação metálica contendo as incrustações é mostrado na seqüência de imagens da figura IV.10. As esferas metálicas no interior do tubo simulam a ocorrência de incrustações, que devem oferecer “resistência” ao escoamento do líquido. Junto à parede da tubulação, na parte externa, fixaram-se dois ímãs de forma a se prender as esferas na parede do tubo de alumínio.

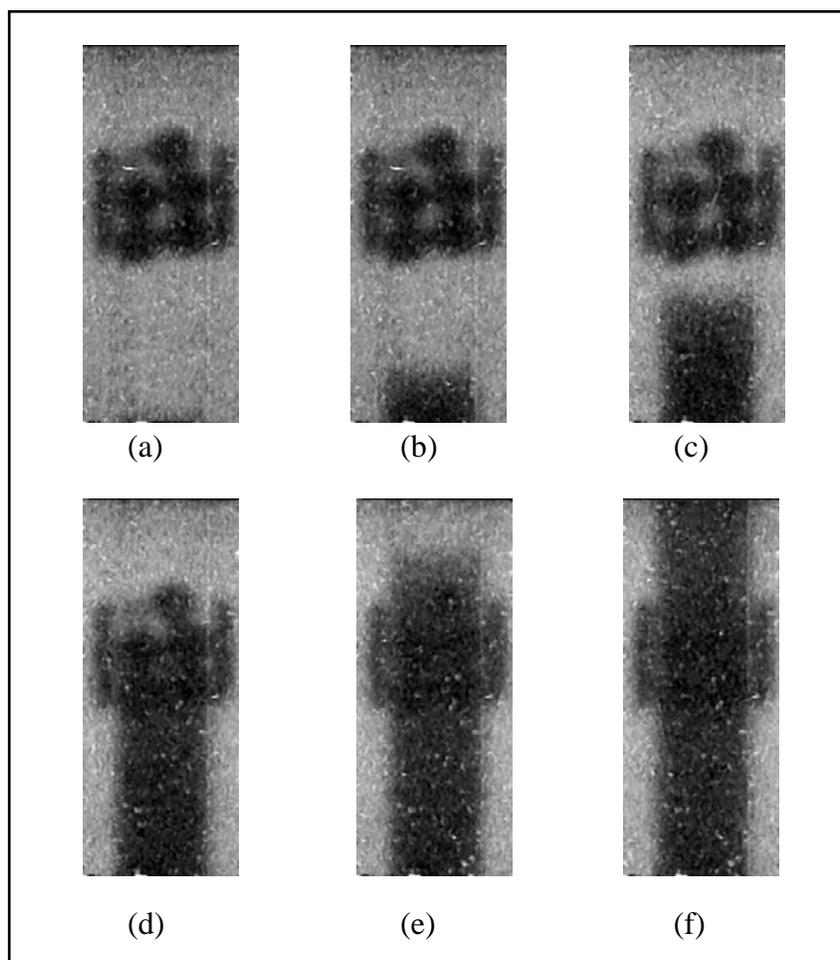
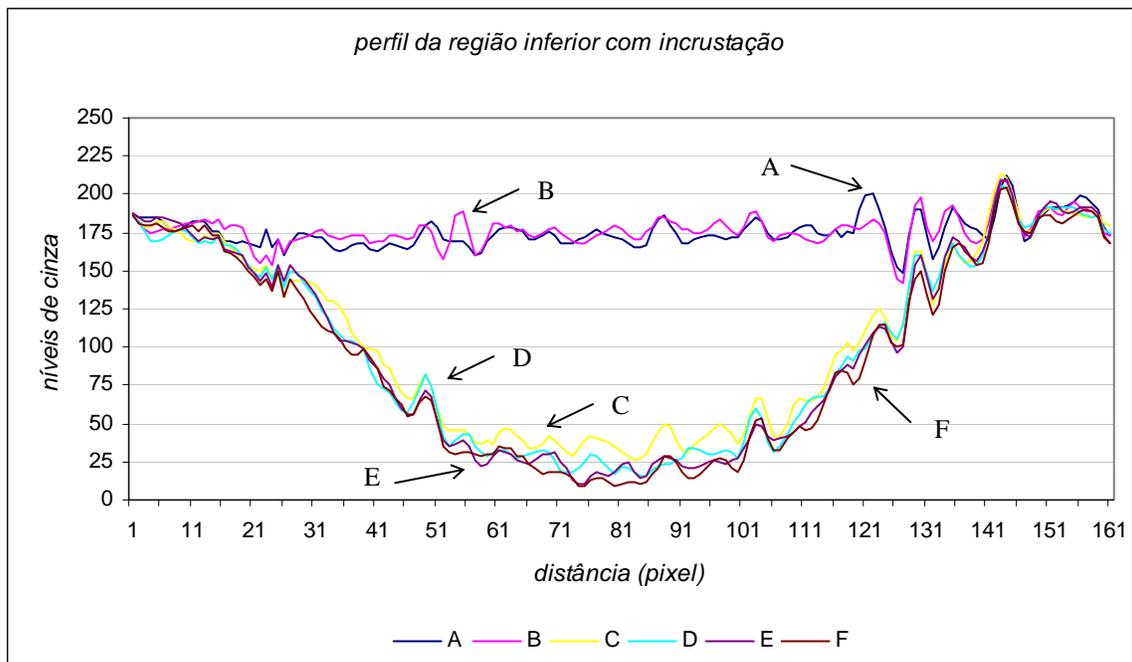


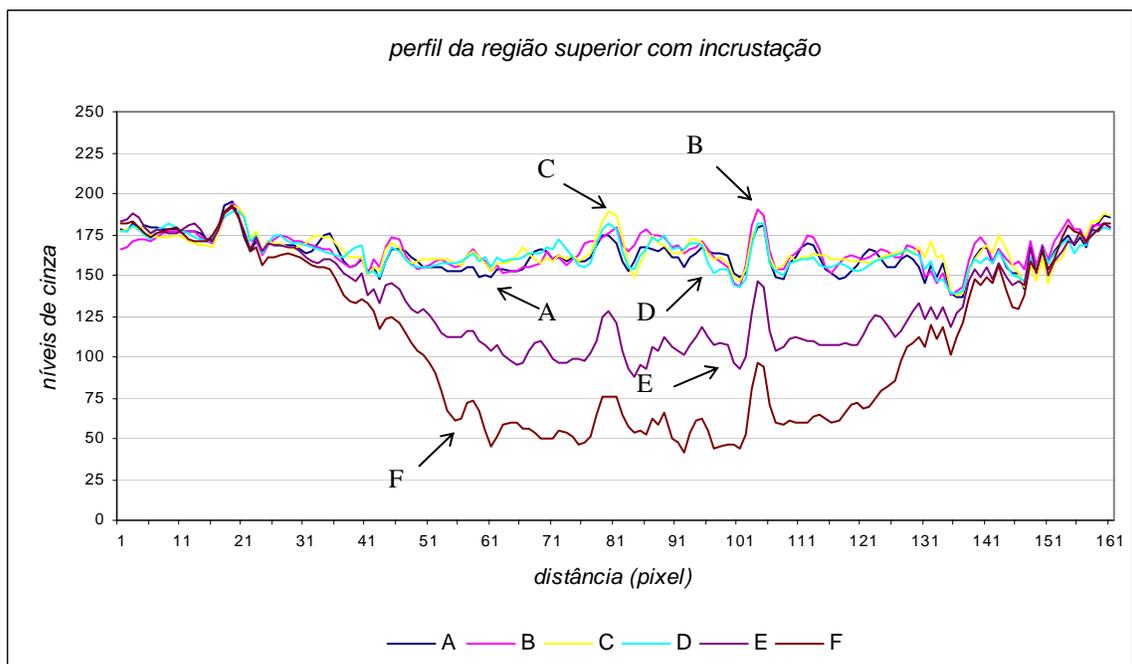
Figura IV.10 – Imagens neutrongráficas em tempo real das incrustações no interior tubo de alumínio: (a) sem injeção de água; (b), (c), (d), (e) e (f) seqüência mostrando o deslocamento do líquido no interior do tubo, na região das incrustações.

Utilizando a mesma região de análise e números de quadros para construção dos perfis vistos na figura IV.9 (a) e (b), também foram feitos perfis de atenuação com as

imagens da figura IV.10. As figuras IV.11 (a) e (b) mostram os perfis das regiões inferior e superior, respectivamente.



(a)



(b)

Figura IV.11 – (a) Perfil da região inferior à da incrustação no tubo; (b) perfil da região superior à da incrustação.

Nota-se que não ocorreu uma variação no escoamento, em relação à região de análise, na parte inferior, em ambos os perfis das figuras IV.9 (a) e IV.11 (a). Entretanto, após a passagem do líquido pela região de análise, observa-se que houve uma redução na atenuação, devido à resistência do escoamento do líquido, ao passar pelas incrustações. Na figura IV.11 (b) houve uma redução nos níveis de cinza das linhas que correspondem às imagens registradas nos quadros 320 e 400 e que são representados pelas linhas “E” e “F”, quando comparada à figura IV.9 (b). Esta redução deveu-se à resistência encontrada pelo líquido ao passar pelas incrustações.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Como visto na seção II.4.1, os escoamentos bifásicos podem ocorrer de diferentes formas dependendo da geometria do tubo, das propriedades dos fluidos e das condições operacionais. Assim, para ajudar a definir as condições iniciais e de contorno adequadas para a reprodução de um regime de escoamento, mapas de padrão de escoamentos foram previamente consultados. A técnica de Neutronografia em Tempo Real possibilitou visualizar um escoamento bifásico no tubo de alumínio com pequeno diâmetro, bem como, distinguir tipos de escoamentos, tais como: o escoamento *slug*, o escoamento *anular* e possíveis *bolhas*. Os padrões de escoamentos observados estão de acordo com os dispostos no mapa de escoamento de Taitel e Dukler. O regime de escoamento bifásico *slug* foi claramente observado nas imagens mostradas nas figuras IV.3 e IV.4 (a), para diferentes valores de vazão de ar e água, mostrando que o escoamento *slug* não ocorre somente numa faixa estreita de vazão, concordando com os estudos realizados por Shoham [35].

Com os valores das velocidades de deslocamento do ar e de escoamento da água, obtidos experimentalmente com o aparato V.2 foi possível traçar a correlação entre correntes de arraste, mostrada na figura IV.5, que foi comparada com a correlação obtida por *Hibiki et al* [2] para tubos cilíndricos e retangulares, com dimensões diferentes, que apresentou também um comportamento linear. Isso demonstra que a fração de vazão obtida no presente trabalho resultou bem ajustada ao modelo de correntes de arraste. A fração de vazão foi obtida em função do ar injetado, concluindo-se que um aumento da fração de vazão corresponde ao aumento da vazão de ar injetado, para uma determinada vazão fixa de água.

A ocorrência de incrustações nas paredes internas de um duto é algo indesejável no processo de transporte de petróleo, porque causa um “estrangulamento” que impede a passagem do fluido, provocando danos aos equipamentos e intermitência na produção. A localização exata dessas incrustações economiza tempo e pessoal para reparar o entupimento ou limpeza. As imagens simuladas da figura IV.10 mostraram claramente as incrustações no interior do tubo de alumínio, bem como, o deslocamento do líquido, antes e

após sua passagem pela região de incrustação. Com os perfis obtidos em duas posições fixas na tubulação, pôde-se verificar a redução do escoamento do fluido, após sua passagem pela região na qual se encontra a incrustação, através da comparação da atenuação dos nêutrons, representada pelos níveis de cinza registrados nas imagens das figuras IV.9 (b) e IV.11 (b). Isto mostra que a Neutronografia em Tempo Real também pode ser aplicada para a visualização de resíduos no interior de tubos metálicos.

As imagens obtidas mostraram que o SEI instalado ao canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta IEN/CNEN está apto a realizar Neutronografias em Tempo Real de escoamento bifásico, porque permitiu a observação de escoamento do tipo *slug*, que é um regime de escoamento de grande interesse para a engenharia e a indústria de petróleo.

Sugere a continuação da presente pesquisa, mudando a tubulação do aparato V.2 para que as observações possam ser feitas em tubulações horizontais e do tipo “V”, tendo em vista que esses tipos de configurações são empregados em poços de petróleo.

Sendo assim, conclui-se que a NRTR demonstrou ser uma ferramenta eficiente para a visualização de escoamentos bifásicos de grande importância nas indústrias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OTTO, C. F. “The History of First Neutron Radiographs in Berlin 1935 – 1944”. In: *Proceedings of the Fourth Word Conference*”, Gordon and Breach Science Publishers, John P. Barton, pp. 3-9, 1993.
- [2] BERGER, H. “Advances in Neutron Radiographic Techniques and Applications: a Method for Nondestructive Testing”, *Applied Radiation and Isotopes* v. 61, n. 4, pp. 437-442, 2004.
- [3] HIBIKI, T., MISHIMA, K., YONEDA, FUJINE, S., KANDA, K. and NISHIHARA, H. “Study on Two-Phase Flow Using Image Processing Technique”. In: *Proceedings of the Fourth Word Conference*”, Gordon and Breach Science Publishers, John P. Barton, pp. 317-324, 1993.
- [4] FUJINE, S., HIBIKI, T., MISHIMA, K., YONEDA, K., KANDA, K. and NISHIHARA, H. “Study on Visualization of Fluid Phenomena Using Neutron Radiography Technique”. In: *Proceedings of the Fourth Word Conference*”, Gordon and Breach Science Publishers, John P. Barton, pp. 309-315, 1993.
- [5] IKEDA, Y., OHKUBO, K., TAMAKI, M., KINEBUCHI, T., MIHARA, T., YONEDA, K., FUJINE, S., MATSUMOTO, T. and AIZAWA, O. “Real-Time Neutron Radiography for Fluid Dynamics and Molten Metals Behavior”. In: *Proceedings of the Threety Word Conference*”, Kluwer Academic Publishers, John P. Barton, pp. 531-538, 1990.
- [6] MANDHANE, J. M., GREGORY, C. A., AZIZ, K., "A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes," *Int J Multiphase Flow*, 1(4), pp 537-554, 1974.
- [7] FUJINE, S., MISHIMA, K., YONEDA, K., YONEBAYASHI, K., YAMOTO, K., SOBAJIMA, M., OHTOMO, S., KANDA, K. and NISHIHARA, H. “Visualization on Gas-

Liquid Two-Phase Flow in a Narrow Rectangular Duct”. In: *Proceedings of the Threety Word Conference*”, Kluwer Academic Publishers, John P. Barton, pp. 513-521, 1990.

[8] FERREIRA, F. J. O., *Estudo para Implantação de um Sistema Eletrônico para Aquisição de Imagens Neutronográficas no Reator Argonauta do IEN/CNEN*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

[9] MENEZES, M. O., *Radiografia com Nêutrons em Tempo Real*. Tese de D.Sc., IPEN-CNEN/SP, USP, São Paulo, 2000.

[10] BARBAZELLI, M. R., *Análise do Escoamento Bifásico em Tubos Capilares Não Adiabáticos Usando o Modelo de Dois Fluidos*, Dissertação de M.Sc., UNESP, São Paulo, Brasil, 2000.

[11] CRISPIM, V. R., SILVA, A. X, “Void Fraction Calculations in Two-Phase Flow Using Neutron Radiography”. In: *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, v. 8, pp. 338-342, 2001.

[12] ORTEGA, M. A. J., *Análise do Padrão Slug em Tubulações Horizontais Utilizando o Modelo de Dois Fluidos*, Dissertação de M.Sc., PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

[13] TAKENAKA, N., KADOWAKI, K., TOHARA, K. and KAWABATA, Y. “Towards the Visualization of Fuel Cavitation in a Nozzle of a Diesel Engine by Neutron Radiography”, *KURRI Progress Report*, 8.09, 2002.

[14] SONADA, K., ONO, A., TAKENAKA, N., FUJII, T., TAZAWA, S. and NAKANI, T. “Visualization and Volumetric Fraction Measurement of Multiphase Flow by Neutron Radiography”. In: *Proceedings of the Fourth Word Conference*”, Gordon and Breach Science Publishers, John P. Barton, pp. 347-354, 1993.

- [15] CIMBALA, J. M., BRENIZER, J. S., CHUANG, A. P., HANNA, S., CONROY, C. T., EL-GANAYNI, A. and RILEY, D. R. “Study of a Loop Heat Pipe Using Neutron Radiography”, *Applied Radiation and Isotopes* v. 61, n. 4, pp. 437-442, 2004.
- [16] CIMBALA, J. M., HUGHES, D. E., SATHIANATHAN, D. “Application of Neutron Radiography for Fluid Flow Visualization”, *Nuclear Technology* v. 81, pp. 435-445, Jun.1988.
- [17] KIM, T., JUNG, Y., KIM, M., SIM, C., LEE, S. and JEON, J. “Visualization of Two-Phase Flow Inside Metallic Mini-Tube Using Neutron Image Technique”. In: *Proceedings of the International Symposium on Research Reactor and Neutron Science – In Commemoration of the 10th Anniversary of HANARO*”, pp. 499-503, 2005.
- [18] RICHARDS, W. J., TUTTLE, M. J., ULOWETZ, K. and MCGEE, R. *Real-Time Neutron Radiography – Applications For The Automotive Industry*, UCD McClellan Nuclear Radiation Center, 2003.
- [19] TAKENAKA, N., SUGIMOTO, K., KAWABATA, K., MIYATA, D., SUGATANI, M., KAWABATA, Y. and HINO, M. “Visualization of Thermal Hydraulic Phenomena by Cold Neutron Radiography”, *KURRI Progress Report*, 8.1-6, 2004.
- [20] OGINO, F., KAMATA, M., MISHIMA, K., FUGINE, S., YONEDA, K. and KANDA, K. “Application of Neutron Radiography to the Study of Liquid-Solid Two Phase Flow”. In: *Proceedings of the Fourth Word Conference*”, Gordon and Breach Science Publishers, John P. Barton, pp. 339-346, 1993.
- [21] RINARD, P., “Neutron Interaction with Matter”, *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*, chapter 12, Los Alamos National Laboratory, 1991.
- [22] CHUNG, K., *Introdução a Física Nuclear*, 1 ed. Rio de Janeiro, EdUERJ, 2001.

- [23] DOMANUS, J. C., *Practical Neutron Radiography*, Commission of the European Communities, 1 ed., Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [24] FERREIRA, F. J. O., “Implantação de um Sistema Eletrônico para Aquisição de Imagens Neutronográficas em Tempo Real no Reator Argonauta do IEN/CNEN”, *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento* v. 6, n. 1, Abril.2004.
- [25] KALLMANN, H., *Neutron Radiography*, Research 1, pp. 254-260, 1948.
- [26] PETER, O., *Z. Naturforschung* 1 (1946), pp. 557-559.
- [27] ALLEN, D. A., HAWKESWORTH, M. R., BEYON, T. D., et al, *Nuclear Instruments Methods A 353 (1)*, pp. 128-133, 1994.
- [28] MIKEROV, V. I., ZHITNIK, A. A., BOGOLUBOV, E. P., et al, *Investigation of Perspectives of Fast Neutron Radiography on the Basis fo Non-Traditional Neutron Sources: Neutron Gerators with Accelerating and Plasm Focus Tubes*, Program, Appendix Ref. 16, pp.74-76, 1999.
- [29] GLICKSTEIN, S. S., VANCE, W. H., JOO, H., “Void Fraction Measurements Using Neutron Radiography”. In: *ANS/ENS 1992 International Conference*, pp. 1-5, 1993.
- [30] SILVA, A. X., *Uso de um Feixe de Nêutrons Térmicos para a Detecção de Narcóticos e Explosivos por Tomografia, para Aplicação na Segurança Pública Nacional*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.
- [31] KRANE, K.S., *Introductory Nuclear Physics*, New York, John Wiley e Sons, 1988.
- [32] ANDRADE, M. L. G., *Caracterização de Sistemas Filme-Convertor para Radiografia com Nêutrons*, Dissertação de M.Sc., IPEN/CNEN, São Paulo, Brasil, 2002.

- [33] LUIZ, L. C., SOUZA, E. M., LEMOS JUNIOR, L. M., *Avaliação da Imagem em Gamagrafia e em Neutronografia Utilizando Filmes, e em Sistema de Neutronografia em Tempo Real*, END, COPPE/UFRJ, 2004.
- [34] ISHII, M., ZUBER, N., “Drag Coefficient and Relative velocity in Bubbly, Droplet or Particulate Flows”, *Alche*, v. 25, n. 2, pp. 843, 1979.
- [35] CARNEIRO, J. N. E., *Simulação Numérica de Escoamentos Bifásicos no Regime de Golfadas em Tubulações Horizontais e Levemente Inclínadas*, Dissertação de M.Sc., PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [36] ECONOMIDES, M. J., HILL, A. D., ECONOMIDES, C. E., *Petroleum Production Systems*, 1 ed., EUA.. Prentice Hall Petroleum Engineering Series, 1994.
- [37] MAGALHÃES, T. C. B., *Influência de restrições operacionais na definição das estratégias de produção*, Dissertação de M.Sc., UNICAMP, São Paulo, SP, Brasil, 2005.
- [38] WALLIS, G. B., *One-Dimensional Two-Phase Flow*, 2 ed. New York, McGraw Hill, 1979.
- [39] ISHII, M., “One-Dimensional Drift-Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion Between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes”. In: *ANL 77-47 Argonne National Lab Report*, , October 1977.
- [40] COLLIER, J. G., *Convective Boiling and Condensation*, 2 ed. New York, McGraw Hill, 1981.