

DESENVOLVIMENTO DE UMA TELA CINTILADORA NACIONAL
CONVERSORA DE NÊUTRONS

André Luís Nunes Barbosa

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:

Profa. Verginia Reis Crispim, D. Sc.

Dr. Evaldo Simões Fonseca, D. Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2008

BARBOSA, ANDRÉ LUÍS NUNES

Desenvolvimento de uma Tela Cintiladora
Nacional Conversora Nêutrons
[Rio de Janeiro]2008

XIII, 62 p 29,7 cm(COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Nuclear,2008)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Cintilador
2. Neutronografia
3. Conversor de Nêutrons

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, a Deus por tudo que tem me proporcionado nesta vida e por ter me ofertado as condições possíveis para a realização deste trabalho.

Agradeço a minha esposa e filhos, por todo o apoio por eles dedicado.

A minha orientadora, Verginia Reis Crispim, pela maneira como conduziu minha orientação.

A todos os professores do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ, pelos ensinamentos nas diversas fases do Mestrado.

A Rosilda Maria G. Lima, do Laboratório de Pesquisa do Processo do Ciclo de Combustível Nuclear – IEN, pela colaboração, sugestões na área de química e utilização de seu laboratório.

Ao professor Júlio C. Alfredo, do Instituto de Química, pela cessão de alguns materiais.

Ao professor Luís do Instituto de Macromoléculas/UFRJ pela utilização do seu laboratório bem como os funcionários Jairo e Leonardo.

À equipe de operação do reator Argonauta, do IEN, da qual me orgulho de fazer parte, nas pessoas do Francisco José, Francisco Canindé, Marco Aurélio, Flávio, João e Renke.

Ao amigo Paulo César Barros do setor de manutenção, SENGE, IEN, que utilizando sua experiência em pintura com pistolas, ajudou na confecção das telas.

E, finalmente, a todos que ajudaram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

Dedico este trabalho a Deus, minha amada esposa e meus filhos, sem os quais eu não seria nada.

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

DESENVOLVIMENTO DE UMA TELA CINTILADORA NACIONAL
CONVERSORA DE NÊUTRONS

André Luís Nunes Barbosa

Março/2008

Orientador: Vergínia Reis Crispim

Programa: Engenharia Nuclear

Tanto o domínio da tecnologia nacional para a separação de elementos de terras raras como a grande reserva desses minérios em território brasileiro motivaram o estudo de telas cintiladoras conversoras de nêutrons nacionais, empregando-se a mistura granular $Gd_2O_3-ZnS:Ag$. Três metodologias foram usadas para a confecção dessas telas, a saber: jateamento realizado com uma pistola a ar comprimido sobre uma folha de celulose tipo CG3460-3M; fusão de mistura granular, $Gd_2O_3-ZnS:Ag$ com EVA em câmara de mistura e deposição da mistura granular sobre o substrato de EVA. Utilizou-se um fluxo da ordem de $4,46 \times 10^5$ nêutrons térmicos/cm².s, provindos do canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta/IEN/CNEN, e o filme radiográfico AA-400 Industrex Kodak. Os desempenhos das telas cintiladoras conversoras de nêutrons nacionais foram analisados e as imagens neutronográficas obtidas com o sistema tela conversora-filme radiográfico demonstraram que as metodologias propostas são viáveis, podendo contribuir para a redução de custo dessa técnica de END, embora careçam de otimização visando-se aumentar o número de fótons de luz para permitir seu uso em neutronografias em Tempo Real (NRTR).

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

DEVELOPMENT OF THE NATIONAL SHEET CINTILATOR
CONVERTER OF NEUTRON

André Luís Nunes Barbosa

March/2008

Advisors: Vergínia Reis Crispim

Department: Nuclear Engineering

Both the national domain of the technology for the separation of rare earth elements and the large reserves of these minerals in Brazilian territory, motivated the study of national sheets cintilators converter of neutrons, using a granular mixture Gd₂O₃-ZnS:Ag. Three methodologies were used for the manufacture of such sheets, namely: deposition done with a compressed-air gun on a sheet of cellulose type CG3460-3M; Fusion of granular mixture with EVA in the mixing chamber and deposition of granular mixture on the substrate of EVA. It was used the flux of the order of $4,46 \times 10^5$ neutrons termics/cm².s, coming from the channel irradiation, J-9, of the reactor Argonauta / IEN / CNEN and the radiographic film AA-400 Kodak Industrex. The performances of national cintilator neutrons converter sheets were analyzed and the images obtained with the, demonstrated that the methodologies proposed are technically feasible and can contribute to the reduction of cost of this technique for END, but which lack optimization is aimed at increasing the number of photons of light to allow its use in neutrongraphys in Real Time (NRTR).

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	01
I.1 – Generalidades	01
I.2 – Motivação e Objetivo	02
I.3 – Evolução da técnica neutronográfica	03

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
II. 1 – O nêutron	10
II.1.2 – Interação do nêutron com a matéria	10
II.1.3 – Atenuação dos nêutron	12
II. 2 – Fontes de nêutrons	14
II.3 – Neutronografia	14
II.3.1 – Principais componentes	16
II.3.2 – Otimização do sistema neutronográfico	16
II.3.3 – Neutronografia com filmes Radiográficos	19
II.3.4 – Formação da imagem neutronográfica	21
II.3.5 – Processamento dos filmes radiográficos	26
II.3.6 – Resolução espacial de uma imagem neutronográfica	27
II.3.7 – Indicadores de qualidade de feixe neutrônico	28
II.3.8 – Função da borda difusa	30
II.3.9 – Função transferência de modulação	30

CAPÍTULO III

METODOLOGIA	32
III.1 – Método de obtenção do ZnS:Ag	35
III.1.1 – Determinação dos percentuais	35
III.1.2 – Determinação das massas e volumes	36
III.1.3 – Etapas da obtenção do ZnS:Ag	37
III.2 – Procedimento para obtenção do coloide	38
III.3 – Confecção das Telas por deposição jateada	39
III.4 – Neutrongrafia	41
III.5 – Metodologia para determinação da resolução espacial e MTF	42
III.6 – Curvas características das telas conversoras cintiladoras nacionais	43

CAPÍTULO IV

RESULTADOS	44
IV.1 – Análise das imagens neutronográficas obtidas com as telas cintiladoras conversoras nacionais	45
IV.2 – Resolução espacial e MTF das telas cintiladoras conversoras nacionais	47
IV.3 – Curvas características do sistemas com tela conversora cintiladora nacional #1/ filme radiográfico e o tempo de exposição	52

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES 54

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 58

LISTA DE TABELAS

Tabela II.1 – Classificação dos nêutrons quanto à energia	12
Tabela II.2 – Características dos isotopos de gadolínio para conversão de neutrons térmicos em radiação secundária	20
Tabela IV.1 – Resolução espacial das telas cintiladoras conversoras importada e nacional, respectivamente, obtidas pelo ajuste da função borda difusa (ESF)	50
Tabela IV.2 – Valores da modulação do sinal relativos aos ensaios neutrongráficos realizados do IRV com os sistemas tela cintiladora conversora nacional, tela conversora importada e filme AA-400, no canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta	51

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1 – Feixe de nêutrons ultrapassando um material com espessura t	13
Figura II.2 – Coeficiente de atenuação de massa de alguns elementos para nêutrons térmicos e raios x	14
Figura II.3 – Principais componentes de uma NR para objeto não radioativo	16
Figura II.4 – Princípio básico da técnica neutrongráfica utilizando filme radiográfico como registrador de imagem	19
Figura II.5 – Densidade óptica e grau de enegrecimento de um filme radiográfico	23
Figura II.6 – Curva característica de um típico filme radiográfico	24
Figura II.7 – Curva característica de um sistema tela-filme radiográfico. Gradiente avaliado em dois pontos da curva	26
Figura II.8 – Indicadores de qualidade de imagem (IQI): IPF, IRV e IS	29
Figura II.9 – Indicador de Resolução Visual (IRV)	29
Figura III.1 – Protótipo de tela conversora cintiladora de nêutrons, confeccionada pela primeira metodologia (tela #1)	33
Figura III.2 – Protótipo de tela conversora cintiladora de nêutrons, confeccionada pela segunda metodologia (tela #2)	34
Figura III.3 – Protótipo de tela conversora cintiladora de nêutrons, confeccionada pela terceira metodologia (tela #3)	34

Figura III.4 – Ensaios neutrongráficos preliminares do IRV em diferentes tempos de exposição: a) 15 minutos; b)20 minutos e c)25 minutos	36
Figura III.5 – Protótipo de tela conversora cintiladora nacional, confeccionada com base Transparency Film/3M lisa	39
Figura III.6 – Suporte de cartolina para fixação das telas durante o processo de jateamento	40
Figura III.7 – Arranjo instalado na canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta	42
Figura IV.1 – Telas conversoras cintiladoras nacionais, confeccionadas em base Transparency Film 3M: rugosa, (a) com camada selante: (b) sem selante; (c) Tela conversora cintiladora nacional com base lisa	45
Figura IV.2 – Neutronografias preliminares do IRV com as telas: a) cintiladoras conversora importada de gadolínio e b) cintiladora conversora nacional	46
Figura IV.3 – Neutronografias preliminares do IRV com as telas: a) cintiladoras conversora nacional #2 e b) cintiladora conversora nacional #3	47
Figura IV.4 – Distribuição da densidade em níveis de cinza, em função da varredura espacial na região de interface do IRV, obtida com a tela cintiladora conversora nacional #1	48
Figura IV.5 – Distribuição da densidade em níveis de cinza, em função da varredura espacial na região de interface do IRV, obtida com a tela cintiladora conversora nacional #2	48
Figura IV.6 – Distribuição da densidade em níveis de cinza, em função da varredura espacial na região de interface do IRV, obtida com a tela cintiladora conversora nacional #3	49

Figura IV.7 – Distribuição da densidade em níveis de cinza, em função da varredura espacial na região de interface do IRV, obtida com a tela importada	49
Figura IV.8 – Comparação das ESF das telas cintiladoras conversoras nacionais e a tela importada	50
Figura IV.9 – Curva característica da tela conversora cintiladora nacional # 1	52
Figura IV.10 – Região linear da curva característica	53
Figura V.1 – NRTR com a utilização da tela cintiladora conversora de nêutrons importada, NE-425	55
Figura V.2 – NRTR com a utilização da tela cintiladora nacional conversora de nêutrons # 1	56

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 – Generalidades

A idéia de se utilizar o nêutron como partícula de prova , para fins radiográficos, data de 1935, logo após sua descoberta em 1932, com o trabalho dos alemães Kalman e Khun [10].

Historicamente a primeira radiografia com nêutrons data do período compreendido entre 1935 a 1938, em Berlim, onde H. Kallmann e Khun [10] usando fontes de Ra-Be e um pequeno gerador de nêutrons, realizaram experiências no laboratório de I. G. Farben Aktiengesellschaft, conseguindo desenvolver uma metodologia para se obter imagens nêutronográficas.

O. Peter, de Forschungsanstalt, produziu várias Nêutronografias de diferentes objetos , porém usando um feixe neutrônico mais intenso provindo de um gerador de nêutrons. Seus experimentos terminaram em dezembro de 1944, imediatamente antes da revolução armada em Berlim. Poucas informações estão disponíveis sobre os experimentos desenvolvidos em Berlim. Tanto os equipamentos, como muitos documentos, neste período, foram perdidos, durante e depois da batalha em Berlim (1944/1945).

A Neutronografia, é uma técnica radiográfica capaz de fornecer imagens do interior de um determinado objeto, através da interação dos nêutrons com os núcleos dos materiais que o compõe.

Com o advento dos reatores nucleares, houve a necessidade de se realizar inspeções não destrutivas de seus elementos combustíveis, porém, só na década de 60, surgiram as primeiras imagens desses componentes.

A Neutronografia tem se firmado como uma técnica de Ensaio Não-Destrutivo, e sendo cada vez mais utilizada em diferentes áreas, atuando onde os raios-x ou raios- γ não fornecem resultados satisfatórios. Atualmente, os ensaios neutronográficos tem auxiliado nas seguintes áreas :

- 1) Arqueologia, na realização de exames compostos;

- 2) Geologia, no estudo da porosidade de rochas;
- 3) Biologia, no estudo de raízes;
- 4) Arte, na investigação de pinturas;
- 5) Indústria, na manutenção de dutos e controle de qualidade de peças;
- 6) Aeronáutica, na manutenção de aeronaves e
- 7) Segurança Pública, no combate ao tráfico de drogas, armas e explosivos plásticos.

Um arranjo neutronográfico convencional é composto por três elementos: uma fonte de nêutrons, que pode ser um reator nuclear, uma fonte radioativa ou mesmo um acelerador de partículas; um conversor de nêutrons, que produz a radiação secundária que irá sensibilizar o filme radiográfico, pois o nêutron por ser eletricamente neutro, tem pequena probabilidade de interagir com os núcleos de prata presentes na composição do filme radiográfico e um dispositivo para registro e visualização da imagem, que pode ser, além de um filme radiográfico, um Sistema Eletrônico de Imageamento (S.E.I.), capaz de fornecer imagens em tempo real.

I.2 – Motivação e objetivo

No Brasil, a utilização da técnica neutronográfica, seja em pesquisas ou em Ensaios Não Destrutivos de peças, exige a importação de telas conversoras de nêutrons de alto custo, da ordem de US\$ 1,000.00, para uma folha conversora metálica de gadolínio quadrada com 25 mm de lado e 5 μ m espessura de [3]. Portanto, a motivação da presente pesquisa se deve a: reduzir o custo dos ensaios neutronográficos; independer do monopólio estrangeiro de fornecimento dessas telas; e, além disso aproveitar a reserva brasileira de minério de terras raras e o domínio da tecnologia de separação dos elementos de terras raras.

Desde 1972, o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), dispõe de um arranjo experimental, no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta, que propiciou a realização de diversos trabalhos de pesquisa que demonstraram a potencialidade da técnica neutronográfica no Brasil.

I.3 – Evolução da técnica neutrongráfica.

A finalidade deste ítem é mostrar o acervo publicado que serviu de base para o desenvolvimento deste trabalho e da técnica Neutrongráfica.

Em 1963, H. Berger determinou experimentalmente a capacidade de diversos métodos de registro de imagens neutrongráficas de alto contraste [21]. Para a determinação da resolução espacial foram realizadas neutrongrafias de um Indicador de Resolução Visual, penetrâmetro. Dentre os métodos de detecção testados os que produziram a melhor resolução para imagens com nêutrons térmicos utilizaram o método direto, com os conversores de gadolínio, de fluoreto de lítio enriquecido ${}^6\text{LiF}$ e um cintilador fino composto de boro e sulfeto de zinco ativado com prata ${}^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$. Doze anos mais tarde, em 1975, J. John realizou uma série de ensaios destinados à implantação de sistemas neutrongráficos com SEI, visando a inspeção não-destrutiva de aeronaves e de seus componentes [23]. As investigações realizadas demonstraram claramente a superioridade da Neutrongrafia sobre as demais técnicas de END, por conta de sua capacidade de detectar corrosão.

Passados onze anos, em 1986, V. Orphan, D. Kedem e F. Johansen desenvolveram um sistema nêutrongráfico móvel, para inspeção de corrosão em estruturas de alumínio de aeronaves [24]. O sistema era composto de gerador de nêutrons, marca Kaman A-711, otimizado por uma montagem de moderador/colimador, que fornecia um fluxo de nêutrons térmicos, no plano de imagem de $5 \cdot 10^4 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ e uma razão de colimação $L/D = 24$. O SEI em tempo real era composto de uma tela cintiladora, um espelho montado a 45° , em relação ao plano da imagem, que a transmitia na direção de um sistema óptico, composto de um intensificador de imagem *Thomson* e uma câmera de TV de alta qualidade. O sinal de vídeo era enviado a um micro-computador PC, provido de recursos para o tratamento das imagens e posterior arquivamento delas. Quanto ao desempenho do sistema, excedeu às expectativas iniciais estabelecidas pela Marinha dos EUA. A sensibilidade determinada foi de $0,024''$, para o polietileno, e $0,025''$, para o alumínio. A resolução foi determinada, utilizando-se um penetrâmetro, pelo qual o sistema conseguia visualizar 7 furos, num tempo de integração de 4 segundos, e 11 furos, em 8 segundos.

No mesmo ano, D. Kendem, R. Polichar, V. Orphan, D. Shreve publicaram os resultados referentes a um SEI utilizando a técnica neutrongráfica com fontes de baixa

intensidade [25]. Destacaram que desempenho desses arranjos dependia de alguns parâmetros, tais como: o fluxo de nêutrons emitidos pela fonte e o arranjo moderador/colimador. H. Berger publicou um artigo sobre os avanços na área de radiografias com nêutrons [24], enumerando suas aplicações na inspeção de explosivos, lâminas de turbinas, montagens mecânicas, escoamento de fluídos e detecção de corrosão oculta em metais. Segundo Berger, uma fonte de nêutrons adequada para radiografia deve atender às seguintes especificações: fluxo de nêutrons térmicos no plano da imagem igual ou superior a $10^6 n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$; razão de colimação L/D igual ou superior a 20; conteúdo de nêutrons térmicos igual ou superior a 55%; razão n/γ igual ou maior a $10^5 n \cdot cm^{-2} \cdot mR^{-1}$. Nessa época, dois métodos radiográficos com nêutrons vinham recebendo grande atenção em pesquisa e desenvolvimento: a tomografia computadorizada e a formação eletrônica de imagem em tempo real. Ainda neste ano, J.T. Lindsay, J.D. Jones, C.W. Kauffman e B.V. Pelt publicaram resultados referentes a um SEI utilizando o dispositivo *Light Intensifier X-ray Image, LIXI*, para a obtenção dessas imagens em tempo real [18]. Este trabalho foi desenvolvido no laboratório *Phoenix Memorial Laboratory (PML)* da Universidade de Michigan, sendo utilizada a instalação do Reator Nuclear Ford, que opera a uma potência de 2 MW. Os resultados obtidos com o *Light Intensifier X-ray Image* foram comparados com os do SEI *Magnetically Focused Image Intensifier Tube*, que já era utilizado na instalação. O *LIXI* apresentou alta sensibilidade e resolução compatíveis ao *Magnetically Focused Image Intensifier Tube*, mas com a desvantagem de apresentar uma área de imageamento relativamente pequena, de aproximadamente 2”.

Em 1992, para o desenvolvimento do sistema neutrongráfico em tempo real, F. Casali, P. Chirco, A. Festinesi, A. Garagnani, P. Parteni e R. Rosa utilizam como fonte o Reator Triga do *Consigliol of Ricerca Sperimentale (C.R.E.)* em Roma, dispondo de um fluxo de nêutrons no plano da imagem, de $1,4 \cdot 10^6 n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, uma razão de colimação, L/D , de 30 e uma razão de cádmio de 4. O SEI era constituído de uma placa cintiladora, sendo testadas a NE-426, por produzir uma maior taxa de emissão de luz, e, depois, a NE-905, por proporcionar uma maior resolução espacial; um espelho montado a 45^0 para refletir a imagem em direção à câmera CCD, fabricada pela *Santa Barbara Instrumentation Group*, modelo ST4, acoplada a lentes *Canon* com Zoom $f = 100 - 200mm$ e sistema de refrigeração da *Texas Nuclear*. Alternativamente foram realizados testes com uma câmera fotográfica comum, com filme *Kodak*. O sinal de

vídeo gerado pela câmera CCD foi enviado a um micro-computador através de uma interface. Um programa processa as imagens com 256 níveis de cinza e as gravou em formato TIFF. Para os testes realizados com a câmera *Ricoh* o tempo de exposição foi de 190 minutos, enquanto que com a câmera CCD, o tempo variou de 1 a 10 minutos [14].

Em 1994, J. Hofmann e C. Rausch, testaram o desempenho de um protótipo de detetor de nêutron térmico sensível a posição, telas preparadas com material luminescente de ZnS :Ag e conversor a base de Gd₂O₃ [45].

Em 1995, F. Casali, P. Chirco, M. Zanarini, relataram os avanços das técnicas de imageamento com nêutrons. Descreveram as técnicas de ensaios com nêutrons, Neutronografia e Tomografia, dando grande ênfase aos SEI, em termos dos princípios de funcionamento de cada um de seus componentes e das formas existentes de se qualificar as imagens [27].

Um ano mais tarde, V.R. Crispim utilizou a técnica nêutronográfica na realização de END, tendo como fonte de nêutrons o reator de pesquisa Argonauta do IEN/CNEN [12].

Ainda em 1996, a fonte de nêutrons usada por A. Sinha, B. D. Bhawe e C. G. Panchal consistia de um pequeno irradiador composto de fonte de Pu-Be com moderador de polietileno e a blindagem de parafina borada. A fluência obtida era de $2 \cdot 10^7 n \cdot s^{-1}$, para uma razão de colimação, L/D , de 10 e uma razão de cádmio de 2,5. O SEI utilizava o cintilador NE-426, com acoplamento óptico através de lentes e fibra ótica. O sinal de vídeo era enviado a um micro-computador para digitalização das imagens (8 bits), execução das funções de integração e equalização das imagens. Concluíram que era possível se obter Neutronografias de boa qualidade em poucos minutos, de 10 a 12 minutos, sendo possível distinguir falhas de até 2 mm. J.J.G. Silva obteve resultados bastante relevantes na detecção de: 1) corrosões ocultas na liga de alumínio AA7075 utilizadas em aeronaves; 2) impurezas espalhadoras e absorvedoras de nêutrons em aço e lucite; 3) microfissuras em concreto de alta resistência; 4) materiais radioativos, explosivos, inclusões metálicas e hidrogenadas ocultas por invólucros metálicos de altas densidades atômicas. Concluíram que, apesar dos bons resultados, ainda eram esperados avanços tecnológicos, no que concerne: à implantação de um sistema transportável de nêutrons térmicos capaz de viabilizar a realização dos ensaios neutronográficos no local da irradiação; ao desenvolvimento de um sistema

neutronográfico em tempo real; e à construção de uma câmera neutronográfica portátil [22].

Um ano depois, J.S. Brenizer, H. Berger, C.T. Stebbings e G.T. Gillies, escreveram sobre o desempenho e as características de telas cintiladoras utilizadas num SEI com a técnica nêutronográfica [30]. Nesse trabalho, destacaram a importância da técnica nêutronográfica e de suas aplicações e a necessidade de se trabalhar com um sistema de irradiação de nêutrons transportável, já que muitas vezes não é possível levar o objeto a ser inspecionado até um reator. Os arranjos neutronográficos experimentais analisados foram: 1) o reator UVAR da Virginia – EUA, com intensidade de feixe de $1,6 \cdot 10^6 n \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$, razão de colimação L/D de 40; 2) um irradiador com fonte de Pu-Be de 5 Ci que emite aproximadamente $5 \cdot 10^6 n \cdot s^{-1}$; 3) outro irradiador com uma fonte de ^{252}Cf emitindo cerca de $6,8 \cdot 10^9 n \cdot s^{-1}$. Todos foram montados em caixas à prova de luz. As câmeras foram montadas a 90^0 , em relação ao feixe de nêutrons, e um espelho a 45^0 refletia a imagem do cintilador em direção à câmera. Os ensaios foram realizados para cada fonte de nêutrons, com diferentes cintiladores. O tempo de exposição foi determinado em função da intensidade do feixe de cada fonte. As respostas dos SEI, relativas às diferentes telas cintiladoras utilizadas, foram comparadas em função do nível de enegrecimento (nível de cinza) em cada elemento de figura (pixel), desvio padrão e fator de eficiência quântica (QE), para reator UVAR, e do nível de cinza, para as fontes de Pu-Be e ^{252}Cf .

No ano, seguinte, H. Rahmanian e J.I.W. Watterson publicaram um trabalho com a utilização do sulfeto de zinco dopado com prata, com granulação de $20\mu\text{m}$ em cintiladores para nêutrons rápidos, utilizando câmera CCD e um intensificador de imagem, sendo que, com objetivo de reduzir perdas, realizaram um acoplamento com fibras óticas [40].

Em 2000, M. O. de Menezes desenvolveu um sistema neutronográfico em tempo real, que foi instalado em um dos canais de irradiação do reator IEA-R1 do IPEN [4]. Neste sistema, foram utilizados uma tela conversora de $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$, 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, no qual as imagens obtidas foram processadas, mediante emprego de um programa computacional específico. Os parâmetros neutronográficos usados foram: fluxo de nêutrons de $1 \cdot 10^6 n \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$, razão L/D de 70, e razão n/γ de aproximadamente $10^6 n \cdot cm^2 \cdot m$ e

energia efetiva dos nêutrons de 7 meV . O objetivo deste trabalho foi obter imagens em tempo real e demonstrar a viabilidade do sistema para realizar tanto ensaios estáticos como dinâmicos. Como resultado foi obtido um valor médio de sensibilidade de $0,07 \text{ cm}$ para o *lucite*; resolução de $440 \text{ }\mu\text{m}$ e uma modulação de 90% , obtida através da MTF que correspondia a frequência espacial de $0,3 \text{ linhas/mm}$.

Em 2000, S. Koerner, E. Lehmann e P. Vontobel realizaram ensaios nêutronográficos para o desenvolvimento e otimização de um SEI com câmeras CCD, utilizando uma tela cintiladora sensível a nêutrons, um espelho refletor e uma câmera CCD [27]. Os primeiros testes serviram para qualificar o SEI, comparando os diversos componentes e levantando as propriedades de cada um, até obter o melhor resultado. O cintilador utilizado foi fabricado por *Levy Hill* ($\text{ZnS(Ag)}^6\text{LiF}$). O detector utilizado demonstrou ter excelente linearidade e sensibilidade. As exposições com o arranjo foram de 10 segundos para cada imagem, sendo necessárias de 1 a 2 horas para se obter uma tomografia completa.

Dois anos mais tarde, H. Kobayashi, I. Kobayashi, M. Satoh e H. Morishima divulgaram um estudo sobre um material óptico estimulador de luminescência usado em telas cintiladoras de sistemas de imageamento [26]. Testes com diversos materiais foram realizados através da deposição de pó de Gd_2O_3 em folha de plástico com $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$, com o objetivo de melhorar a dependência da sensibilidade com a temperatura e os efeitos de fadiga, sendo obtidas imagens nêutronográficas de boa sensibilidade, linearidade, e como principal resultado desse trabalho, um grande aumento da estabilidade térmica dos materiais utilizados. Esse tipo de material já está sendo comercializado pela *Fuji Photo Co.*

No mesmo ano, A. I. Popov, D. A. A. Myles, F. Dauvergne e C. Wilkinson desenvolveram uma técnica de deposição de fósforo em placas de imageamento com nêutrons [28], que consistia de um filme onde era disperso um fino depósito de cristais de fósforo (ex. BaFBr:Eu^{2+}) em uma fita orgânica (suporte plástico). Durante a irradiação, os íons de fósforo eram excitados e posteriormente, ao serem excitados pela luz visível, produzem um efeito luminescente. Como essa imagem podia ser apagada por exposição intensa de luz, a placa de imageamento podia ser reutilizada. Através da mistura de Gd_2O_3 , o depósito de fósforo pode ser sensibilizado por nêutrons térmicos.

E, K. Mochiki, Y. Ikedo, Y. Murata, K. Nittoh e C. Konagai divulgaram o desenvolvimento de um novo cintilador para a *Toshiba Co.* [29]. Um cintilador de Gd_2O_2S foi dopado com európio. Verificaram que este novo cintilador emitia principalmente fótons luminosos característicos da região do vermelho. Os primeiros resultados obtidos mostraram, pelo espectro de intensidade de luz emitida, que a componente vermelha era mais intensa, tendo um brilho maior do que o das outras componentes (verde e azul), sendo apropriada para visualização de materiais com alta absorção de nêutrons. A segunda componente com maior intensidade era a componente verde, sendo mais apropriada para a visualização de materiais com média probabilidade de absorção de nêutrons. A componente azul, que apresentou menor intensidade, era a mais apropriada para visualização de materiais com baixa probabilidade de absorção de nêutrons. Para se discriminar as componentes de diferentes comprimentos de onda presentes na mesma imagem, isto é, vermelha, verde e azul foram utilizadas técnicas de processamento digital.

Ainda neste ano, S. Srisatit, A. Pattarasumunt, P. Siritiprussamee e N. Ratanapirojkajee adaptaram um arranjo nêutronográfico com um SEI para obtenção de tomografias computadorizadas [30]. A primeira parte do equipamento era composta de um sistema neutronográfico com SEI e um dispositivo de rotação dotado de controle remoto. A segunda parte consistia de um vídeo cassete para gravar de imagem, de um monitor e um micro-computador com placa para captura de vídeo. Além desse grupo, H. Asano, N. Takenada, T. Fujii, E. Nakamatsu, Y. Tagami e K. Takeshima publicaram um artigo científico sobre aplicação de arranjos nêutronográficos com SEI, para fins de análise sobre a distribuição da fração de vazio em cruzamento seccional de fluxo bifásico líquido-gás [31].

Por outro lado K. Kato e Y. Ikeda estudaram a influência dos nêutrons espalhados e dos raios- γ nas imagens obtidas com arranjos neutronográficos com SEI [14]. A influência dos nêutrons espalhados e dos raios- γ emitidos pelos objetos inspecionados e pela blindagem revelou-se significativa, sendo a principal causa de sombreamento nas imagens neutronográficas. Nesse caso, os raios espalhados foram detectados por vários materiais expostos, mediante o uso de telas conversoras. Para determinar essa influência, foram realizados vários testes com diversos materiais espalhadores, sendo que, no arranjo, a tela cintiladora foi posicionada entre os nêutrons emergentes e o

objeto, com a face sensível voltada para o feixe de nêutrons espalhados e de raios- γ . Os melhores resultados foram obtidos para 4 *mm* de espessura de água.

No ano seguinte, F. J. O. Ferreira, apresentou em sua dissertação de mestrado, um estudo sobre a implantação de um sistema eletrônico para aquisição de imagens neutronográficas no reator Argonauta do IEN/CNEN. O trabalho tem como objetivo estudar as características de um sistema neutronográfico utilizando um dispositivo eletrônico de obtenção de imagens, para sua implementação no canal de irradiação J-9, [20].

No mesmo ano Masahito Matsubayashi e sua equipe desenvolveram um conversor para nêutrons rápidos, utilizando fibras óticas como guias de ondas e dessa maneira reduzir as perdas por espalhamento que poderia ocorrer entre a tela cintiladora e o câmara, usaram telas conversoras confeccionadas com uma mistura de um polipropileno com material fluorescente na razão de 50 % [36].

Em 2005, C. T. S. Lima, em sua dissertação de mestrado apresentou um estudo sobre uma tela conversora nacional de gadolínio para Neutronografia. Foram confeccionadas quatro telas conversoras, usando processos diferentes, deposição por evaporação e deposição jateada. Uma comparação entre a imagem neutronográfica de objetos de referência obtida com a tela conversora nacional e com a importada foi realizada, em termos do parâmetro de resolução gráfica. Concluiu-se que a metodologia de deposição jateada adotadas demonstrou ser viável e que a tela conversora nacional tem menor custo de fabricação[3].

Neste ano E. C. Silva, N. M. Khaidukov, V. N. Makhov, M. S. Nogueira e L. O. Faria, realizaram vários testes com diferentes percentuais de dopagem, variando de 0,2% a 10%, em materiais luminescentes, usados em TL e aplicações em imagens digitais termoluminescentes, desse foi retirado o percentual médio de 5%, usado na dissertação [34].

O trabalho mais recente, em 2007, de I. Shestakova, V. Gaysinskiy, J. Antal, L. Bobek e V. V. Nagarkar, utilizam o Gd_2O_3 na confecção de um protótipo de uma tela cintiladora para neutronografia e para sistemas de imageamento em tempo real. Consistindo em uma camada de CsI:Tl, colada entre duas películas do conversor de gadolínio [37].

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

II. 1 – O nêutron

Niels Bohr e Ernest Rutherford propõem à existência de uma nova partícula no núcleo atômico cuja massa fosse muito próxima à massa do próton e cuja carga elétrica fosse nula [11].

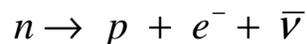
Em 1930, Walther Bothe observa a presença de uma radiação desconhecida e altamente penetrante, ao bombardear um alvo de berílio com partículas alfas.

A reação nuclear é:



Dois anos mais tarde, o mesmo laboratório retornou a pesquisa em busca do nêutron, sob a dedicação do físico James Chadwick, que, no mesmo ano, estudando a radiação observada por Bothe, provou que ela consistia na verdade um fluxo de partículas de massa muito próxima à do próton, sendo eletricamente neutra, a essa partícula foi cunhado o nome “nêutron” [11]. Em 1934, Enrico Fermi foi o primeiro físico a usar nêutrons como projéteis nucleares.

Cabe observar aqui, que o nêutron só se mantém estável quando confinado no núcleo atômico. Como partícula livre, ele apresenta um tempo de vida de 12,8 minutos, decaindo, posteriormente, em um próton, com a emissão de um elétron e um antineutrino:



II.1.1 – Interação dos nêutrons com a matéria

Os nêutrons, por não possuírem carga, podem viajar muitos centímetros através da matéria, sem causar qualquer tipo de interação e ser totalmente invisível aos detectores mais comuns.

Quando os nêutrons interagem com os núcleos de um material absorvedor, podem ser absorvidos por eles, que ficarão em um estado excitado e decairão emitindo radiações secundárias., ou poderão mudar suas direções e energias.

Os tipos de interações dos nêutrons com os núcleos dependem de sua energia inicial. Para nêutrons lentos (abaixo de 0,5 eV), as interações incluem espalhamento elástico com os núcleos e um grande número de reações nucleares. Devido à sua baixa energia, os nêutrons eventualmente entram em equilíbrio térmico com o absorvedor, tornando-se nêutrons térmicos, com uma energia média de 0,025 eV.

Se a energia do nêutron for suficientemente grande, acontece espalhamento inelástico com o núcleo, que recua e passa a um estado excitado. Posteriormente, o núcleo desexcita, em geral, emitindo radiação gama secundária. Com as perdas de energia em sucessivos choques inelásticos o nêutron torna-se lento ou térmico [32].

Os dois principais mecanismos de interação do nêutron com a matéria são o espalhamento e absorção [13].

Em um espalhamento elástico (n,n), o núcleo com o qual o nêutron interagiu não tem sua estrutura alterada, ocorrendo apenas uma simples transferência de energia cinética e de momento linear. Um outro nêutron aparece e o núcleo se mantém em seu estado fundamental. Essa interação é análoga ao de uma colisão entre duas esferas rígidas.

No processo de absorção, o núcleo captura o nêutron e sofre alteração. Não há conservação de energia cinética, sendo uma fração dela responsável pelo estado excitado do núcleo formado, denominado núcleo composto, que, ao retornar ao seu estado fundamental, proporciona a ocorrência de vários fenômenos, sendo os principais: espalhamento inelástico, captura radioativa e fissão nuclear.

A probabilidade de ocorrência de uma reação nuclear é medida por grandezas chamadas, seções de choque. O conceito de seção de choque microscópica (σ) é fundamental, podendo-se entendê-la, classicamente, como uma medida da fração da área do núcleo atômico disponibilizada para ser atingida por uma partícula incidente e possibilitar que uma reação nuclear ocorra.

Um fator preponderante no processo de interação dos nêutrons com a matéria é a energia dos nêutrons, uma vez que, a probabilidade de ocorrer um certo tipo de interação, depende dela.

Tabela II. 1 - Classificação dos nêutrons quanto à energia [12]

Classe	Energia (eV)	Subclasse	Energia (eV)	Observação
Lentos	$0 < E < 10^3$	Frios	$0 < E < 2 \times 10^{-3}$	Pode atingir a rede cristalina dos materiais
		Térmicos	$E \sim 0,025$	Distribuição maxwelliana
		Epitérmicos	$0,1 < E < 10^3$	Fase de ressonância
Intermediários	$10^2 < E < 5 \times 10^5$			
Rápidos	$10^5 < E < 5 \times 10^7$			
Muito Rápidos	$10^7 < E < 2 \times 10^7$			
Relativísticos	$E > 10^7$			

II.1.2 – Atenuação dos nêutron

Um feixe de nêutrons pode ser atenuado por mecanismos de absorção ou de espalhamento, cujo efeito resultante é caracterizado pela seção de choque total. O valor da seção de choque depende da energia do nêutron incidente e da estrutura nuclear do núcleo alvo. Para muitos núcleos, a seção de choque de absorção é inversamente proporcional à velocidade do nêutron (v), lei $1/v$, para baixas energias. Em certos valores de energia, aparecem picos de absorção, causados por ressonâncias que ocorrem quando a energia do nêutron incidente é igual a um nível particular de energia do núcleo alvo [6].

Observa-se experimentalmente, para feixes estreitos e bem colimados, que a intensidade, de nêutrons incidentes com energia E , I_0 ao penetrar num meio com espessura t , decai exponencialmente [1] para $I(t)$, intensidade de nêutrons transmitidos pelo material, conforme mostra a Figura II.1 , segundo a relação :

$$\frac{I(t)}{I_0} = e^{-\Sigma_{total} t} \quad (II.1)$$

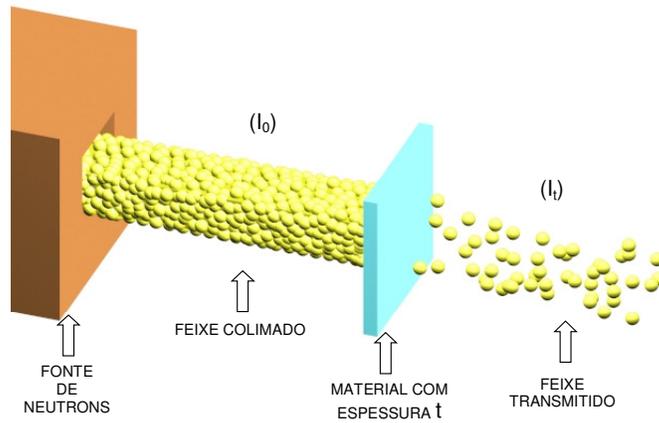


Figura II.1 – Feixe de nêutrons ultrapassando um material com espessura t

A relação de atenuação de nêutrons em termos do conceito de fluxo de nêutrons pode ser encontrada em vários livros sobre Física Nuclear, dentre os quais as referências [2][5], conforme a Figura II.1.

Pode-se medir a probabilidade de atenuação dos raios X e dos nêutrons térmicos, quando essas radiações interagem com a matéria, pelos coeficientes de atenuação em massa correspondentes, expressos em cm^2/g . Os nêutrons podem ser atenuados por materiais leves, penetrar materiais pesados, além de distinguir isótopos de um mesmo elemento, enquanto a atenuação dos raios X aumenta continuamente com o número atômico do material conforme mostra a Figura II.2.

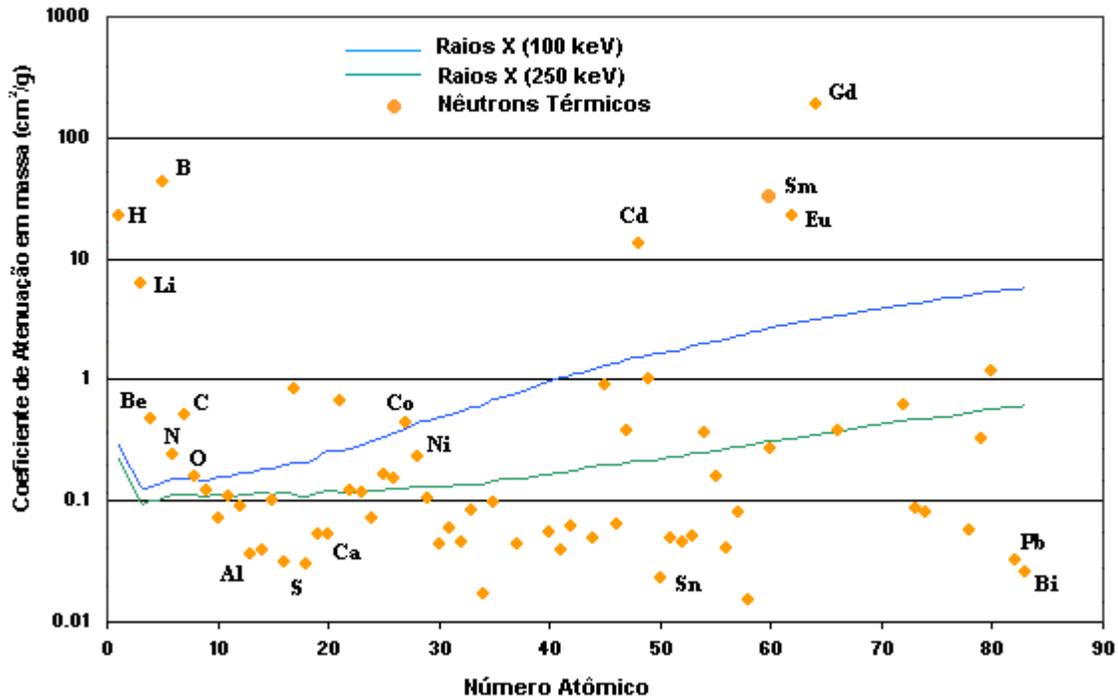


Figura II.2 – Coeficiente de atenuação de massa de alguns elementos para nêutrons térmicos e raios x [10].

II.2 – Fontes de nêutrons

As principais fontes de nêutrons decorrem de reações nucleares, ocorridas em reatores nucleares, aceleradores de partículas, fontes isotópicas e fontes fotoneutrônicas, que produzem nêutrons, através de reações do tipo $X(\gamma, n)Y$, como, por exemplo, as reações $Be^9(\gamma, n)Be^8$ e $H^2(\gamma, n)H^1$. As vantagens associadas a utilização das fontes fotoneutrônicas são: a independência no uso de substâncias radioativas naturais e o fato delas produzirem feixes monoenergéticos.

II.3 – Neutronografia

A história da Neutronografia se iniciou em 1935, com os alemães *Kallman* e *Khun*, que utilizando nêutrons provenientes de um acelerador, obtiveram as primeiras imagens neutronográficas. A qualidade das imagens obtidas não resultou boa, pois o feixe neutrônico utilizado era de baixa intensidade e mal definido, e, conseqüentemente,

exigia horas de exposição. Na mesma época outro cientista chamado *Peter*, também alemão, produziu neutronografias de melhor qualidade, com poucos minutos de exposição, utilizando aceleradores que forneciam feixes mais intensos [10].

Com o desenvolvimento dos reatores nucleares, a intensidade dos fluxos neutrônicos de interesse aumentaram em muitas ordens de grandeza, sendo atribuído a *Thewlis* e *Derbyshire* a primeira utilização de um feixe de nêutrons proveniente de um reator, para produzir uma Neutronografia. Entretanto, somente a partir de 1960, surgiu, efetivamente, um feixe apropriado de nêutrons. Ele resultou do desenvolvimento de um extenso programa mundial para a construção de reatores de pesquisa com alto fluxo neutrônico, propiciando a proliferação de várias unidades neutronográficas, e conseqüentemente, diversos ensaios não destrutivos. Em 1962, foi desenvolvido, no *Argonne National Laboratory* (ANL), um método para inspeção não destrutiva de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares. Em 1963, *Berger* demonstrou, experimentalmente, os métodos de formação de *imagens* neutronográficas. Em 1970, tanto nos Estados Unidos, como em alguns países europeus, a maioria dos Centros de pesquisa possuía unidades e indivíduos capacitados para realizar e interpretar Neutronografias. Para facilitar o progresso da técnica, tornaram-se claramente necessárias uma coordenação e uma padronização. Revisões do assunto ocorreram em *Birmingham*, Inglaterra, em 1973, e em *Gaithersburg*, Estados Unidos, em 1975. Nesse mesmo ano, *Tyuyakov* e *Shtan* publicaram um trabalho sobre os princípios básicos da Neutronografia. Em 1979, deu-se a formação do Grupo de Trabalho sobre Neutronografias, com a tutela da Comissão das Comunidades Européias. Em 1981, o Grupo publicou o Manual da Radiografia com Nêutrons e, em 1984, um atlas sobre os defeitos detectados em combustível de reatores. *Harms* e *Wyman* publicaram, em 1986, um livro sobre os fundamentos matemáticos e físicos da Neutronografia e *Domanus* [10] publicou dois livros: um sobre colimadores para radiografias com neutrons térmicos 1987 e o outro em 1992 sobre os fundamentos da Neutronografia.

Na década de 90, foram realizadas três Conferências Mundiais sobre Neutronografia: a quarta, nos Estados Unidos (1992); a quinta, na Alemanha (1996) e a sexta, em Osaka, no Japão (1999). Nessas conferências foram apresentados, entre outros, trabalhos relacionados às áreas de reatores e instalações nucleares, fontes de nêutrons de pequeno porte, detectores de nêutrons, métodos com filmes radiográficos, processamento de imagens, aplicações em tempo real, aplicações nucleares, aplicações

industriais, aplicações biológicas e ciências médicas, aplicações aeroespaciais, tomografia e padronização.

II.3.1 – Principais Componentes

Os três principais componentes envolvidos em uma Neutronografia são: a) um feixe de nêutrons apropriado; b) o objeto a ser neutrongrafado; c) um dispositivo para detectar, prontamente ou lentamente, a radiação secundária gerada através da interação do fluxo neutrônico modulado pelo objeto com o conversor de nêutrons, registrada num filme radiográfico, conforme mostra a Figura II.3.

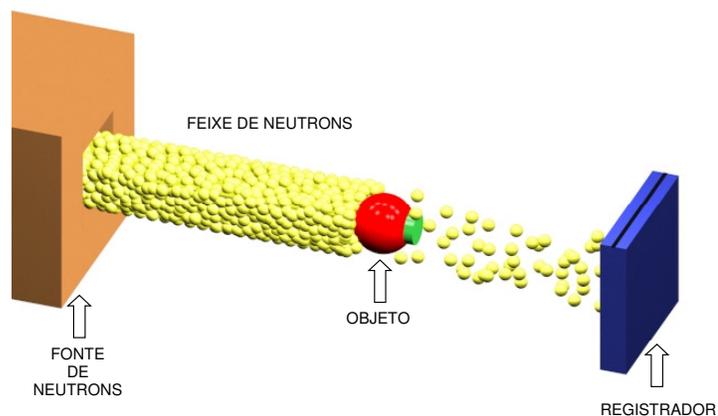


Figura II.3 – Principais componentes de uma NR para objeto não radioativo.

II. 3. 2 – Otimização do sistema Neutronográfico

Alguns fatores podem influenciar a qualidade de uma neutrongrafia, a saber:

- Moderação dos nêutrons

As fontes de nêutrons produzem nêutrons rápidos, que devem ser termalizados, para fins de inspeção neutrongráfica com nêutrons térmicos, por meio de colisões com núcleos de um material moderador de baixo número atômico, Z . Os nêutrons térmicos são aqueles que atingem o equilíbrio térmico com os átomos e moléculas do meio, com

velocidades que seguem uma distribuição maxwelliana , cuja a energia mais provável ocorre em torno de 25 meV [5].

- Colimação do feixe de neutrônico

Os nêutrons emitidos pelas fontes difundem-se aleatoriamente, segundo uma geometria 4π radianos, até o moderador onde podem sofrer espalhamento e seguir diversas direções. Para fins de ensaios neutrongráficos, torna-se necessária a extração de feixes alinhados em canais de irradiação, onde se instalam colimadores que irão conduzir os nêutrons térmicos até o plano de irradiação das amostras. Os colimadores são construídos com materiais que apresentam uma relação Σ_a / Σ_s baixa. A colimação visa melhorar a qualidade das imagens neutrongráficas de objetos espessos.

O colimador define a forma do feixe e se caracteriza por sua divergência angular e razão de colimação. O dispositivo mais comum de colimação consiste da extração de um feixe divergente no interior do volume moderador, possibilitando ampliar a área da imagem radiográfica. A razão de colimação é definida pela razão $L/D = \alpha$, onde D é o diâmetro de abertura na entrada do colimador e L , a distância entre aquela abertura e o plano de detecção da imagem.

A razão de colimação determina o fluxo de nêutrons que interage com o objeto, ϕ_{ob} . Se a abertura na saída for circular, ϕ_{ob} pode ser expresso, em primeira aproximação, por [10]:

$$\phi_{ob} = \phi_f \frac{\alpha^2}{16} e^{-\Sigma_g L} \quad (\text{II.2})$$

e, sendo quadrada, por:

$$\phi_{ob} = \phi_f \frac{\alpha^2}{4\pi} e^{-\Sigma_g L} \quad (\text{II.3})$$

onde:

ϕ_f é o fluxo de nêutrons na entrada do colimador;

Σ_g é a seção de choque macroscópica do gás contido no interior do colimador.

- Filtros para raios γ

Inerentes ao feixe neutrônico encontram-se os raios γ , que podem ser oriundos das reações primárias de produção de nêutrons ou das reações secundárias ocorridas nos materiais estruturais do arranjo. Eles deterioram a qualidade da imagem radiográfica [14], visto que alguns sistemas de imageamento são sensíveis aos raios- γ . Para atenuá-los, empregam-se filtros acoplados aos colimadores. Esses filtros têm a função de absorver os raios γ e, ao mesmo tempo, atenuar, o mínimo possível, a intensidade de nêutrons do feixe. Os materiais mais usados são o chumbo e o bismuto, que possuem alto coeficiente de absorção de massa para raios γ e baixa seção de choque de absorção e espalhamento de nêutrons térmicos.

Os filtros, embora empregados, em primeira instância, para atenuar os raios- γ , também provocam o deslocamento do espectro de energia dos nêutrons. Essa mudança altera a transmissão o feixe através dos materiais e, em geral, melhora a qualidade de imagem neutrongráfica [4]. O valor desejável da razão n/γ varia com a técnica de imageamento selecionada, mas, normalmente, são recomendados valores da ordem de $10^5 n. cm^{-2}. mR^{-1}$ [21].

- Blindagem para nêutrons e radiação gama

Com o intuito de aumentar a segurança do arranjo experimental em termos de proteção radiológica, são utilizadas blindagens compostas por materiais moderadores e absorvedores de nêutrons, com alto coeficiente de atenuação para raios γ .

Nêutrons e raios γ emitidos pelos materiais (dos objetos inspecionados, da blindagem e do próprio arranjo neutrongráfico) produzem sombras (fantasmas) nas imagens neutrongráficas. Nessa situação, os nêutrons e os raios γ espalhados são detectados pelos materiais cintiladores das telas e pelo chip-CCD das câmeras de vídeo. Para esses casos, estão sendo estudadas medidas para atenuar os efeitos que degradam a qualidade do ensaio. Para diminuir o efeito causado no chip-CCD, é conveniente se afastar a câmera o máximo possível do feixe, levando em conta a distância focal do equipamento, e utilizar espelhos que refletem os fótons de luz pela cintiladora, em sua direção. Bons resultados tem sido alcançados com a aplicação de blindagens adicionais, utilizando placas de estanho, chumbo, parafina ou água [14].

II. 3. 3 – Neutronografia com filmes Radiográficos

Obtém-se uma radiografia típica ao se usar como registrador de imagem uma folha conversora de material apropriado, em contato íntimo com um filme radiográfico, em um dispositivo à prova de luz (chassi). A folha do material conversor é necessária, porque os nêutrons, por serem radiações particuladas não ionizantes, praticamente não produzem um efeito direto sobre o filme radiográfico.

Um feixe de nêutrons que incide sobre uma amostra em inspeção será atenuado de acordo com as propriedades de transmissão do material que a constitui. O feixe emergente atravessa a emulsão do filme praticamente sem sofrer atenuação e, pelo processo de captura, é fortemente atenuado pelo material conversor. Ao absorverem nêutrons térmicos, os núcleos do material conversor emitem radiações que são espalhadas isotropicamente e formam uma imagem latente no filme, conforme ilustra a Figura II.4.

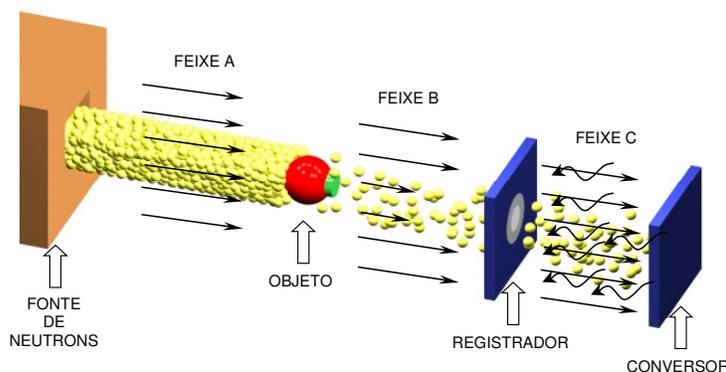


Figura II.4 – Princípio básico da técnica neutronográfica utilizando filme radiográfico como registrador de imagem.

- Conversores de nêutrons

Esse material é empregado com a finalidade de absorver os nêutrons incidentes com alta eficiência e, posteriormente, emitir uma radiação secundária capaz de sensibilizar um material registrador. Os materiais conversores podem ser de dois tipos: os de pronta emissão e os radioativos. No método direto, são utilizados os conversores de pronta emissão, isto é, que emitem uma radiação secundária imediatamente, tais

como o lítio, o boro, o cádmio e o gadolínio, sendo esse último o que tem produzido melhores resultados em Neutrongrafia com nêutrons térmicos, devido a sua alta seção de choque. Algumas características do gadolínio podem ser observadas na Tabela II.2. No método indireto, faz-se uso da radioatividade induzida em certos materiais, tais como o disprósio, o ródio, o índio e o ouro.

Tabela II.2 – Características dos isótopos de gadolínio para a conversão de neutrons térmicos em radiação secundária [3].

Ítems	Gd ¹⁵⁵	Gd ¹⁵⁷
Abundância isotrópica (%)	14,7	15,7
Reação	Gd ¹⁵⁵ (n,γ) Gd ¹⁵⁶	Gd ¹⁵⁷ (n,γ) Gd ¹⁵⁸
σ _a (E=25mev) (barns)	61.000	240.000
Partícula ionizante	e ⁻	e ⁻

- Filmes Radiográficos

O filme radiográfico é um elemento muito usado nos sistemas de registro de imagens. A estrutura de um filme radiográfico de emulsão simples é composta de camadas, a saber [10]:

- 1 – Película de gelatina para proteção contra marcas provocadas por ações mecânicas;
- 2 – camada de emulsão consistindo de pequeníssimos (0,1 μm a 3 μm) cristais de sal de prata;
- 3 – camada de substância agregante para melhorar a adesão da emulsão à base do filme;
- 4 – base do filme ou suporte, feita de triacetato de celulose;
- 5 – camada protetora para prevenir ondulações.

Quando o filme é exposto a radiação, os grãos de sal de prata absorvem energia e sofrem uma mudança física complexa. A energia absorvida pelos grãos produz neles íons de prata, chamados de centros de revelação. O conjunto desses grãos, que contém íons de prata, formam a imagem latente. Quando o filme é revelado, os íons de prata presentes nos grãos atingidos pela revelação são reduzidos à prata metálica, que dá origem ao escurecimento de partes do filme. Após a revelação, a imagem é fixada, por

remoção química dos grãos de sal que não contém íons de prata. Como os grãos de prata precipitados são opacos à luz visível, uma imagem em tons de cinza é obtida.

Os principais parâmetros que determinam as características de um filme são: o contraste radiográfico, a velocidade de aquisição da imagem latente e sua granulação.

II. 3. 4 – Formação da imagem no filme

Quando um filme é exposto à radiação ocorre a absorção de energia pelos grãos do sal de prata, que, conseqüentemente, sofrem uma mudança física complexa. Essa energia absorvida pelos grãos produz a quebra da ligação iônica do sal de prata, dando origem aos cátions de prata (Ag^+), chamados de centros de revelação. O conjunto desses grãos, que contém os cátions, forma a imagem latente. Quando o filme é revelado, os cátions Ag^+ presentes nos grãos atingidos pela radiação são reduzidos a prata metálica (Ag^0), que dá origem ao escurecimento de partes do filme. Após a revelação, a imagem é fixada, por remoção química dos grãos de sal que não contém íons de prata. Como os grãos de prata precipitada são muito opacos a luz visível, uma imagem em tons de cinza é obtida [12].

Definição de alguns parâmetros relevantes:

- Granulação

Chama-se granulação à impressão criada pelo agrupamento das pequenas partículas de sais de prata, visíveis pelo olho humano ou com ajuda de equipamentos óticos. Como a constituição dos filmes dependem da distribuição dessas partículas (grãos), o efeito de granulação pode ser entendido como um parâmetro característico de cada filme. Como a sensibilidade de um filme depende do tamanho dos grãos da emulsão, eles podem ser classificados, como rápidos e lentos. Os filmes rápidos possuem grãos de maiores dimensões e, conseqüentemente, apresentam uma maior granulação; quando se deseja observar com maior detalhe o objeto a ser radiografado, um filme lento deve ser escolhido, obviamente, porque possui menor granulação.

- Densidade Óptica

A densidade óptica é definida como uma medida do grau de enegrecimento da imagem formada no filme radiográfico, evidenciada pela presença de áreas claras e escuras (Figura II.4). Ela é expressa, matematicamente, como o quociente

entre o logaritmo da intensidade do feixe de luz incidente e a intensidade do feixe de luz transmitido, numa área particular do filme processado.

$$D = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (\text{II.4})$$

onde:

D é a densidade óptica;

I_0 é a intensidade do feixe de luz incidente;

I é a intensidade do feixe de luz transmitido.

Conclui-se, pela equação (II.9), que, quanto maior a densidade, mais enegrecido ficará o filme. A quantidade (I/I_0) , refere-se a fração do feixe de luz incidente que foi transmitida, conhecida como, Transmitância do filme radiográfico [10].

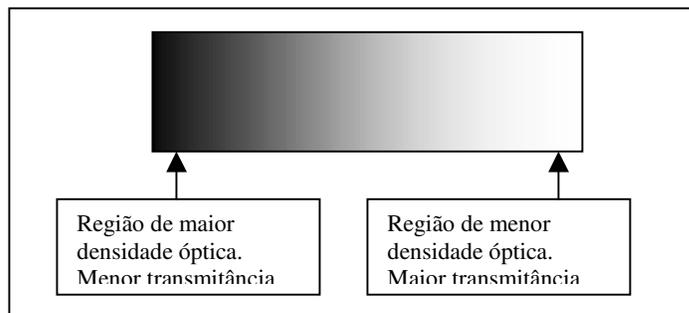


Figura II.5 – Densidade óptica e grau de enegrecimento de um filme radiográfico

- **Contraste radiográfico**

As variações de densidade de uma região para outra (área clara e área escura) ao longo do filme, são as responsáveis pela formação da imagem. A diferença na densidade entre essas regiões é denominada contraste radiográfico. Qualquer sombra ou detalhe na imagem é visível em razão do contraste entre elas e o plano de fundo das estruturas que a cerca. Dentro dos limites apropriados, quanto maior o contraste ou diferença de densidade na radiografia, mais detalhes da imagem sobressairão. Outra maneira de se

definir o contraste é pela capacidade do filme detectar intensidades e energias diferentes de radiação [9].

- Exposição Radiográfica (E)

Este parâmetro é definido como a medida da quantidade de radiação que atinge um filme e é dada pelo produto entre a intensidade do feixe de radiação, I , pelo tempo em que o filme fica exposto, t . Assim, para uma determinada intensidade de feixe, quanto maior o tempo de exposição, maior será a quantidade de radiação que atinge o filme, e, portanto, maior a densidade ótica desse filme [12].

$$E = I \cdot t \quad (\text{II.5})$$

- Velocidade de um filme radiográfico

Se dois filmes de granulações diferentes forem submetidos a uma mesma exposição, eles apresentarão diferentes densidades óticas. Isto significa que os tempos para atingir um determinado valor de densidade diferem entre si, sendo um mais veloz do que o outro. Então, a velocidade é uma característica própria de cada filme. Ela determina a quantidade de radiação necessária para produzir uma certa quantidade de prata na revelação. A velocidade depende, principalmente, do tamanho dos cristais de prata presentes na emulsão. Quanto maior o tamanho dos cristais, mais rápido será o filme e menos tempo de exposição será necessário para que ele registre uma dada densidade na imagem. Esses filmes são indicados, por exemplo, para inspeção de peças bastante espessas, pois reduz o tempo de exposição [9].

- Curva Característica de um filme radiográfico

A curva característica do filme radiográfico representa a resposta de um filme em densidade ótica ou em nível de cinza em função de sua exposição a um feixe de radiação. Ela é também conhecida como curva sensitométrica ou curva $H \times D$, iniciais de *Hurter* e *Driffield* (os primeiros a usá-las em 1890) [10]. A curva característica mostra como a densidade ótica resultante do filme varia com o logaritmo da exposição E . Elas são construídas submetendo-se o mesmo tipo de filme a um fluxo de nêutrons térmicos conhecido e tempos de exposição crescentes. Como se observa na

pela Figura II.6, no gráfico semilogarítmico, de D em função de E, inicialmente, a inclinação da curva característica aumenta com o crescimento da densidade (convergência); na região mais central, a relação entre os dois parâmetros é linear, e, para valores de densidades óticas acima de 2.0, a inclinação da curva tende a decrescer (ressalto) [10][15].

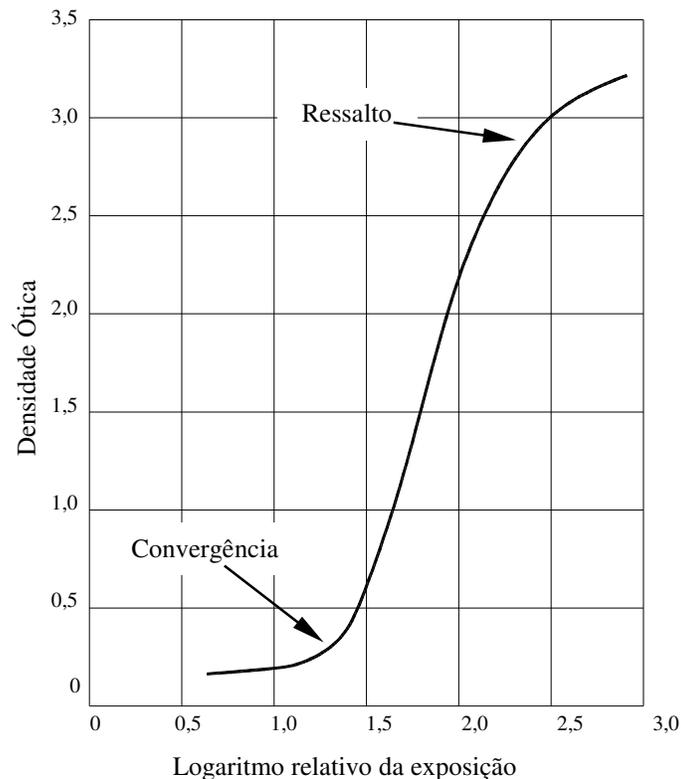


Figura II.6 – Curva característica de um típico filme radiográfico. [10]

Sendo, o contraste radiográfico entre duas áreas de uma Neutronografia dado pela diferença entre as densidades óticas nessas regiões, pode-se relacionar o comportamento da curva característica e o contraste radiográfico.

Distingue-se dois tipos de contraste: o contraste do objeto e o contraste do filme, que conjuntamente, contribuem de forma igualitária para o contraste neutronográfico. O contraste do objeto é a razão da absorção dos nêutrons através de duas regiões selecionadas do objeto. Ele depende da natureza do objeto, da energia do nêutron e do tipo de tela conversora usada, mas independe de outras variáveis de exposição tais como o tempo, as características do processamento do filme usado.

O contraste do filme refere-se a inclinação da curva característica do filme. Ele depende do tipo de filme, do processamento que ele é submetido e da densidade do filme. Uma vez que o formato da curva característica independe da maioria das variáveis neutronográficas, o contraste do filme pode ser considerado quase independente do contraste do objeto, embora, como mencionou-se anteriormente, ambos contribuam de uma forma igualitária para o contraste neutronográfico permitindo que uma área seja diferenciada de outra quando a Neutronografia é visualizada num negatoscópio (aparelho que facilita o exame de negativos e chapas radiográficas) [12].

Numa Neutronografia, duas imagens de regiões de absorção neutronográfica ligeiramente diferentes podem ser distinguidas devido somente ao contraste neutronográfico entre elas.

Mudanças na inclinação da curva característica e a visibilidade dos detalhes na neutronografia estão intimamente relacionadas. Considere-se, por exemplo, que um objeto a ser inspecionado apresente duas espessuras ligeiramente diferentes que transmitirão exposições ligeiramente diferentes ao filme. Essas exposições terão, portanto, uma certa diferença no logaritmo relativo da exposição entre eles. A diferença das densidades correspondentes a essas duas exposições dependerá de onde caírem na curva característica, isto é, quanto mais íngreme a curva, maior será a diferença de densidade. Isto significa que um certo intervalo do logaritmo relativo à exposição no meio da curva da Figura II.7 corresponderá a uma maior diferença de densidade do que o mesmo intervalo em qualquer uma das pontas.

Quando aplicada à curva característica de um filme radiográfico, a inclinação de tal linha reta é chamada gradiente do filme para aquela densidade particular [10].

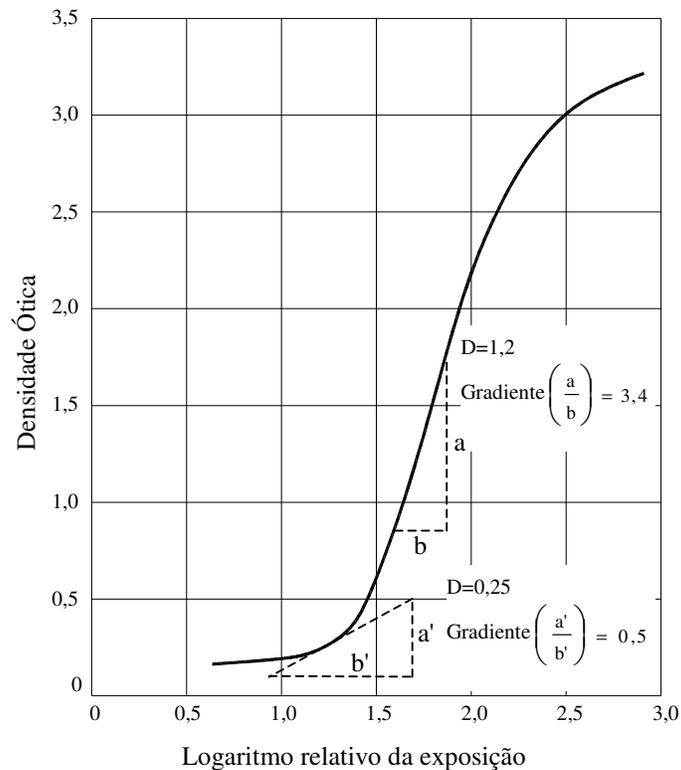


Figura II.7 – Curva característica de um sistema tela-filme radiográfico. O gradiente foi avaliado em dois pontos da curva.[10]

Em densidades para as quais o gradiente é maior que um, o filme atua como um amplificador de contraste e naquelas em que o gradiente é menor que um, os contrastes do objeto são menos aparentes na reprodução radiográfica [10].

O contraste do filme pode ser expresso pela grandeza, denominada Gama (γ), definida como o coeficiente angular da parte linear da curva característica.

II. 3.5 – Processamento dos Filmes Radiográficos

O processo de revelação do filme radiográfico é um dos fatores de maior importância para a obtenção de neutrografias de boa qualidade e reprodutibilidade. Tanto a velocidade relativa (definida como a razão entre a velocidade de um filme X e um filme Y, obtidas das suas curvas características, desde que em iguais condições de exposição e revelação) como o contraste do filme, crescem com o aumento do tempo de revelação, o que propicia o deslocamento da curva da característica para a esquerda e aumentando a sua curvatura.

O processo básico de revelação da imagem, é o químico. Ele transforma a imagem latente (invisível), formada durante a exposição do filme à radiação, numa imagem em tons de cinza, relacionados, as quantidades depositadas de prata metálica, de forma que represente, da maneira mais fiel possível, as estruturas do objeto inspecionado. O processo é composto de quatro etapas principais [12][9]:

- a) Revelação – é a fase na qual se dá a formação da imagem propriamente dita;
- b) Fixação – nesta fase os cristais que não foram fotoestimulados são dissolvidos e eliminados da camada de emulsão;
- c) Lavagem – os subprodutos de fixação e outras substâncias solúveis indesejáveis são retirados da camada de emulsão por meio de lavagem em água corrente e
- d) Secagem – finalizando o processo de revelação, o filme é submetido a secagem para a retirada da água remanescente.

Outros fatores muito importantes que contribuem, para a qualidade da imagem neutronográfica são as temperaturas do revelador e do fixador. Segundo a recomendação do fabricante, Kodak, para filmes usados em radiografias industriais, na temperatura de 20 graus centígrados, são necessários 5 minutos para a revelação da imagem, proporcionando os melhores resultados.

II. 3.6 – Resolução Espacial

A resolução da imagem pode ser entendida como o parâmetro que nos dá a qualidade da imagem. A resolução espacial neutronográfica de objetos estacionários, depende de dois fatores: um geométrico e outro, inerente ao sistema filme/conversor de nêutrons. O fator geométrico, deve-se à disposição geométrica do arranjo fonte/detector, sendo também conhecido como geometric unsharpness (U_g); aquele devido a separação objeto-conversor, usualmente chamado unsharpness inerente (U_i) ou unsharpness do filme é devido ao alcance e ao espalhamento da radiação pelo conversor. O fator devido ao conversor, conhecido unsharpness do conversor, U_d é devido à natureza isotrópica da radiação emitida, pois algumas partículas atingirão a emulsão do filme em um ângulo oblíquo e, portanto, sensibilizarão o filme a uma pequena distância lateral do lugar de origem no conversor. Este efeito é minimizado usando-se conversores finos.

Normalmente para o cálculo do unsharpness total utiliza-se a equação abaixo sugerida por Klasens, [38].

$$U = \left(U_g^3 + U_d^3 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.6})$$

II.3.7 – Indicadores de qualidade de imagem (IQI)

A avaliação da qualidade da imagem pode ser feita segundo aspectos qualitativos ou quantitativos. Ao se avaliar qualitativamente uma imagem radiográfica, recomenda-se o uso de Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI) construídos com um material similar ou igual ao da peça a ser inspecionada seguindo normas técnicas pré-estabelecidas por Associações responsáveis pela de padronização de processos, a se citar, American Society for Testing and Material (ASTM).

Evidentemente, para a avaliação da qualidade das imagens neutrongráficas, os IQI's foram pesquisados e, em 1975 a norma ASTM E545 estipulou o primeiro IQI padrão, tendo sido revisado em 1981 e em 1986.

A Norma ASTM E545-91 [17] propôs um método para a determinação da qualidade relativa de uma radiografia com nêutrons térmicos obtida pelo método direto com filmes argenteos de emulsão simples. Segundo esta Norma, a avaliação do nível da qualidade de uma imagem neutrongráfica poderia se basear, tanto na análise da imagem de um Indicador de Resolução Visual (IRV) ou penetrâmetro, em se tratando de um exame visual, como pelas imagens neutrongráficas de IQI que incluem um Indicador de Pureza de Feixe (IPF) e um Indicador de Sensibilidade (IS) [18], em forma de um escalonado, conforme ilustra a Figura II.8.c. O IPF, visto na Figura II.8.a, determina, quantitativamente, a qualidade da Neutronografia, que a enquadraria em diferentes categorias, e os I.S. fornecem qualitativamente, a sensibilidade do sistema em visualizar detalhes presentes na amostra. Logo, o julgamento da qualidade de uma Neutronografia tem por base a análise das imagens desses indicadores, que devem ser posicionados no mesmo plano da peça inspecionada.

A Norma ASTM E545-91 determina que o IPF seja projetado de forma a fornecer informações referentes ao feixe neutrônico e aos parâmetros inerentes ao

sistema de detecção da imagem, que contribuem para a exposição do registrador, e desse modo, afetam sua qualidade global.

Em termos de um exame visual, a resolução neutronográfica espacial é definida como sendo o menor espaço entre furos de menor diâmetro, visualizados num objeto de teste de teste como o que se observa na Figura II.8.b.

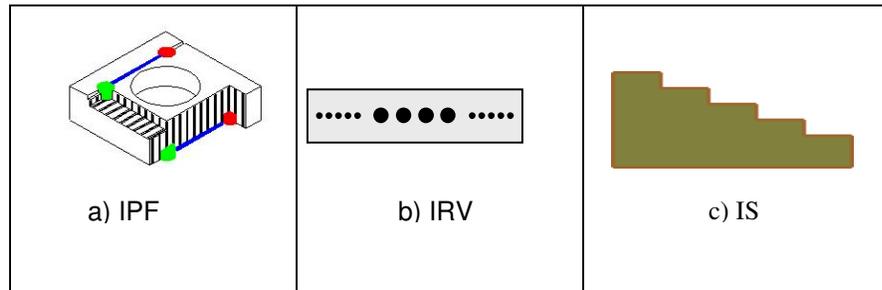


Figura II.8. Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI): IPF, IRV e IS.

. Detalhamento do IRV ou Penetrâmetro.

O IRV utilizado foi construído segundo os critérios estabelecidos pela ASTM [37], para a qualificação da imagem radiográfica, confeccionado em uma chapa de cádmio com 0,5 mm de espessura, com orifícios de 0,25 e 1,00 mm de diâmetro, espaçados com distância igual ao seu diâmetro, dispostos conforme é apresentado na Figura II.9.

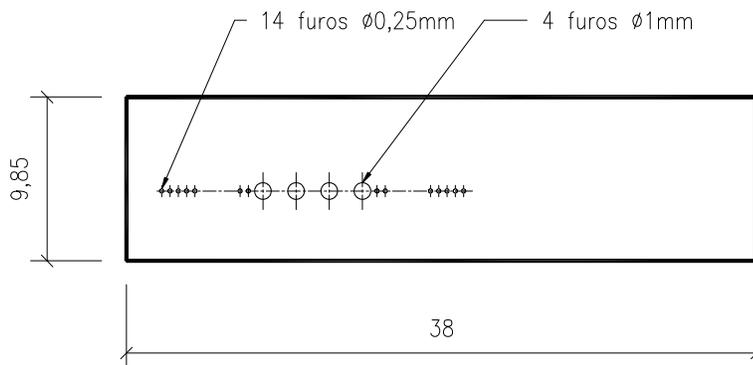


Figura II.9 – Indicador de Resolução Visual (IRV). Medidas em mm.

II.3.8 – Função da borda difusa

Função da borda difusa,ESF (Edge Spread Funcion),é a avaliação da resolução total do sistema de imageamento, que pode ser realizada pelo ajuste de uma função de distribuição de níveis de cinza na região de interface, entre a imagem de um material altamente absorvedor e a do feixe direto, dada por:

$$ESF = A + B \arctan (C x D) \quad (II.7)$$

onde:

A, B, C e D são parâmetros livres no ajuste, e x é a coordenada da varredura de níveis de cinza.

A resolução é dada pela largura total a meia altura (FWHM) da função ESF diferenciada, ajustada a uma distribuição de Lorentz a equação II.7, onde:

$$U_t = 2 / C \quad (II.8)$$

Na prática, a resolução do sistema de imageamento é obtida através da imagem do penetrâmetro. Após o, processamento da imagem, obtêm-se a distribuição dos níveis de cinza ao longo da região de borda entre o penetrâmetro e o feixe direto. A distribuição resultante deve ser ajustada, pelo método dos mínimos quadrados, à função ESF[38], conforme a equação II.7.

II.3.9 – Função transferência de modulação (MTF)

O emprego de Indicadores de Qualidade de Imagem e Indicadores de Pureza do Feixe como instrumentos de avaliação da capacidade de imageamento de uma neutrongrafia apresenta algumas limitações, uma vez que essa informações podem ser altamente dependentes do feixe constituinte e/ou apresentar uma natureza discreta. Um método mais adequado de medir a capacidade de resolução dos sistemas de imageamento é através da determinação da função de transferência de modulação (MTF). Essa função é definida como a razão entre o contraste registrado e o contraste ideal que deveria ser produzido em função da frequência de varredura espacial do objeto radiografado [4]. A MTF é uma reprodução gráfica da habilidade do sistema para reproduzir a frequência de varredura espacial presente na imagem e possui duas

importantes características: o julgamento do observador não interfere no resultado obtido e em um sistema de múltiplos componentes, a MTF total pode ser obtida pelo produto das MTF's dos componentes individuais, desde que eles sejam lineares e que suas MTF's possam ser determinadas independentemente.

Contrariamente a resolução, que representa uma função discreta de frequência espacial, a MTF é função contínua, onde são obtidas maiores quantidades de informações em relação ao desempenho e as limitações do sistema[19].

A modulação do sinal de resposta de um sistema de imageamento é um fator de fundamental importância na determinação da sua resolução espacial. Quando é possível se observar numa imagem a existência de um excelente contraste entre regiões opacas, produzidas por materiais absorvedores de radiação, e regiões transparentes devidas a materiais não absorvedores de radiação ou background do filme, a amplitude do sinal de resposta do sistema é pouco modulada. Em caso contrário, a frequência espacial aumenta e a amplitude do sinal de resposta do sistema de detecção sofre uma maior modulação. A modulação pode ser definida, em termos de nível de cinza por:

$$\text{MODULAÇÃO} = \frac{(\text{NC})_{\text{máximo}} - (\text{NC})_{\text{médio}}}{(\text{NC})_{\text{médio}}} \quad (\text{II.9})$$

onde, NC é o Nível de cinza.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Utilizou-se o feixe neutrônico provindo do canal de irradiação J-9 do reator nuclear Argonauta/IEN/CNEN, com um fluxo de nêutrons de energia em torno de 30 meV e da ordem de $4,46 \times 10^5 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, no plano da imagem. Como objeto de teste a ser neutrongrafado escolheu-se o Indicador de Resolução Visual (IRV) de cádmio, também denominado penetrâmetro. O sistema detector foi composto de uma chapa com filme radiográfico a uma tela conversora/cintiladora nacional, intercalados por uma folha de celulose transparente, todos acoplados intimamente dentro de um chassi radiográfico de alumínio.

Como mencionado no item II.3.3, as telas conversoras e cintiladoras são necessárias num arranjo neutrongráfico, pois possibilitam a sensibilização do filme radiográfico, pela radiação ionizante secundária, produto da reação entre nêutrons e núcleos que as constituem, assim gerando uma imagem. A escolha dos materiais para a confecção das telas conversoras cintiladoras recai naqueles que possuem uma alta seção de choque de absorção para nêutrons, σ_a , sendo que, em especial, os dois isótopos do gadolínio, Gd^{157} e Gd^{155} , apresentam os maiores valores, para nêutrons térmicos, $\sigma_a = 240000$ barns e $\sigma_a = 61000$ barns, respectivamente [3]. O gadolínio é um elemento pesado de terras raras e o conversor mais recomendado para Neutrongrafia pelo método direto de exposição, para nêutrons térmicos e frios [7].

Normalmente, em Neutrongrafia, usam-se telas conversoras metálicas, importadas, por um preço médio muito alto, conforme citado no item I.2 [3]. Entretanto, para os ensaios neutrongráficos em tempo real, as telas conversoras metálicas são substituídas por telas cintiladoras, normalmente, constituídas de compostos de gadolínio ou lítio com materiais cintiladores, tal como o ZnS, utilizado neste trabalho, que são depositados sobre uma base transparente, para que os fótons de luz gerados no processo sensibilizem um sensor (câmera CCD).

Neste trabalho, foram seguidas três metodologias para a obtenção de telas conversoras cintiladoras de nêutrons. Na primeira, seguiu-se um protocolo análogo ao adotado por Lima [3], constituído de uma base e uma parte mineral depositada. O material utilizado como base da tela foi uma folha de celulose, com 160 μm de espessura, tipo CG3460, fabricada pela empresa 3M sobre a qual foi depositada a

emulsão conversora cintiladora. Os componentes da emulsão foram: o enxofre e o zinco, na composição do sulfeto de zinco (ZnS) [8], dopado com prata (ZnS:Ag) a 5%[39]. A este composto adicionou-se um percentual de 50% de cloreto de gadolínio ($Gd Cl_3$) [35].

Após a secagem do composto, em estufa, por 24 horas, a uma temperatura de 100° , adicionou-se o material agregante, tinta esmalte incolor, bem diluído em acetona, sendo a mistura jateada, com o uso de uma pistola a ar comprimido, sobre a base.

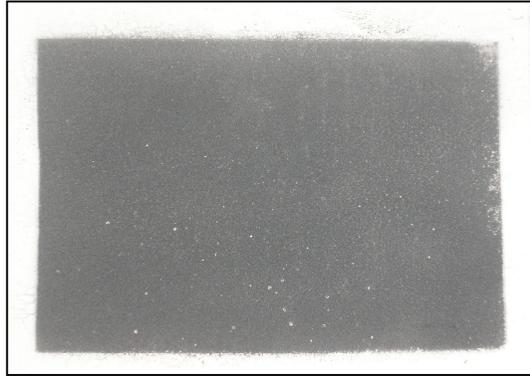


Figura III.1 - Protótipo de tela conversora cintiladora de nêutrons, confeccionada pela primeira metodologia (tela #1)

Na segunda metodologia aplicada, utilizou-se uma base de EVA (Copolímero de Etileno Acetato de Vinila), tipo UE-1203, teor de AV 12%, índice de fluidez 0,30 g/10 mim, fornecido pela empresa Unipar, mantendo-se os componentes da parte mineral. Para a confecção da tela, utilizou-se uma câmara de mistura, reômetro de torque modelo Fisons 9000 fabricado pela Haake Rheocord, do laboratório LAPTEC, do IMA/UFRJ. Os componentes, foram adicionados na câmara a uma temperatura de 180 graus centígrados e uma rotação de 90 RPM, na proporção de 61 % de EVA e 39 % da parte mineral, sendo que a parte mineral da amostra consistia em Li^6F-ZnS , esses percentuais foram obtidos após análise laboratorial da tela da empresa Nuclear Enterprize, NE-425. O agregado resultante foi levado a uma prensa térmica Carver, a uma temperatura de $150^\circ C$ e uma pressão de 6000 Lb/pol², até formar uma tela com espessura de 0,4 mm, mesma espessura da tela NE-425.



Figura III.2 - Protótipo de tela conversora cintiladora de nêutrons, confeccionada pela segunda metodologia (tela #2)

Como terceira metodologia, preparou-se uma tela apenas com EVA, utilizando novamente a prensa térmica, também com uma espessura de 0,4 mm, método similar ao da metodologia anterior. Nesta tela foi jateada uma camada de óxido de gadolínio. Optou-se pelo Gd_2O_3 [37] por ser menos higroscópico e facilitar a redução dos grãos devido ao ocorrido com o $GdCl_3$ nas telas anteriores. Misturou-se ao agregante, a tinta esmalte incolor, ídem a primeira metodologia, que após a secagem recebeu uma nova camada, sendo que desta vez de sulfeto de zinco puro com o mesmo agregante, esmalte incolor. Nesta metodologia utilizou-se sulfeto de zinco industrializado, lumilux da empresa Riedel De Haën AG sem a dopagem de prata.

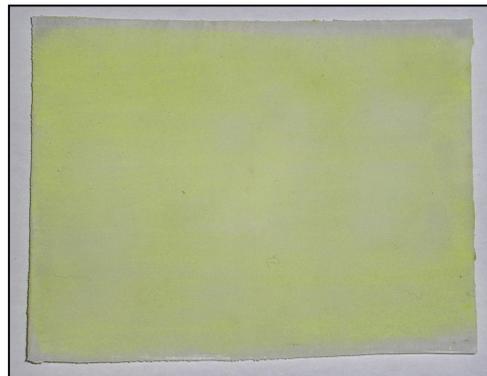


Figura III.3 - Protótipo de tela conversora cintiladora de nêutrons, confeccionada pela terceira metodologia (tela #3)

Após os primeiros testes com o último protótipo, resolveu-se duplicar a camada de Gd_2O_3 . Sobre a face oposta da tela, jateou-se uma nova quantidade de Gd_2O_3 com agregante, aumentando-se a proporção de gadolínio para 2:1.

São considerações importantes a se observar para a viabilidade das metodologias adotadas: a aderência do composto às bases de celulose de EVA; a formação da imagem neutrongráfica do IRV, como objeto teste; e a qualidade dessa imagem, tomando como referência a tela cintiladora importada, NE425.

III.1 – Método de obtenção do ZnS:Ag

Pensou-se em diversos processos para a obtenção do Sulfeto de Zinco (ZnS) dopado com Prata (ZnS:Ag) e foram testadas diferentes maneiras de se obter o sal desejado, tais como: o método de crescimento de cristais, o método de evaporação e o método de decantação. Todos envolveram sérias dificuldades devido, principalmente, à diferença entre os pesos específicos dos materiais envolvidos. Optou-se fazer o uso da tioacetamida {H₃C(CS)NH₂}, como fonte de sulfeto [38], para se obter uma deposição adequada dos elementos que comporiam a emulsão. A tioacetamida {H₃C(CS)NH₂}, quando em solução aquosa, libera o gás sulfídrico, H₂S, quando contactada com um ácido inorgânico qualquer. Por sua vez, esse gás pode ser utilizado para precipitar alguns sulfetos metálicos.

As reações químicas realizadas para a obtenção do sulfeto de prata e do sulfeto de zinco, usados nas metodologias I e II, a partir da tioacetamida a 3%, foram:

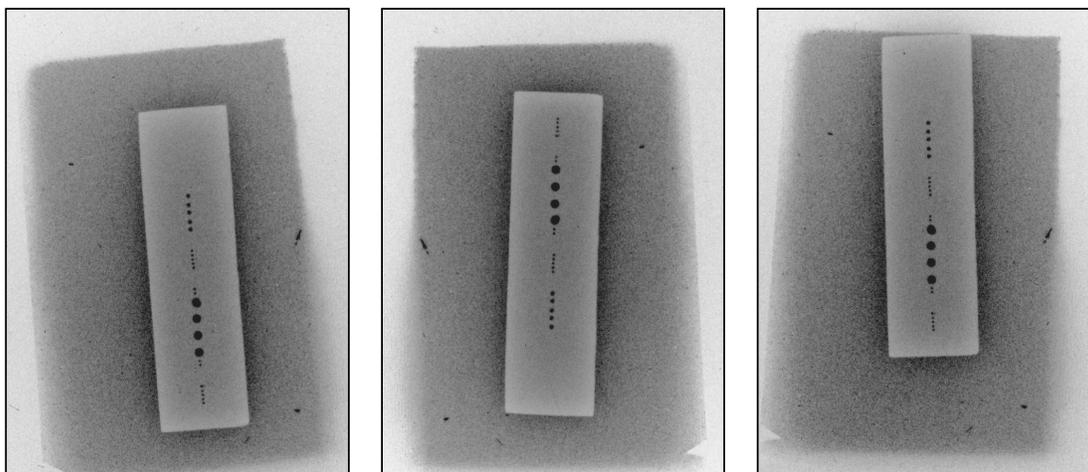


III.1.1 – Determinação dos percentuais de dopagens por prata

Na literatura consultada, nada foi encontrado a respeito dos percentuais de dopagem por prata, para a confecção de telas conversoras cintiladoras de nêutrons. Em estudos de dopagens, são referenciadas proporções de dopagens, que normalmente, variam numa faixa de 0,2 a 10 % [34]. Na ausência de uma referência bibliográfica sobre o assunto e por se tratar de uma pesquisa inédita no País, resolveu-se fazer uso de um percentual de dopagem de 5%, em primeira instância, por ser o percentual médio do trabalho de Silva, Khaidukov e outros [34]. A partir desse percentual, caso a imagem

do IRV obtida não tivesse a qualidade definida no item II.3.6, proceder-se-ia à uma variação da dopagem até se atingir a qualidade requerida.

De acordo com as imagens obtidas do IRV, nos primeiros ensaios, mediante a dopagem por prata a 5% e às diferentes exposições ao feixe neutrônico provindo do canal de irradiação, J-9, do reator nuclear Argonauta, IEN/CNEN, conforme ilustra a Figura III.4, verificou-se que esse percentual de dopagem era viável à metodologia proposta para a confecção da tela cintiladora conversora de nêutrons nacional.



Figuras III.4 – Ensaios neutrongráficos preliminares do IRV em diferentes tempos de exposição: a) 15 minutos ; b) 20 minutos; e c) 25 minutos. Utilizando a 1ª metodologia.

III.1.2 – Determinação das massas e volumes

Os compostos AgNO_3 , doravante denominado composto A, e $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, denominado composto B, foram utilizados para a obtenção do sal desejado, sulfeto de zinco dopado com prata (ZnS:Ag) numa razão química de 1: 4 e a dopagem em prata de 5%.

Como a intenção era se preparar três pequenos protótipos da tela conversora cintiladora de nêutrons, com as dimensões de 6,0 cm x 4,0 cm de espessura, e se evitar desperdícios de material, calculou-se a quantidade de sal suficiente para se ter, aproximadamente, 10 g do composto, para a confecção dos protótipos utilizados na primeira metodologia.

Os compostos A e B foram obtidos no Laboratório de Terras Raras do Instituto de Engenharia Nuclear. Utilizou-se no composto A, o nitrato de prata, no percentual de 10%, de forma que cada 100 ml correspondesse ao peso de 15,80 g. Tendo a prata o valor molar de 107,90 g e o AgNO_3 , o valor molar de 169,90 g, para uma dopagem a 5% de Ag, foram necessárias 7,90 g por 100 ml de volume. No composto B, utilizou-se o zinco granulado-PA e nitrato de zinco, cujos valores molares são: 65,40 g e 189,40 g, respectivamente. Para 100 ml, necessitou-se de 16,50 g de $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$. Após pesado, o metal zinco foi levado a reagir com o HNO_3 .

Na segunda preparação da parte mineral, procedeu-se de maneira análoga a da primeira, sendo que, de posse dos componentes, sulfeto de zinco, sulfeto de prata metálica e óxido de gadolínio separados, calculou-se o volume necessário para se preparar uma tela com as seguintes dimensões: 10 cm de altura, 12 cm de largura e 0,4 mm de espessura e volume de $4,8 \text{ cm}^3$, tendo-se adicionado 5% do dopante (prata). Desse volume de 61%, aproximadamente, $2,9 \text{ cm}^3$ deveria ser de EVA e os outros $1,9 \text{ cm}^3$ restantes, da parte mineral.

Na terceira preparação da parte mineral, optou-se por fazer um teste sem a dopagem com prata e o sulfeto de zinco foi adquirido industrialmente por possuir uma granulação menor. O óxido de gadolínio já havia sido preparado no segundo processo, bastando apenas misturá-los na proporção de 50%.

III.1.3 – Etapas da obtenção do ZnS:Ag para utilização nas metodologias 1 e 2.

As etapas do processo de obtenção do ZnS:Ag podem ser visualizadas a seguir:

O composto A, obtido conforme descrito no item III.1.2, foi pesado e colocado em um recipiente de vidro, onde foi gotejado um pouco d'água, acrescentando um pouco de ácido nítrico (HNO_3), até um volume de, aproximadamente 50 ml. O volume foi completado com água até alcançar 100 ml. Para se evitar a radiólise da prata, o composto A foi guardado em frasco escuro, protegido da luz.

Da mesma forma, sobre o composto B foi gotejado ácido nítrico, até um volume de 50 ml, acrescentando-se água até o volume de 100 ml. Colocando-se o composto B em uma placa agitadora, já com o volume de 100 ml, gotejou-se HNO_3 , quando necessário, até a completa diluição do zinco. Nesta etapa se o volume reduzisse, acrescentava-se água, até completar o volume inicial, 100 ml.

Em uma placa agitadora, misturou-se 50 ml do composto B com 6,25 ml do composto A, transformando-se a prata e o zinco em soluções de nitratos. Ainda na placa agitadora, gotejou-se a tioacetamida para provocar a deposição do sal desejado. Com o uso da tioacetamida, o material começou a se depositar no fundo do recipiente. Neste momento, transferiu-se o material para uma centrífuga, a fim de se acelerar a deposição.

Após a separação do material líquido do pó depositado, retornou-se a parte líquida para a placa agitadora, gotejando-se um pouco mais de tioacetamida, com o objetivo de precipitar mais sal. Quando não houve mais precipitação, passou-se para a etapa seguinte.

Após toda a deposição do sal, passou-se toda a mistura por um filtro de papel. Lavou-se o pó com água destilada e filtrou-se-a novamente. Uma vez lavado o material, colocou-se em um vidro de relógio e levou-o para secar, sob uma lâmpada, durante 24 horas. Levou-se uma amostra do material ao laboratório de terras raras do IEN, para uma fluorescência de raios X, confirmando ser sulfeto de zinco. Depois de seco, o pó pode ser reduzido a granulometrias menores, para se obter uma melhor resolução neutrongráfica, bastando, para tal, passá-lo num processador.

No primeiro processo, o pó foi utilizado da maneira que foi obtido sem ser reduzido. Ao se fazer um teste de granulometria, através do método de peneiras, no laboratório de Radiotraçadores do IEN/CNEN, verificou-se que o tamanho médio dos grãos era de 125 μm .

No segundo processo, após a obtenção do pó pelo processo descrito acima, procede-se à redução dos grãos em um moinho de rolo, reduzindo-se o tamanho dos grãos para menos que 100 μm , valor pelo menor diâmetro das malhas das peneiras utilizadas.

III.2-Procedimento de obtenção do colóide para utilização nas metodologias 1 e 3.

Para uma dada massa de ZnS:Ag, foi acrescentado a mesma quantidade de cloreto em gadolínio (GdCl_3), o cloreto de gadolínio foi obtido da reação química do óxido de gadolínio (Gd_2O_3) com o ácido clorídrico (HCl), obtendo um composto com 50% de cada pó.

Para a aderência desse composto sobre a base foi utilizada tinta esmalte incolor, devidamente diluída em acetona. Após a diluição, procedeu-se à mistura dos componentes, preparando-se-a então, para a deposição jateada sobre a base de celulose.

O uso da acetona como diluente exigiu a seleção de uma base de celulose que não fosse atacada pelos seus componentes. Testes de reação foram feitos, despejando-se uma quantidade de acetona sobre as folhas de celulose e observando-as por um período de 48 horas. Após este período, as folhas foram examinadas visualmente. Após vários testes, selecionou-se a base TRANSPARENCY FILM, fabricada pela empresa 3M, sob o código CG3460, cuja superfície pode ser lisa ou rugosa. Testes de aderência foram realizados, para se definir a escolha da base rugosa. Na Figura III.5, tem-se a imagem da tela confeccionada com a base lisa, observa-se que a aderência não foi satisfatória, pois, perdeu parte do agregado mineral.

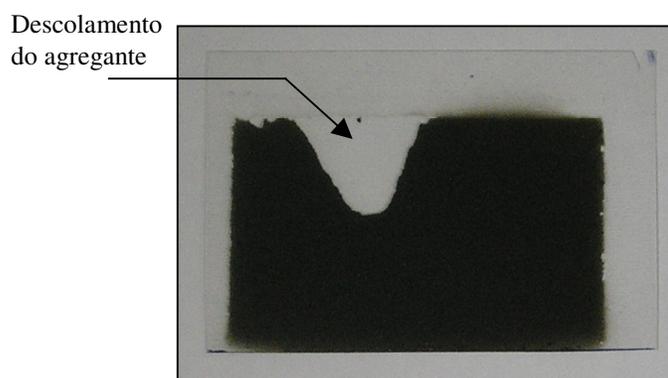


Figura III.5 – Protótipo da tela cintiladora conversora nacional, confeccionada com uma base Transparency Film/3M lisa.

III.3 - Confeção de telas por deposição jateada para utilização nas metodologias 1 e 3.

Para facilitar o processo de deposição do colóide por meio de jato de ar comprimido, através de uma pistola, e se evitar o deslocamento das telas no momento do jateamento, fez-se necessário construir-se um suporte que as fixassem, conforme pode ser observado na Figura III.6. Este suporte foi confeccionado em papel cartolina, possuindo três janelas, onde as telas fixadas podem ser jateadas sem o deslocamento das devidas posições.

Um cuidado necessário antes do jateamento, foi o de manter o colóide sempre uniformemente misturado, pois, por ter uma parte sólida, em forma de pó e com alta

densidade, ocorria sempre a decantação do mesmo, fato que poderia atrapalhar o processo. A fim de se evitar que isso ocorresse, procedeu-se à agitação do material sempre que se notava uma decantação, por menor que fosse.

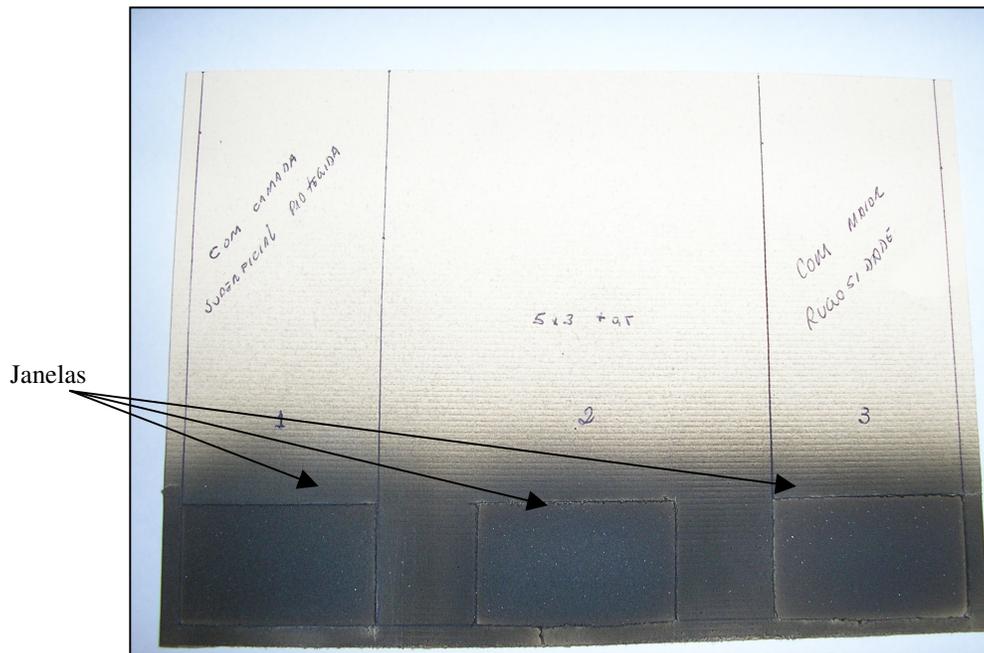


Figura III.6 – Suporte de cartolina para a fixação das telas durante o processo de jateamento

Além das duas telas, uma lisa e outra rugosa, uma outra foi confeccionada, com a base rugosa de celulose, tendo recebido uma camada extra de tinta esmalte incolor sobre o colóide com a função de agente selante.

Na terceira metodologia, utilizou-se o mesmo suporte de cartolina e sobre a base, tela de EVA, foi jateada uma camada do primeiro colóide, composto de sulfeto de zinco com o agregante (tinta esmalte incolor); após o primeiro jateamento secar, aplicou-se o segundo colóide, composto de óxido de gadolínio com o mesmo agregante.

III.4 – Neutronografia

Para a realização das Neutronografias com a tela conversora cintiladora nacional, o método de exposição adotado foi o direto com, o corpo de prova, o filme e a tela foram irradiados simultaneamente. O arranjo filme-conversor cintilador foi montado no interior de um cassete de alumínio da marca Kodak, fechado por pressão através de um sistema de mola, onde o filme radiográfico Kodak Industrex AA 400 [17] e a tela conversora cintiladora nacional foram intercalados pela folha de celulose transparente, ficando tudo em contato íntimo. Para aumentar a probabilidade de um maior número de fótons de luz alcançar o filme, filtrando-se os raios γ provindos do canal de irradiação (filtro de chumbo), e os elétrons de conversão, resultantes da interação dos nêutrons com os núcleos de Gd situados na superfície da tela conversora (filtro de celulose) transparente a luz [3].

A peça a ser neutronografada foi o IRV, que sendo fixado sobre as placas de chumbo, com 3 mm de espessura, presas na face externa do cassete, frontalmente direcionada ao fluxo de nêutrons do reator. O conjunto foi colocado no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta e exposto por tempos variados. O reator Argonauta do IEN/CNEN foi operado a uma potência nominal de 340 W, proporcionando um feixe de nêutrons térmicos no plano da imagem, com as seguintes características: fluxo térmico $4,46 \times 10^5 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$; razão de colimação L/D igual a 70; razão n/γ de $3 \times 10^6 \text{ n.cm}^{-2} \text{ mrem}^{-1}$; e energia média dos nêutrons de 30 meV.

O canal de irradiação J-9 da coluna térmica externa se situa a meia altura dos elementos combustíveis, conforme ilustra a Figura III.7. Os componentes necessários à extração de um feixe de nêutrons térmicos, que forneça Neutronografias de boa qualidade nesse canal de irradiação são: um bloco moderador de grafita com 25 cm de espessura, um colimador divergente, em forma de tronco de pirâmide, com 60 cm de comprimento, bases quadradas de entrada de 16 cm^2 e saída de 49 cm^2 e uma divergência angular pequena, tendo suas bordas externas forradas com cádmio. Na saída do canal J-9, foi instalada uma gaveta de alumínio preenchida com parafina borada, cuja finalidade é alinhar o feixe neutrônico no plano da imagem.

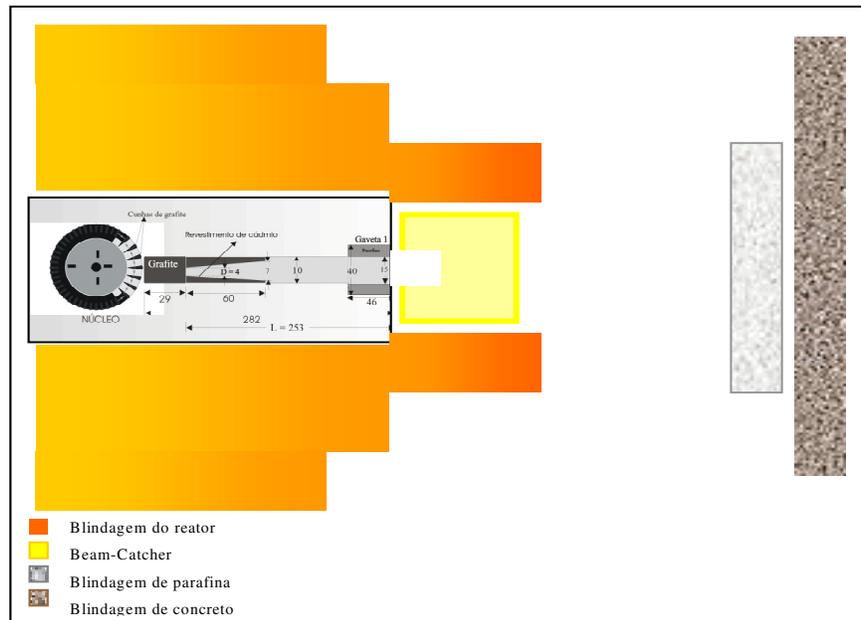


Figura III.7 – Arranjo instalado no canal de irradiação, J9, do reator Argonauta [22]

III.5 – Metodologia para determinação da resolução espacial e MTF.

As resoluções espaciais das imagens neutronográficas obtidas com as telas conversoras cintiladoras nacionais de nêutrons foram determinadas através das imagens do IRV, descrito no item II.3.7. Inicialmente, selecionou-se uma área de interface dessas imagens e, em seguida, obteve-se a distribuição dos níveis de cinza, ao longo da região de borda entre a chapa absorvedora de nêutrons (cádmio) e o feixe direto. A distribuição resultante foi ajustada a função ESF (Edge Spread Function), expressa pela equação II.7, sendo a resolução do sistema de imageamento dada, no espaço de varredura dado por $R = 2 / C$, conforme equação II.8.

A modulação do sinal foi determinada para três frequências espaciais diferentes, nas imagens neutronográficas do penetrâmetro, em pares de linhas/mm, a saber : 4; 2 e 1 , correspondendo, respectivamente, aos furos de 0,25 mm; 0,50 mm e 1,0 mm de diâmetro. Para se calcular os valores das MTF relativas as frequências espaciais citadas,

determinou-se as densidades de níveis de cinza máxima e média das imagens neutronográficas digitalizadas, substituindo-se esses valores na equação II.9.

III.6 – Curvas características das telas conversoras cintiladoras nacionais.

Para se construir as curvas características das telas conversoras cintiladoras nacionais, confeccionadas conforme descritas no item III.3, seguindo a primeira metodologia, foram realizadas dez irradiações, no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta, com os seguintes tempos de exposições, em minutos: 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0; 17,5; 20,0; 22,5 e 25,0, em cada uma delas. Após a captura do negativo com a câmera digital do fabricante Nikon, modelo Coolpix 995, utilizando-se o programa computacional de digitalização de imagens, Image-Pro Plus, determinou-se a densidade média de níveis de cinza em relação aos respectivos tempos de exposições. De acordo com a equação II.5, os valores das exposições (E) foram calculados, considerando-se o produto do tempo de exposição pelo fluxo do feixe de nêutrons térmicos, no plano da imagem do canal de irradiação J-9, $4,46 \times 10^5 \text{ n.cm}^2.\text{s}^{-1}$. Traçou-se o gráfico das densidades de níveis de cinza versus logaritmo da exposição, obtendo-se, então, a curva característica do sistema tela/filme.

Para se encontrar o tempo de exposição adequado, relativo a tela específica, optou-se pelo ponto central da região linear da curva característica, determinando-se, então, na abscissa correspondente. Os resultados encontram-se apresentados no Capítulo IV.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados relativos à confecção de telas cintiladora conversoras nacionais, conforme a metodologias descritas no capítulo II, em termos de: a) curvas características dos diferentes sistemas filme-conversor; b) determinação do tempo de exposição adequado para cada sistema em estudo; c) análise das imagens neutrongráficas do IRV; d) resolução espacial do sistema tela cintiladora conversora nacional-filme radiográfico; e) análise das imagens neutrongráficas obtidas de objeto teste com a tela cintiladora conversora nacional.

A Figura IV.1, mostra as duas telas cintiladoras conversoras, confeccionadas segundo a primeira metodologia informada no item III.3. A imagem mostrada na Figura IV.1(c), observa-se que ocorreu uma falta de aderência da emulsão em um determinado ponto da tela “a”, atribuído ao fato de ter sido arrastada alguma impureza durante a deposição do colóide . A deposição do colóide sobre as telas correspondentes às imagens mostradas nas Figuras IV.1(a) e IV.1(b), foram feitas em superfícies rugosas, conforme se descreveu no capítulo III. A imagem digitalizada vista na Figura IV.1(a), corresponde à tela que recebeu uma camada extra de tinta esmalte incolor como selante, resultou menos enegrecida, em função do espalhamento dos nêutrons pelos núcleos de hidrogênio presentes no selante. Das três telas cintiladoras conversoras nacionais, a que apresentou melhor uniformidade, resistência mecânica e aderência do colóide, foi a tela cuja imagem neutrongráfica é observada na Figura IV.1 (b).

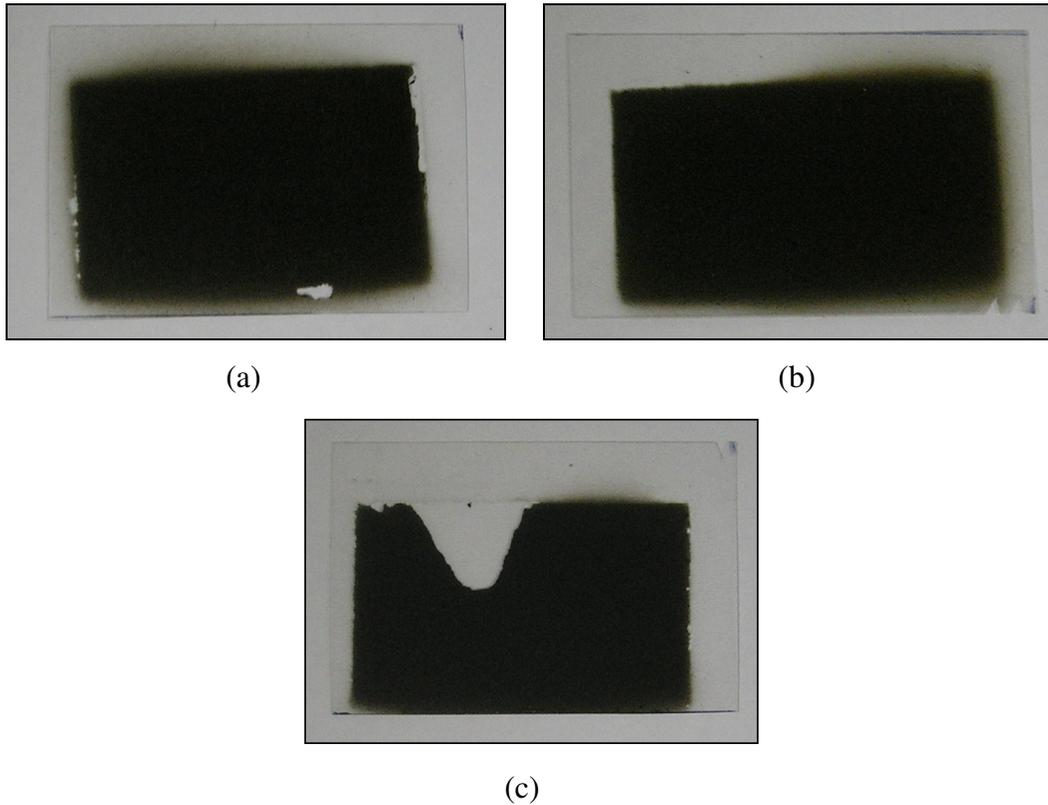


Figura IV.1 Telas conversoras cintiladoras nacionais, confeccionadas em base Transparency Film 3M: rugosa, (a) com camada de selante; (b) sem selante; (c) Tela conversora cintiladora nacional com base lisa.

IV.1 – Análise das imagens neutrongráficas obtidas com a tela cintiladora conversora nacional.

A título de testes preliminares, realizou-se, Neutronografias do objeto teste, IRV, usando-se o filme Kodak indutrex AA-400, uma tela cintiladora conversora importada, do fabricante Nuclear Enterprise, modelo NE 425 com 0,4 mm de espessura e uma tela cintiladora conversora nacional. O tempo de exposição do sistema foi de 20 minutos. Essas Neutronografias foram submetidas as mesmas condições de revelação e podem ser observadas na Figura IV.2. Para esses testes não foi usado filtro de radiação, constituído, conforme já descrito, de duas placas de chumbo com espessuras de 3,0 mm, presas ao chassi radiográfico, na direção frontal do feixe de neutrônico.

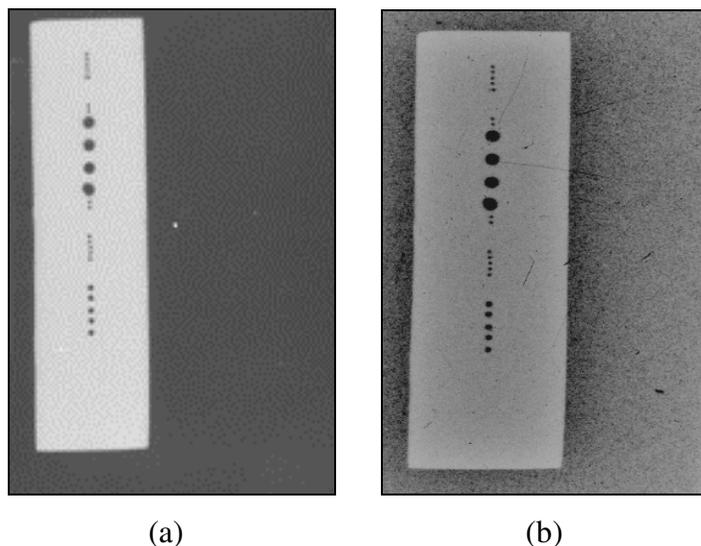


Figura IV.2- Neutronografias preliminares do IRV com as telas: a) cintiladora conversora importada de gadolínio e b) cintiladora conversora nacional #1

Observando as imagens nota-se que a tela importada não apresenta o efeito da granulação, presente na tela cintiladora conversora nacional, confeccionada por jateamento do colóide preparado nas condições descritas no item III.2. Era de se esperar que o sistema formado pela tela conversora metálica-filme radiográfico resultasse em imagens neutronográficas com melhor contraste e resolução, uma vez que a presença de granulação propicia o espalhamento da radiação secundária e a resolução, dependente do tamanho do grão [3]. Observa-se que as duas telas geraram imagens nítidas do penetrâmetro, observando-se, inclusive, os furos menores, com 0,25 mm de diâmetro, mas na imagem que será mostrada na Figura IV.3 (b), poderá se perceber o aspecto granular decorrente dos grãos de sal (ZnS), porém, nota-se que a distribuição é bem uniforme.

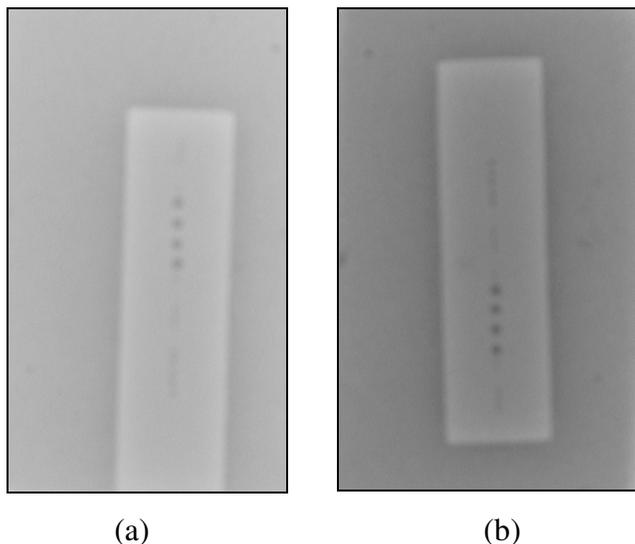


Figura IV.3- Neutronografias preliminares do IRV com as telas: a) cintiladora conversora nacional #2 e b) cintiladora conversora nacional #3

IV.2 – Resolução espacial e MTF das telas cintiladoras conversoras nacionais

As curvas ajustadas da distribuição de densidades em níveis de cinza, ESF, em função da coordenada de varredura espacial, na região de interface do penetrâmetro de cádmio (IRV), para os dois sistemas de detecção, tela cintiladora conversora nacional-filme, segundo a metodologia descrita na seção III.4, e tela cintiladora conversora importada-filme, são apresentadas nas Figuras IV.4, IV5 e IV.6 Observa-se que a função que se ajusta à distribuição de níveis de cinza ESF, relativa a tela nacional apresenta um valor maior do parâmetro de livre ajuste C. O valor de C, que está associado ao cálculo da resolução espacial do sistema, segundo a equação II.8, relativo à ESF da tela cintiladora conversora importada apresentou um menor valor de C.

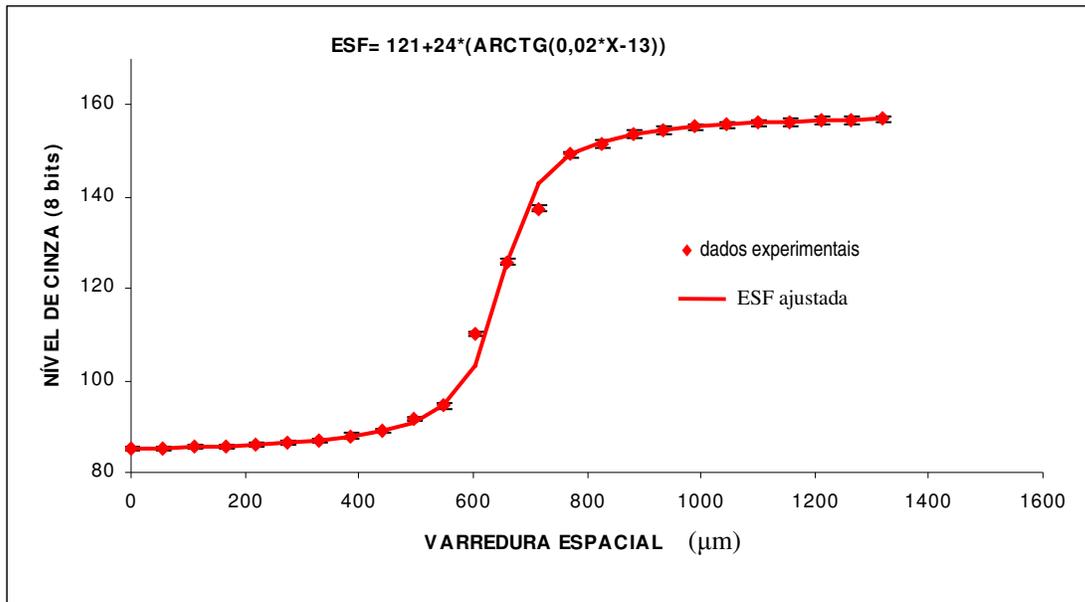


Figura IV.4 – Distribuição da densidade em níveis de cinza, em função da varredura espacial na região de interface do IRV, obtida com a tela cintiladora conversora nacional #1

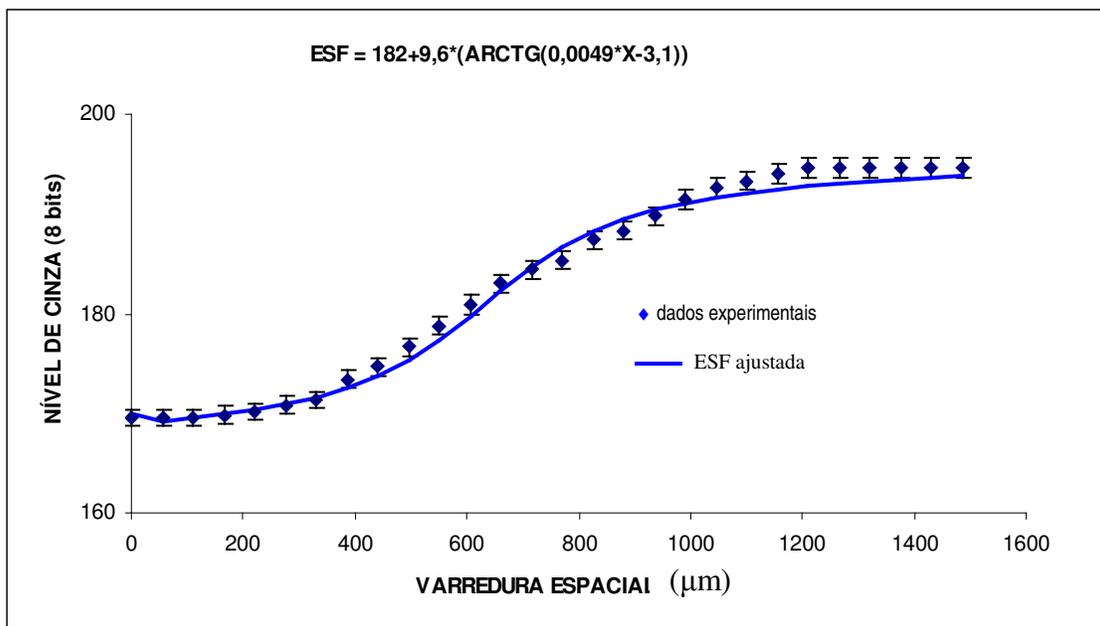


Figura IV.5 – Distribuição da densidade em níveis de cinza, em função da varredura espacial na região de interface do IRV, obtida com a tela nacional # 2

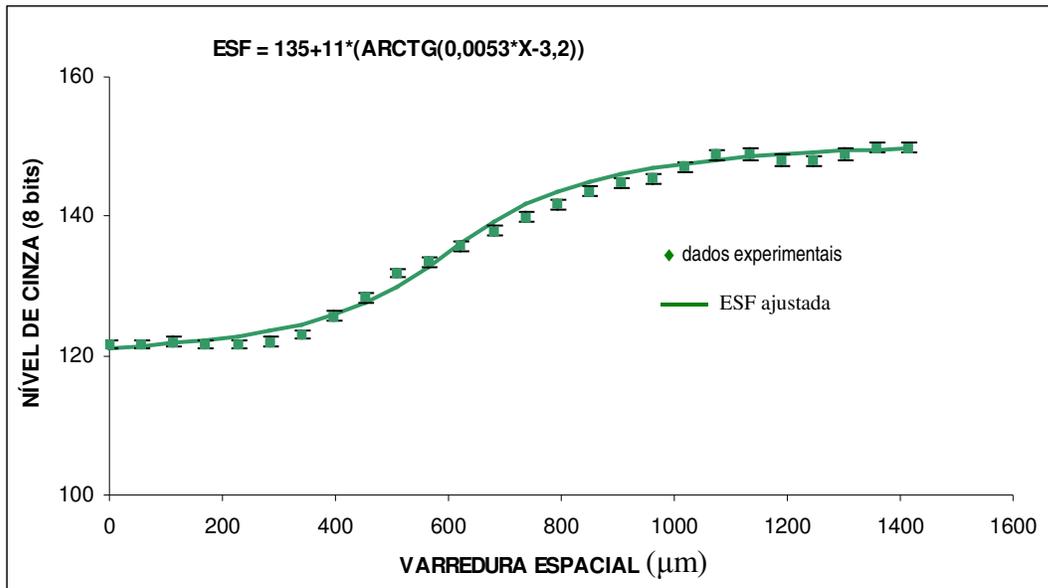


Figura IV.6 – Distribuição da densidade em níveis de cinza, em função da varredura espacial na região de interface do IRV, obtida com a tela nacional # 3

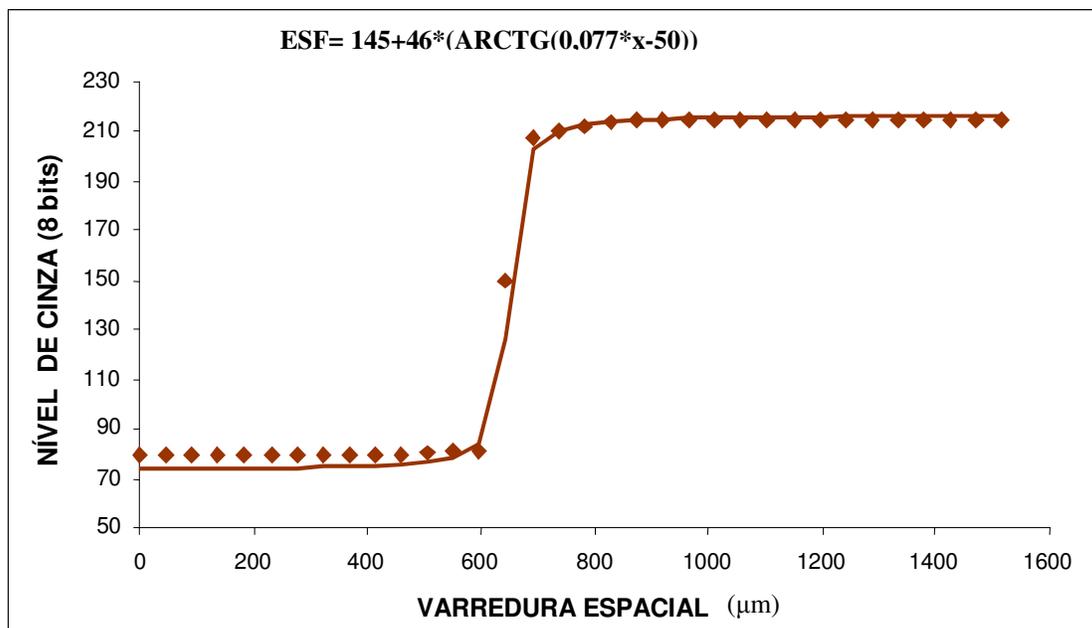


Figura IV.7 – Distribuição da densidade em níveis de cinza, em função da varredura espacial na região de interface do IRV, obtida com a tela importada.

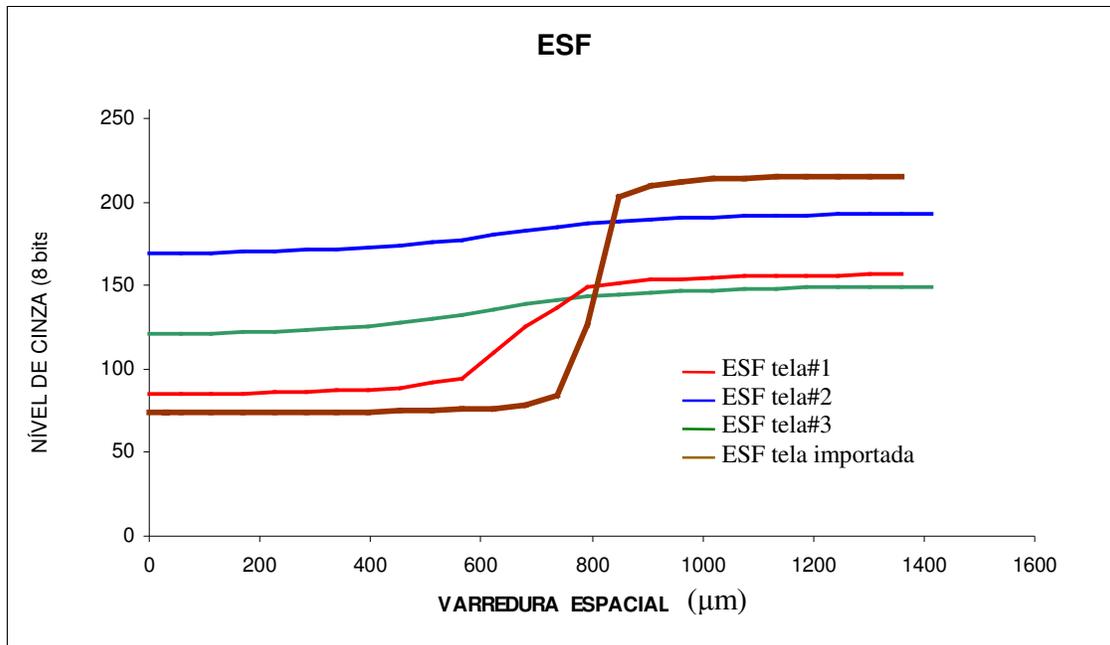


Figura IV.8, mostra a comparação das ESF das telas cintiladoras conversoras nacionais e a tela importada.

A Tabela IV.1 expressa os valores da resolução espacial dos sistemas tela cintiladora conversora nacional e tela cintiladora conversora importada, com uma folha do filme Kodak Industrex AA400, seguindo a metodologia descrita na seção III.4. O erro relativo percentual (δR) foi determinado, considerando-se o valor da resolução espacial do sistema tela cintiladora conversora importada, como referência. Observa-se que a resolução espacial da tela nacional #1 é a que possui melhor valor e está próximo do valor da tela importada.

Tabela IV.1 – Resolução espacial das telas cintiladoras conversoras importada e nacional, respectivamente, obtida pelo ajuste da função borda-difusa (ESF)

Tela	Resolução (μm)	δR (%)
Importada	65	-----
Nacional # 3	377	480
Nacional # 2	408	528
Nacional # 1	100	54

A Tabela IV.2 ilustra os dados referentes aos valores máximos e médios dos níveis de cinza relativo as imagens do IRV, obtidos pelas telas cintiladoras conversoras nacionais e os valores correspondentes de modulação do sinal calculados em função da frequência espacial, obtidos com a tela cintiladora conversora nacional e com a tela conversora metálica, conforme item II.3.9, para os ensaios neutrongráficos realizados no Reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear.

Tabela IV.2 – Valores da modulação do sinal relativos aos ensaios neutrongráficos realizados do IRV com os sistemas tela cintiladora conversora nacional, tela conversora importada e filme AA-400, no canal de irradiação, J-9, do reator Argonauta

<i>Telas</i>	<i>Frequência Espacial (linhas /mm)</i>	$(NC)_{médio}$	$(NC)_{máximo}$	$M_{calculado}$
<i>Importada</i>	<i>4</i>	<i>70</i>	<i>129</i>	<i>0,84</i>
	<i>2</i>	<i>74</i>	<i>145</i>	<i>0,96</i>
	<i>1</i>	<i>72</i>	<i>144</i>	<i>1,00</i>
<i>Nacional # 1</i>	<i>4</i>	<i>69</i>	<i>128</i>	<i>0,86</i>
	<i>2</i>	<i>71</i>	<i>135</i>	<i>0,90</i>
	<i>1</i>	<i>65</i>	<i>130</i>	<i>1,00</i>
<i>Nacional # 2</i>	<i>4</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
	<i>2</i>	<i>78</i>	<i>137</i>	<i>0,75</i>
	<i>1</i>	<i>70</i>	<i>132</i>	<i>0,88</i>
<i>Nacional # 3</i>	<i>4</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
	<i>2</i>	<i>82</i>	<i>140</i>	<i>0,70</i>
	<i>1</i>	<i>71</i>	<i>136</i>	<i>0,91</i>

IV.3 – Curva característica do sistema tela conversora cintiladora nacional # 1/ filme radiográfico e o tempo de exposição

A curva característica e o tempo ideal de exposição da tela cintiladora conversora nacional # 1, determinada segundo a metodologia descrita no capítulo III, está ilustrada na Figura IV.7. Cada tempo de exposição foi obtido a partir do valor do $\log E$, no ponto da abscissa correspondente ao ponto médio da reta de ajuste na região linear da curva característica e do valor do fluxo dos nêutrons térmicos no canal J-9.

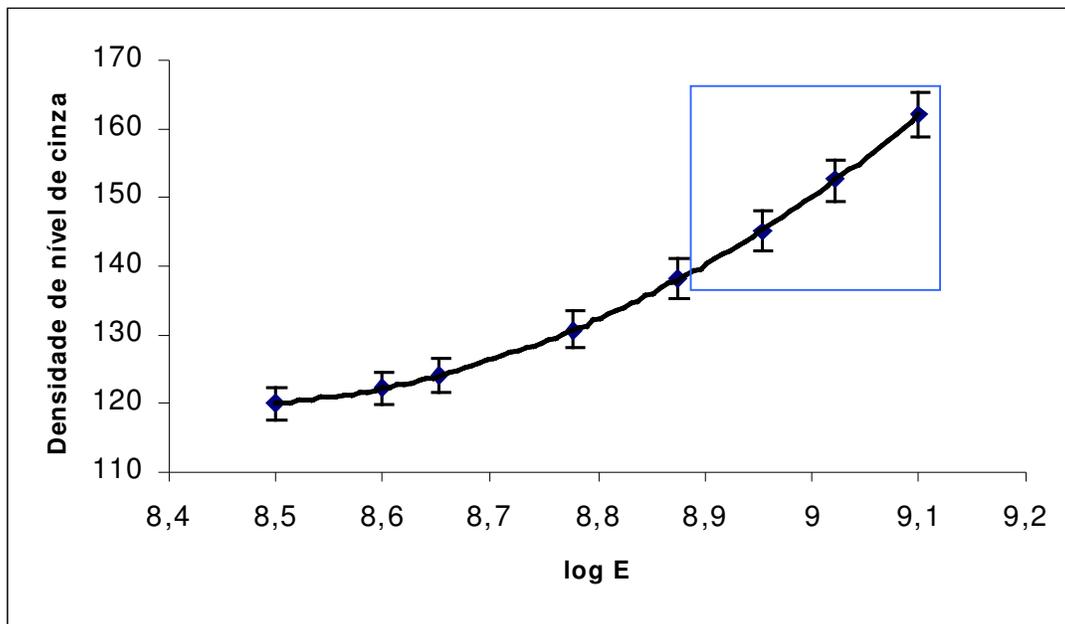


Figura IV.8 – Curva característica da tela conversora cintiladora nacional # 1

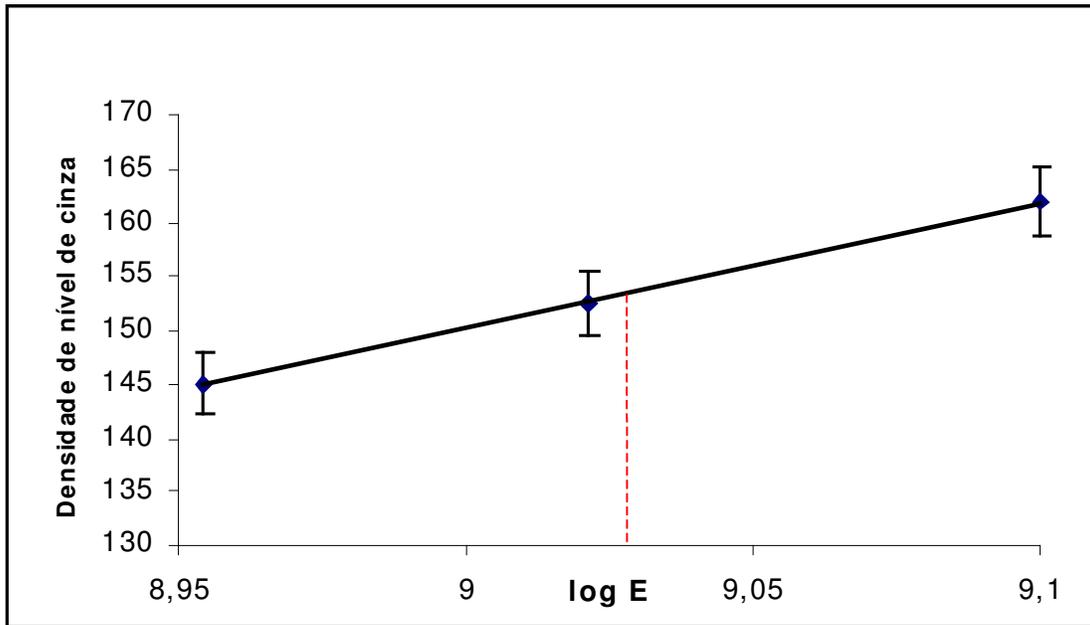


Figura IV.9 –Região linear da curva característica

De acordo com a curva, Figura IV.8 verifica-se que o tempo ideal para exposição ao feixe de nêutrons, do reator Argonauta, a uma potência de 340W e para a tela conversora cintiladora nacional #1 è de 28 mim.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões relativas às três metodologias utilizadas no desenvolvimento das telas cintiladoras nacionais conversoras de nêutrons, bem como as possibilidades encontradas para futuros trabalhos nesta área.

Com a tela nacional número 1 se obteve a melhor resolução neutrongráfica, dentre as três confeccionadas, conforme se visualiza na figura V.1, através das curvas correspondentes às ESF relativas aos sistemas formados pelas telas cintiladoras conversoras de nêutrons e filme radiográfico AA400 Industrex da Kodak, onde se comparam os desempenhos das telas nacionais com o da tela importada. A metodologia utilizada para a confecção da tela nacional número 1 foi relativamente a mais simples, pois não requereu um equipamento sofisticado, bastando o uso de uma pistola a ar comprimido e de uma folha de celulose.

Pelos valores das resoluções espaciais constantes na Tabela IV.1, pode-se concluir, dos ensaios neutrongráficos realizados com o IRV, que: 1) ao ser utilizada a tela de número 3, poder-se-á visualizar vazios em objetos com diâmetros maiores do que $377 \mu\text{m}$; com a tela número 2, os com diâmetros acima de $408 \mu\text{m}$; e com a tela número 1, aqueles com diâmetros a partir de $100 \mu\text{m}$, conforme mostraram as imagens neutrongráficas do IRV (penetrâmetro), nas Figuras IV.2b, IV.3a e IV.3b., onde imperfeições menores ou próximas desses valores não resultarão nítidos.

Para dirimir dúvidas à formação das imagens decorrentes de raios- γ , provenientes do feixe de irradiação extraído do canal J-9 do reator Argonauta, ou dos elétrons de conversão, originados das interações dos nêutrons com os núcleos de Gd [21], colocou-se duas placas de chumbo com 3 mm de espessura total, cobrindo a região útil da tela sobre o IRV, para filtrar os raios- γ e colocou-se uma folha de papel celulose transparente, após a tela, evitando-se a sensibilização do filme radiográfico pelos elétrons de conversão interna. Dessa forma, garantiu-se que as imagens neutrongráficas obtidas foram formadas, realmente, pelos fótons de luz, como se pretendia.

Apesar do baixo contraste verificado nas imagens neutrongráficas do IRV, utilizando-se como sensor um filme radiográfico, tentou-se realizar Neutronografias em Tempo Real

(NRTR) com a câmera CCD Panasonic série WV-CL 920. Como era de se esperar, devido à baixa intensidade de fótons de luz pelas telas e, também, em decorrência do espalhamento desses fótons no espaço entre a tela e a câmera, os resultados não foram satisfatórios.

Nas Figuras V.1 e V.2, tem-se as NRTR relacionadas à utilização da tela cintiladora importada, NE-425, e da tela cintiladora nacional conversora de nêutrons, respectivamente, mostrando que a baixa intensidade de fótons de luz gerados pelas telas poderia ser melhorada com a exposição a um feixe de nêutrons de maior intensidade ou pela exposição das telas durante um maior tempo. O espalhamento dos fótons de luz poderá ser melhorado com a utilização de um feixe de fibras óticas acoplando a tela conversora à câmera, como sugeriu Matsubayashi [36]. Nos testes realizados, fixou-se a íris da câmera totalmente aberta, a fim de se poder tentar captar o maior número de fótons de luz possível, o que, de certa forma, comprometeu a qualidade das imagens.



Figura V.1: NRTR com a utilização da tela cintiladora conversora de nêutrons importada, NE-425



Figura V.2: NRTR com a utilização da tela cintiladora nacional conversora de nêutrons número 1

Diante do exposto, pode-se concluir que os resultados obtidos indicam que as metodologias empregadas na confecção das telas nacionais são viáveis, o que poderá proporcionar a continuidade do desenvolvimento da técnica neutronográfica sem depender da importação desse tipo de material.

Este trabalho caminhou no sentido do desenvolvimento de telas cintiladoras conversoras de nêutrons totalmente nacionais, que poderão ser utilizadas em Ensaios Não-Destrutivos de peças, devendo a pesquisa, entretanto, ser continuada, para se atingir a qualidade das telas cintiladoras conversoras de nêutrons importadas, já que o Brasil detém a técnica de separação de minérios de terras raras, sendo rico dos materiais empregados na confecção dessas telas.

Dentre os trabalhos futuros que poderão vir a complementar essa dissertação, sugerimos que:

Novos testes com as telas confeccionadas sejam realizados, como por exemplo:

- Ensaios NRTR utilizando uma câmera CCD de maior sensibilidade e
- Ensaios NRTR em um arranjo neutronográfico de maior intensidade de fluxo de nêutrons térmicos.

Confecção de novas telas com:

- Utilização de material mineral com granulação mais fina;
- Utilização de um Evaporador Resistivo para a deposição da parte mineral;
- Utilização de outros fósforos para emissão de fótons de luz, na faixa de frequência correspondentes às do verde e do azul;
- Estudo do agente agregante dos grãos no substrato da tela e
- Uso de espessuras mais finas de ZnS (Ag), por sua opacidade à luz, intercalado com Gd_2O_3 , que são transparentes aos fótons de luz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KNOLL, G. F., “*Radiation Detection and Measurement*”, John Wiley & Sons, Inc., 3ª ed, 1999.
- [2] KAPLAN, I., “*Física Nuclear*”, Editora Guanabara Dois S.A. ,2ª ed, 1978.
- [3] LIMA, C.T.S., “*Tela Conversora Nacional de Gadolínio para Neutronografia*”, Dissertação de Mestrado, PEN/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [4] MENEZES, M. O., “*Radiografia com Neutrons em Tempo-Real*”, Tese de Doutorado, IPEN-CNEN/SP, USP, São Paulo, 2000.
- [5] LAMARSH, J. R., “*Introduction Nuclear Reactor Theory*”, Addison-Wesley Publishing, Company Inc, 1978.
- [6] LAMARSH, J. R., “*Introduction to Nuclear Engineering*”, Addison-Wesley Publishing, Company Inc, 1975.
- [7] SPEDDING, F. H., DAANE, A. H., “*The rare Earths*”, John Wiley and Sons, Inc, 1961.
- [8] <http://www.feiradeciencias.com.br>
- [9] ANDREUCCI, R., “*A Radiologia Industrial*”, Abende, 6ª ed, 2003.
- [10] DOMANUS, J. C., “*Practical Neutron Radiography*”, Commission of the European Communities, Kluwer Academic Publishers, 1ª ed, 1992.
- [11] GAMOW, G., “*Biografia da Física*”, Zahar Editores, 1963.
- [12] CRISPIM, V.R., “*Desenvolvimento de Ensaio Não-Destrutivos com Neutronografias*”, Tese de Doutorado, PEN/COPPE/UFRJ, RJ,1992.

- [13] ANDRADE, M. L. G., “*Caracterização de Sistemas Filme-Convertor para Radiografia com Nêutrons*”, Tese de Mestrado, IPEN/USP, São Paulo, 2002.
- [14] KATO, K. ; IKEDA, Y., “*Influences of scattered Neutrons and Gama Ray on Neutron Radiography Using Imaging Plate For Neutron Detector*” , Abstract of Seventh World Conference on Neutron Radiography, pp 110, Roma, 2002.
- [15] SANTOS, J. E. S. C., “*Neutronografia com Nêutrons Térmicos*”, Tese de Mestrado, PEN/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1977.
- [16] KODAK CIA, E., “*Radiography in Modern Industry*”, Kodak, 4ª ed, 1980.
- [17] ASTM E545-91, “*Standard Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiography Examination*”, pp. 511-516, USA, 1991.
- [18] LINDSAY, J. T. , “The MTF Method for Neutron Radioscopy Imaging System Characterization. In *Proceedings of Sixth World Conference on Neutron Radiography*”, Osaka, Japan, May, 17-21 1999.
- [19] LIMA, C.T.S., CRISPIM, V. R., SANTOS, W.M.S, “*Tela Conversora Nacional Neutronografia*”, In: Ata do XXVII Reunião de Trabalho de Física Nuclear no Brasil, vol I, pp. 34, Santos, Set. 2004.
- [20] FERREIRA, F. J. O., “*Estudo para Implantação de um Sistema Eletrônico para Aquisição de Imagens Neutronográficas no Reator Argonauta do IEN/CNEN*”, Dissertação de Mestrado, PEN/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- [21] BERGER, H, “*Resolution Study of Photographic Thermal Nêutrons Image Detectors*”, Journal of Applied Physics, V.34, n.4, pp. 914-918, New York, 1963.
- [22] SILVA, J.J.G., “*Detecção de Microdefeitos por neutronografia Térmica*”, Tese de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, 1995.

- [23] JOHN, J., “*Californium Based Neutron Radiography for Corrosion Detection in: Aircraft*”, American Society for Testing and Materials – ASTM-STP-586, pp.168-180, Philadelphia, 1975.
- [24] ORPHAN, V., KEDEM, D., JOHANSEN, F., “*Mobile Neutron Radiography System for Aircraft Inspection*” In: Proceedings of Second World Conference Neutron Radiography, D. Reidel Publishing Company, John P. Barton, pp. 447-454, Paris, 1986.
- [25] KENDEM, D., POLICHAR, R., ORPHAN, V., SHREVE, D., “*Neutron Imaging With Low-Intensity Neutron Sources*” In: Proceedings of Second World Conference Neutron Radiography, D. Reidel Publishing Company, John P. Barton, pp. 439-446, Paris, 1986.
- [26] KOBAYASHI, H., KOBAYASHI, I., SATOH, M., MORISHIMA, H., “*Neutron Imaging Using an Optical Stimulated Luminescent Material $Al_2O_3:C+Gd_2O_3$* ”, In: Abstract of Seventh World Conference on Neutron Radiography, pp.131, Roma, 2002.
- [27] KOERNER, S., LEHMANN, E., VONTOBEL, P., “*Design and Optimization of CCD-Neutron Radiography Detector*”, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A454, pp.158-164, 2000.
- [28] POPOV, A. L., MYLES, D. A. A., DAUVERGNE, F., WILKINSON, C., “*Development Of Storage Phosphors And Image Plate For Neutron Imaging*”, In: Abstracts of Seventh World Conference on Neutron Radiography, pp.132, Roma, 2002.
- [29] MOCHIKI, K., IKEDO, Y., MURATA, Y., NITTOH, K., KONAGAI, C., “*Color Radiography*”, In: Abstracts of Seventh World Conference on Neutron Radiography”, pp.132, Roma, 2002.

- [30] SRISATIT, S., PATTARASUMUNT, A., SIRITIPRUSSAMEE, P., RATANAPIROJKAJEE, N., “*Development Of a Frame Integral Data Acquisition Technique for The Neutron Computed Tomography Using Neutron Image Scope*”, In: Abstracts of Seventh World Conference on Neutron Radiography, pp.132, Roma, 2002.
- [31] ASANO, H., TAKENADA, N. FUJII, T., NAKAMATSU, E., TAGAMI, Y., TAKESHIMA, K., “*Image Processing Methods to Obtain Cross Sectional Void Fraction Distribution of Gas-liquid Two-Phase Flow a Projection Image by Thermal Neutron Radiography*”, In: Abstracts of Seventh World Conference on Neutron Radiography, pp.132, Roma, 2002.
- [32] [Http://www.fsc.ufsc.br](http://www.fsc.ufsc.br)
- [33] HARMS, A. A., GARSIDE, B. K., CHAN, P. S. W., “*Edge Spread Funcion to Neutron Radiography*”, Journal of Applied Physics, (43)9:386367, 1972.
- [34] SILVA, E. C., KHAIDUKOV, M. N., MAKHOV, V. N., NOGUEIRA, M. S., FARIA, L. O., “*Investigation of the TL response of $K_2YF_5:Dy^{3+}$ crystals to X and γ radiation fields*”, CDTN-Brasil and IGICLP-Russia, 2005.
- [35] YOSHII, K., MIYA, K., “*A Study on the development of a fast neutron television converter*”, NERL, University of Tokio, 1993.
- [36] MATSUBAYASHI, M., HIBIKI, T., MISHIMA, K., YOSHII, K., OKAMOTO, K., “*Development of a fast neutron radiography converter using wavelength-shifting fiber*”, CPAFJAERI, Ibaraki, Japan, 2003.
- [37] SHESTAKOVA, I., GAYSINSKIY, V., ANTAL, J., BOBEK, L., NAGARCAR, V. V., “*A new scintillator structure for thermal neutron imaging*”, UMLRR, University Avenue, Lowell, United States, 2007.

- [38] SIGOLI, F. A., PIRES, A. M., DAVOLOS, M. R., JUNIOR, M. J., “*Obtenção de compostos luminescentes via precipitação homogênea IN-SITU em matriz macroporosa de sílica*”, IQ, UNESP, São Paulo, Brasil, 1999.
- [39] HIBIKI et al, “*Nuclear Instrument and Methods in Physics Research...*”, A-351, n.1, pp.423-436, 1994.
- [40] RAHMANIAM H., WATTERSON J.I.W., “*Optimisation of light output from zinc sulphide scintillators for fast neutron radiography*”, SRCPD, University of the Witwatersrand, Private bag 3, Wits, 2050, Johannesburg, South Africa, 1998.